

УДК 667.64:678.026

**А. Букетов, докт. техн. наук; П. Стухляк, докт. техн. наук;
В. Левицький**

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ І ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У МОДИФІКОВАНИХ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТАХ

У роботі досліджено вплив фізичної природи і вмісту наповнювачів на адгезійні властивості та залишкові напруження у епоксидних композитах. Встановлено, що спосіб поетапного попереднього модифікування дисперсних часток епоксидним олігомером з наступним ультрафіолетовим опроміненням композицій у цілому забезпечує суттєве підвищення адгезійних характеристик матеріалів. Показано, що додаткове модифікування інгредієнтів композиції забезпечує зростання залишкових напружень у матриці залежно від фізичної природи введеного у неї наповнювача.

A. Buketov, P. Stuhlyak, V. Levitsky

RESEARCH ADHEZION DURABILITY AND REMAINING TENSIONS IN MODIFIED EPOXY COMPOSITES

In work research influence physical nature and maintenance fillers on adhesion properties and remaining tensions in epoxy composites. It is set that method of stage-by-stage previous modification dispersion particles epoxy oligomer with the next ultraviolet irradiation of compositions provides the increase adhesion properties of materials. It is shown that additional modification of ingredients in composition provides growth of remaining tensions in a matrix depending on physical nature of entered filler in matrix.

Умовні позначення

КМ – композитний матеріал;
УФО – ультрафіолетове опромінення;
ПЕПА – поліетиленполіамін;
 σ_a – адгезійна міцність, МПа;
 σ_3 – залишкові напруження, МПа.

Вступ. Одним із перспективних методів підвищення корозійної тривкості і стійкості до спрацювання технологічного устаткування в умовах впливу агресивних середовищ є нанесення на поверхню машин і механізмів полімерних композитних матеріалів (КМ) у вигляді захисних покриттів. Важливими властивостями, які визначають довговічність захисних покриттів, є комплекс фізико-механічних властивостей. До основних таких властивостей слід віднести адгезійну міцність і залишкові напруження. Відомо, що поліпшеними адгезійними властивостями до металевої основи характеризуються покриття, сформовані на основі епоксидного зв'язувача [1, 2]. Водночас такі матеріали відзначаються підвищеними залишковими напруженнями, що зумовлює при експлуатації зменшення адгезійних характеристик. Це призводить до зменшення ресурсу експлуатації технологічного обладнання.

Показано, що поліпшити експлуатаційні характеристики КМ можна введенням наповнювачів різної фізичної природи при оптимальному вмісті [3]. Крім того, відомо, що поліпшити фізико-хімічну взаємодію на межі поділу фаз “олігомер-наповнювач”, а отже, і адгезійні та когезійні властивості композитів, можна в результаті модифікування часток дисперсного наповнювача або оброблення композицій (на попередній стадії їх формування) енергетичними полями [2]. Встановлено, що таке модифікування у комплексі (незалежно часток наповнювача епоксидним олігомером і

на наступному етапі – композицій енергетичним полем, зокрема ультрафіолетовим опроміненням (УФО)) приводить до підвищення когезійної міцності епоксипластів [4]. Однак цікавим, з наукової і практичної точки зору, було дослідження впливу природи, дисперсності і вмісту наповнювачів, з одного боку, а також способів модифікування порошків олігомером і композицій енергетичним полем, з другого боку, на адгезійну міцність і залишкові напруження у розроблених матеріалах.

Мета роботи – дослідити вплив фізичної природи, дисперсності, вмісту наповнювачів на адгезійну міцність і залишкові напруження у епоксикомпозитах і виявити закономірності поліпшення властивостей матеріалів за рахунок такого модифікування.

Матеріали та методика досліджень. Об'єктом дослідження вибрано полімерну композицію з таким співвідношенням компонентів:

- епоксидно-діановий олігомер марки ЕД-20 – 100 мас.ч.;
- пластифікатори:
поліетеролігодіетеракрилат (ПДЕА-4) – 20 мас.ч.;
- поліефірний лак (ПЕ-220) – 10 мас.ч.

Як твердник використано поліетиленполіамін (ПЕПА) – 13 мас.ч., який дозволяє отверджувати композити при кімнатній температурі, що доцільно при нанесенні покриттів на складні поверхні технологічного устаткування.

Для поліпшення експлуатаційних характеристик КМ у композицію вводили дисперсні порошки (від 5 до 80 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли). Для визначення впливу фізичної природи і розмірів наповнювачів на властивості матеріалів у зв'язувач вводили наповнювачі з дисперсністю від 10 до 63 мкм. Це, зокрема:

- оксид алюмінію (Al_2O_3) (63 мкм);
- карбід бору (B_4C) (63 мкм);
- оксид міді (CuO) (63 мкм);
- технічний графіт (ТГ) (10-20 мкм);
- електрокорунд (ЕК) (10-20 мкм);
- коричневий шлам (КШ) (10-20 мкм), який є сумішшю оксидів (мас.ч.): заліза – 46-48; алюмінію – 7-9; кремнію – 12-14; кальцію – 18-21; магнію – 1-2; титану – 4-7; ванадію – 1,5-2,5; олова – 0,9-1,6; барію – 0,7...1,0 та інших (до суми 100 мас.ч.).

Коричневий шлам є побічним продуктом у виробництві оксиду алюмінію та відомий як структурно активний наповнювач. Застосування КШ дозволяє не лише підвищити адсорбційну взаємодію на межі поділу фаз “полімер-наповнювач”, а й здешевити композицію та вирішити проблему його утилізації.

З метою поліпшення взаємодії на межі поділу фаз “олігомер – дисперсний наповнювач” було застосовано спосіб модифікування композиції, що складається з двох етапів:

- змочування часток наповнювача епоксидним діановим олігомером ЕД-20 і термооброблення при $T = 353 \pm 2$ К протягом $\tau = 30 \pm 2$ хв;
- ультрафіолетове опромінення суміші модифікованих дисперсних часток наповнювача та олігомерної композиції до введення твердника [4].

Змочування наповнювача епоксидним олігомером проводили з метою збільшення взаємодії дисперсних часток з епоксидним зв'язувачем на стадії суміщення компонентів. На початковому етапі вводили частки в епоксидну смолу і перемішували композицію без твердника протягом 4-5 хв. Надалі на фільтрувальний папір наносили композицію з мінімально можливою товщиною шару, яка становила 80-100 мкм. Наступним етапом було термооброблення часток наповнювача з метою формування фізичних зв'язків на межі поділу фаз і видалення надмірної кількості епоксидної смоли. Ваговим методом встановлено, що вміст епоксидної смоли на поверхні дисперсних часток після їх модифікування олігомером за описаною методикою становить 8-12 мас.ч. на 100 мас.ч. дисперсного наповнювача.

УФО композицій здійснювали за допомогою спеціально розробленого ультрафіолетового випромінювача з використанням бактерицидної лампи ДРБ-8-1. Довжина хвилі ультрафіолетових променів становила 254 нм, робоча напруга – 220 В, частота струму – 50 Гц, потужність – 15 ВА. Тривалість опромінення композицій (без твердника) становила $t = 20 \pm 0,2$ хв. Наважка опромінених композицій становила 200 ± 10 г. Опромінювали композиції у тонкому шарі з товщиною 25-30 мм.

Затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримка протягом 2 годин при температурі $T = 293 \pm 2$ К; нагрівання зі швидкістю 3 град/хв до температури $T = 443$ К і витримка протягом 2,0 год; повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували протягом 60 год на повітрі при температурі $T = 293 \pm 2$ К [5].

При дослідженні адгезійних властивостей захисних покриттів до металевої основи, вивчали вплив вмісту та фізичної природи наповнювачів у композитах на руйнівне напруження при рівномірному відриві пари склеєних зразків (“метод грибків”). Дослідження проводили згідно з ГОСТ 14760-69 шляхом вимірювання опору відриву клейових з’єднань сталених зразків на розривній машині Р-5 при швидкості навантаження 10Н/с (рис. 1). Вміст дисперсного наповнювача змінювали від 5 до 80 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного зв’язувача.

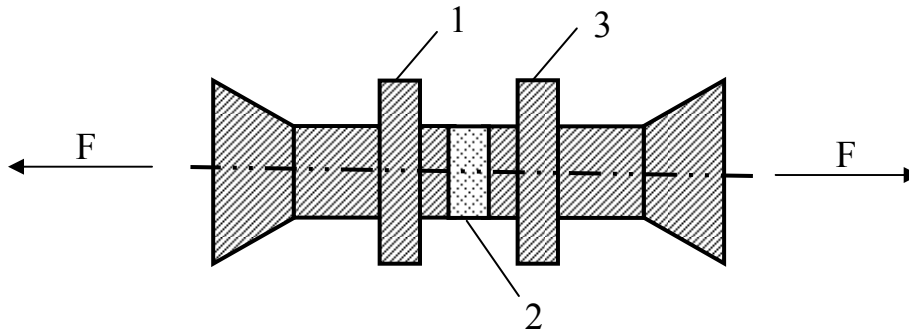


Рисунок 1 - Схема формування зразків для дослідження адгезійної міцності композитів:
1,3 – основа зі сталі Ст.3; 2 – олігомерна композиція з дисперсними частками

Залишкові напруження у покриттях визначали залежно від природи та вмісту наповнювачів. Для визначення залишкових напружень у захисних покриттях використовували консольний метод [6]. Покриття формували на сталевій основі з товщиною $\delta = 0,3$ мм. Зазначимо, що після формування композицію наносили на основу і полімеризували за описаним вище режимом. У процесі зшивання на межі поділу фаз “захисне покриття – металева основа” формуються фізичні і хімічні зв’язки, що зумовлює виникнення залишкових напружень розтягу. Внаслідок цього у процесі зшивання олігомера спостерігали піднімання консолі (у вигляді основи з покриттям), абсолютне значення якого (Н) визначали у кінці дослідження (після полімеризації матеріалу протягом $\tau = 72$ год) (рис. 2). Величину $\sigma_{зал}$ визначали за формулою:

$$\sigma_{зал} = \frac{HE\delta^3}{3L^2(\delta + \delta^*)\delta^*},$$

де:

H – відхилення пластинки-підкладки від початкового положення, м;

E – модуль пружності пластинки-підкладки ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа);

L – довжина пластинки-підкладки з покриттям, м;

δ – товщина пластинки-підкладки, м;

δ^* – товщина покриття, м.

Дослідження структури проводили методом електронної мікроскопії на рентгенівському мікроаналізаторі Superprobe 733 фірми “Jeol” (Японія) у відбитих

електронах, що дозволило виявити характер руйнування полімеркомпозитів і проаналізувати рівень фізико-хімічної взаємодії на межі поділу фаз “полімер – наповнювач”.

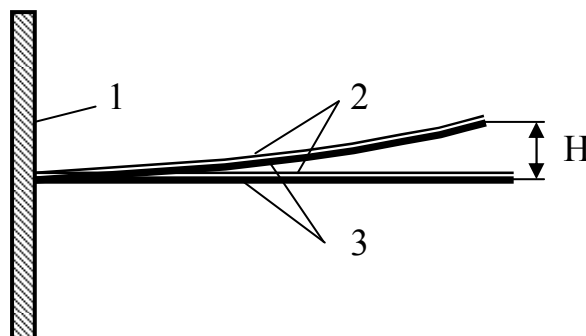


Рисунок 2 - Схема формування зразків для дослідження залишкових напружень у захисних покриттях: 1 – несуча опора, до якої кріпиться зразок із покриттям; 2 – захисне покриття; 3 – основа зі сталі Ст.3

Обговорення експериментальних результатів. Відомо, що експлуатаційні характеристики епоксидних КМ суттєво залежать не лише від фізичної природи і вмісту наповнювача, але й від його дисперсності [7]. Авторами доведено, що дисперсність наповнювача визначає його критичний вміст у зв'язувачі, позаяк зменшення розміру часток зумовлює збільшення його питомої площі поверхні [1, 7]. Це, у свою чергу, визначає перебіг фізико-хімічних процесів на межі поділу фаз “полімер – наповнювач”, у результаті чого навколо часток формуються зовнішні поверхневі шари (ЗПШ) з гетерогенною структурою.

Виходячи з цього у роботі на попередньому етапі досліджено вплив вмісту наповнювача на адгезійну міцність КМ, наповнених грубодисперсними (63 мкм), таких як оксид алюмінію, карбід бору і оксид міді, та дрібнодисперсними частками (10-20 мкм), таких як КШ, ТГ і ЕК. Експериментально встановлено, що адгезійна міцність пластифікованої епоксидної матриці до металевої основи становить 35,8 МПа (рис. 3). Введення у епоксидний зв'язувач дисперсних часток (з дисперсністю 63 мкм) забезпечує підвищення адгезійних характеристик КМ до 50-62 МПа залежно від фізичної природи наповнювача (рис. 3,а). Встановлено діапазон критичного вмісту грубодисперсного наповнювача у матриці, що становить 30-60 мас.ч. (тут і далі за текстом масові частини наповнювача подано на 100 мас.ч. епоксидної смоли), при якому адгезійна міцність КМ є максимальною (рис. 3,а). Показано, що максимальними адгезійними властивостями ($\sigma_a = 61,7$ МПа) відзначаються композити, наповнені оксидом алюмінію при оптимальному вмісті 50 мас.ч., порівняно з КМ, які містять частки карбиду бору і оксиду міді.

При аналізі результатів дослідження залежності адгезійної міцності від вмісту дрібнодисперсних наповнювачів (10-20 мкм) встановлено, що діапазон критичного вмісту дисперсних часток становить 20-40 мас.ч. залежно від природи порошків (рис. 3,б). При цьому показано, що максимальними адгезійними характеристиками (з досліджуваної групи дрібнодисперсних часток) відзначаються КМ, наповнені КШ (рис. 3,б). Введення такого наповнювача за оптимального вмісту ($q = 30$ мас.ч.) забезпечує підвищення адгезійної міцності, порівняно з пластифікованою епоксидною матрицею, з 35,8 до 49,7 МПа.

Попередньо нами доведено, що модифікування часток наповнювача епоксидним олігомером і подальше ультрафіолетове опромінення композиції на основі пластифікованого епоксидного зв'язувача за встановленими режимами забезпечує поліпшення когезійних властивостей КМ [4]. Експериментально встановлено, що використання способу такого комплексного модифікування забезпечує підвищення адгезійних характеристик КМ незалежно від природи введеного у зв'язувач наповнювача (рис. 3). Показано, що попереднє модифікування незалежно наповнювача

і композиції у цілому забезпечує підвищення адгезійної міцності композицій з грубодисперсними порошками (63 мкм) (рис. 3,а). При цьому введення у зв'язувач модифікованих часток оксиду алюмінію з наступним ультрафіолетовим опромінення композиції (до введення твердника ПЕПА) забезпечує підвищення адгезійної міцності матеріалів на 8-16% залежно від вмісту порошку порівняно з немодифікованим композитом. Встановлено оптимальний вміст модифікованого епоксидним олігомером оксиду алюмінію у композиції – 60 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли ЕД-20, при якому значення адгезійної міцності є максимальним (з усього спектру досліджуваних наповнювачів) і становить $\sigma_a = 71,1$ МПа. Крім того, встановлено критичний вміст модифікованих епоксидним олігомером дисперсних часток карбиду бору і оксиду міді у зв'язувачі для отримання композитів з високими показниками адгезійної міцності – 40 мас.ч. Показано, що введення модифікованих часток B_4C і CuO з подальшим УФО композиції при критичному вмісті забезпечує підвищення адгезійної міцності матеріалів з 53,8 до 62,4 МПа і з 54,3 до 56,2 МПа відповідно (рис. 3,а).

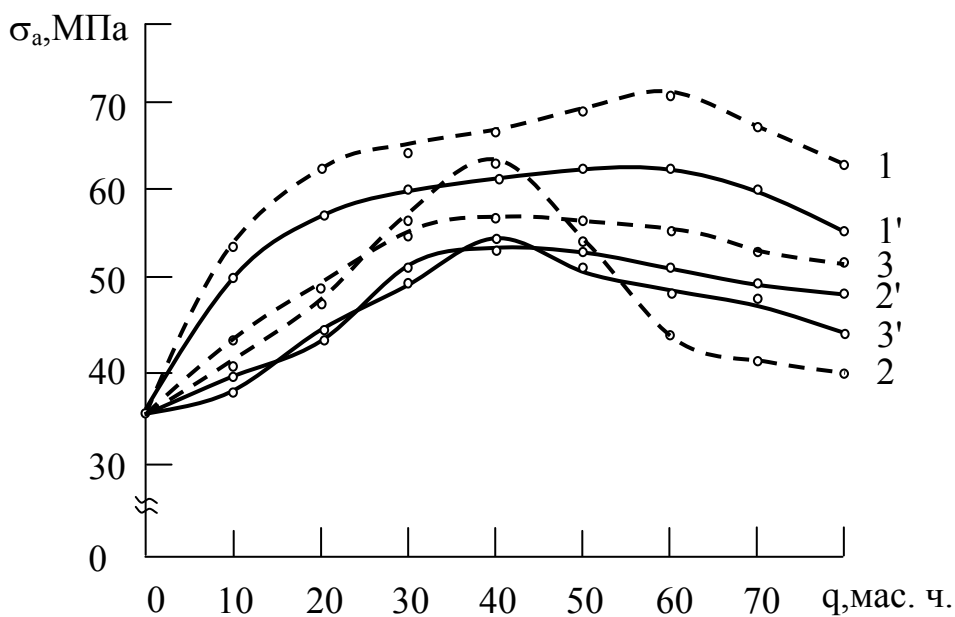


Рисунок 3,а - Залежність адгезійної міцності КМ від фізичної природи і вмісту наповнювача:
1, 1' – оксид алюмінію; 2, 2' – карбід бору; 3, 3' – оксид міді. Штриховою лінією позначено опромінені ультрафіолетом КМ з модифікованим наповнювачем

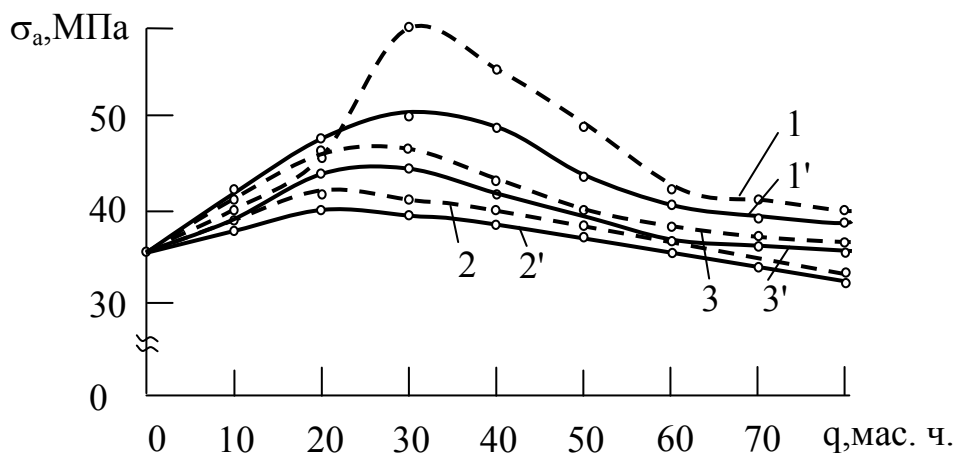


Рисунок 3,б - Залежність адгезійної міцності КМ від фізичної природи і вмісту наповнювача:
1, 1' – КШ; 2, 2' – ТГ; 3, 3' – ЕК. Штриховою лінією позначено опромінені ультрафіолетом КМ з модифікованим наповнювачем

Аналогічно підвищення адгезійної міцності КМ спостерігали також при модифікуванні дрібнодисперсних часток (10-20 мкм) КШ, ТГ і ЕК з наступним опроміненням композицій. Встановлено критичний вміст дрібнодисперсних наповнювачів у композиції, який становить 30 мас.ч. незалежно від природи порошків (рис. 3,б). Водночас показано, що максимальне підвищення адгезійної міцності спостерігали при введенні у зв'язувач модифікованих часток КШ. Подальше опромінення композицій забезпечує зростання адгезійних властивостей КМ з 49,7 (для КМ з немодифікованими частками) до 59,8 МПа (при $q = 30$ мас.ч.). Введення при тому ж вмісті модифікованих часток ТГ і ЕК не приводить суттєвого підвищення адгезійних характеристик КМ (на % відповідно), що зумовлено впливом активності, топології поверхні і фізичної природи часток на перебіг фізико-хімічних процесів на межі поділу фаз при структуроутворенні КМ. У свою чергу швидкість перебігу процесів міжфазової взаємодії зумовлює формування ЗПШ навколо часток наповнювача з різною структурою і геометричними розмірами, які визначають властивості матеріалів.

Поліпшення адгезійних властивостей матеріалів при модифікуванні наповнювачів і композицій у комплексі можна пояснити наступним. Попередньо нами показано, що змочування часток епоксидним олігомером з наступним їх термообробленням за описаними у методиці температурно-часовими режимами забезпечує підвищення реакційної здатності наповнювача [4, 5]. Після введення модифікованих часток у пластифікований зв'язувач відбувається структуроутворення КМ з утворенням навколо часток ЗПШ з більшим об'ємом, порівняно з матеріалами, які містять немодифікований наповнювач. Це підвищує не лише когезійні, але й адгезійні характеристики композитів. Подальше ультрафіолетове опромінення композицій забезпечує утворення вільних радикалів у зв'язувачі, які активніше взаємодіють з центрами на поверхні дисперсних часток та між собою (порівняно з вихідними макромолекулами епоксидної смоли). Це підвищує густину зшивання матриці у ЗПШ, а також приводить до збільшення їх протяжності у полімері, внаслідок чого поліпшуються адгезійні властивості матеріалів. Зазначимо, що, як впливає з результатів дослідження адгезійних властивостей КМ, важливе значення при структуроутворенні композитів має фізична природа і дисперсність часток наповнювача.

З метою підтвердження результатів дослідження адгезійних властивостей КМ і висловлених вище положень нами проведено випробування залишкових напружень у вихідних і модифікованих захисних покриттях. Зазначимо, що досліджували залишкові напруження у матеріалах (рис. 4):

- з немодифікованим наповнювачем;
- з модифікованим епоксидною смолою наповнювачем;
- з модифікованим епоксидною смолою наповнювачем і УФО композиції.

Експериментально встановлено, що абсолютна величина залишкових напружень у пластифікованій епоксидній матриці становить $\sigma_{\text{зал}} = 2,7$ МПа. Після УФО епоксидного зв'язувача значення залишкових напружень у матриці зростає на 18,5 % і становить $\sigma_{\text{зал}} = 3,2$ %. Це дозволяє стверджувати, що УФО забезпечує утворення вільних радикалів, які інтенсивно взаємодіють з гідроксильними центрами на поверхні металевої основи. Внаслідок цього збільшується вміст гель-фракції у матриці, зростає кількість фізичних і хімічних зв'язків у об'ємі полімера або на межі поділу фаз "матриця – металева основа", а отже зростає абсолютне значення залишкових напружень і поліпшуються фізико-механічні властивості КМ.

При дослідженні значення залишкових напружень у дисперснонаповнених КМ встановлено, що введення часток Al_2O_3 , КШ і ЕК забезпечує зменшення $\sigma_{\text{зал}}$ з 2,7 (для вихідної епоксидної матриці) до 1,7-1,9 МПа залежно від фізичної природи наповнювача (рис. 4). Водночас введення у епоксидний олігомер часток B_4C , CuO і ТГ при тому ж вмісті навпаки зумовлює підвищення абсолютного значення залишкових

напружень у покриттях з 2,7 до 2,8 МПа. Такий ефект зумовлений тим, що при введенні наповнювача у зв'язувач формуються, як було показано вище, ЗППШ з гетерогенною структурою. При цьому геометричні розміри ЗППШ і ступінь зшивання у них суттєво залежать від фізичної природи, дисперсності і критичного вмісту наповнювача у матриці. Отже, прогнозованим введенням наповнювача можна регулювати як адгезійні характеристики, так і залишкові напруження у покриттях, які в основному визначають швидкість перебігу процесів старіння КМ, і тим самим – міжремонтний ресурс експлуатації технологічного устаткування.

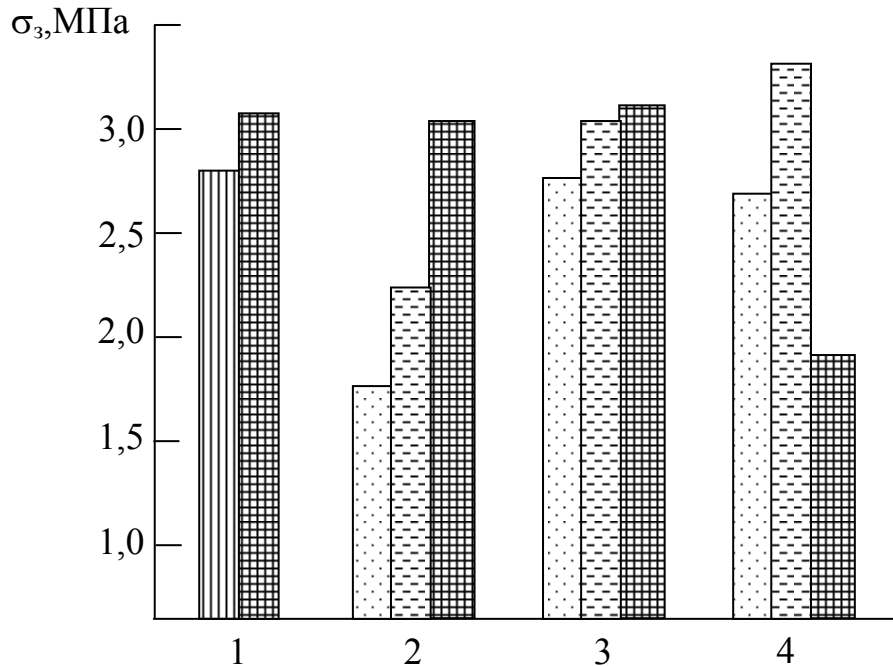


Рисунок 4,а - Залежність залишкових напружень від природи наповнювача і методу модифікування композицій (вміст наповнювача 80 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера):
1 – епоксидна матриця; 2 – оксид алюмінію; 3 – карбід бору; 4 – оксид міді

-  - пластифікована епоксидна матриця;
-  - композит з немодифікованим наповнювачем;
-  - композит з модифікованим наповнювачем;
-  - композит з модифікованим наповнювачем після УФО.

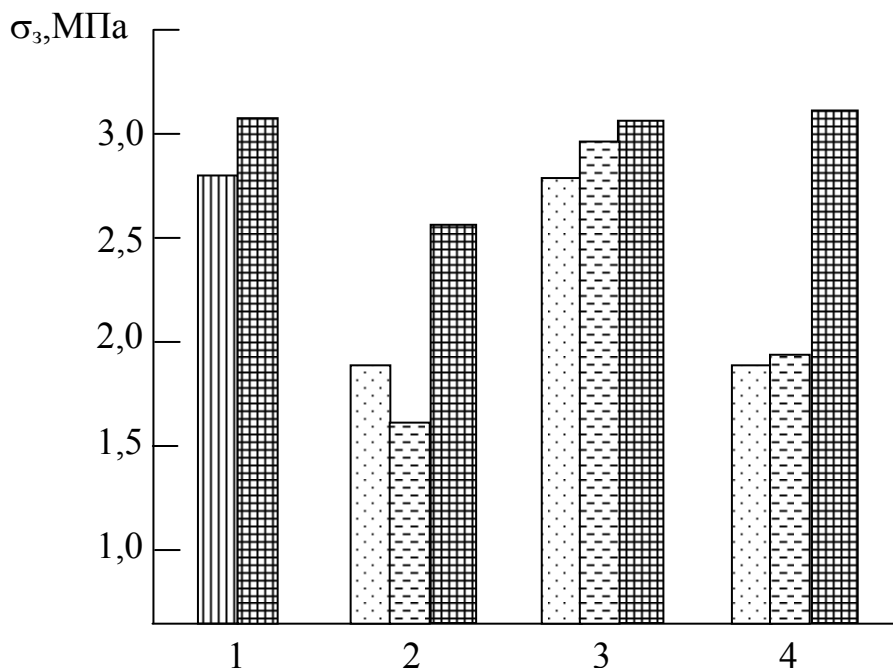


Рисунок 4,б - Залежність залишкових напружень від природи наповнювача і методу модифікування композицій (вміст наповнювача 80 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера):

1 – епоксидна матриця; 2 – КШ; 3 – ТГ; 4 – ЕК

Показано, що майже в усіх випадках (виняток становлять лише покриття, наповнені частками КШ) модифікування наповнювача епоксидним олігомером призводить до підвищення залишкових напружень у покриттях, порівняно з покриттями, які містять немодифіковані частки (рис. 4). Отримані результати добре узгоджуються з результатами дослідження адгезійної міцності КМ, тобто при підвищенні адгезійних характеристик збільшуються залишкові напруження у покриттях. Це свідчить про збільшення ступеня зшивання у ЗПШ матриці внаслідок модифікування дисперсних часток наповнювача.

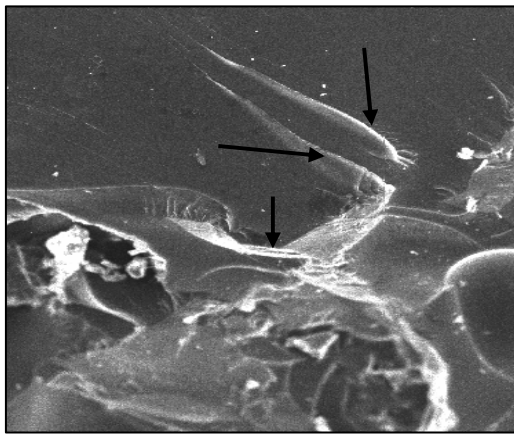
Додаткове опромінення композицій ультрафіолетом забезпечує підвищення ступеня зшивання матриці у ЗПШ, про що свідчить підвищення абсолютного значення залишкових напружень, порівняно з КМ, що містять лише модифікований наповнювач на 6-72 % залежно від фізичної природи дисперсних часток. Виняток, становить модифікований КМ з частками оксиду міді. У цьому випадку після УФО залишкові напруження зменшуються з $\sigma_{\text{зал}} = 3,4$ до 1,9 МПа. На наш погляд це зумовлено тим, що при введенні модифікованих часток CuO з наступним УФО композиції формуються ЗПШ з дислокаціями, внаслідок чого зменшується величина залишкових напружень і адгезійна міцність (при вмісті наповнювача $q = 80$ мас.ч. не є достатньо великою).

Отже, можна вважати що модифікування у комплексі як часток наповнювача, так і композицій ультрафіолетом в цілому забезпечує підвищення водночас як адгезійної міцності КМ, так і залишкових напружень у захисних покриттях. При цьому важливе значення має вибір критичного вмісту наповнювача, введення якого у зв'язувач забезпечило б отримання модифікованого матеріалу з максимальними адгезійними характеристиками і незначними показниками залишкових напружень.

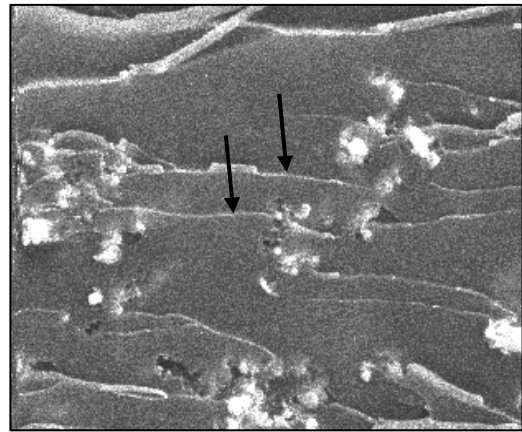
Виходячи з вище сказаного, цікавим з наукової і практичної точки зору, було проведення методом електронної мікроскопії дослідження структури вихідних і модифікованих композитів. При аналізі фрактограм зламу епоксидної матриці спостерігали наявність ліній сколювання (показано стрілками), що свідчить про значні залишкові напруження у полімері і невисокі когезійні характеристики матеріалу у об'ємі (рис. 5,а). Введення у зв'язувач часток оксиду алюмінію забезпечує утворення КМ, на фрактограмах зламу якого відмічено утворення структури з рівномірно розподіленими частками наповнювача (рис. 5,б). При цьому також спостерігали лінії сколювання, однак не так явно виражені, як на фрактограмах зламу епоксидної матриці. Це опосередковано свідчить про зменшення абсолютної величини залишкових напружень у матриці, що підтверджує результати досліджень, наведених на рис. 4,а. Введення у зв'язувач модифікованого наповнювача сприяє зростанню значення залишкових напружень, про що свідчить утворення раковин на фрактограмах зламу епоксикомпозитів (рис. 5,в). Результати аналізу фрактограм зламу композиту з модифікованими частками оксиду алюмінію після УФО дозволяють констатувати про підвищення когезійної міцності систем (про що свідчить утворення рівномірно розподіленої структури матеріалу), які водночас відзначаються значними залишковими напруженнями (рис. 4,г). Отже доведено, що спосіб модифікування КМ, який охоплює незалежно етап модифікування часток наповнювача і етап опромінення композицій ультрафіолетом забезпечує підвищення адгезійних характеристик з одночасним зростанням залишкових напружень у матеріалах.

Висновки. У роботі досліджено вплив фізичної природи, дисперсності та вмісту наповнювачів на адгезійну міцність і залишкові напруження у епоксикомпозитах. Встановлено що попереднє модифікування часток наповнювача епоксидним олігомером і подальше ультрафіолетове опромінення композицій на основі пластифікованого епоксидного зв'язувача забезпечує поліпшення адгезійних

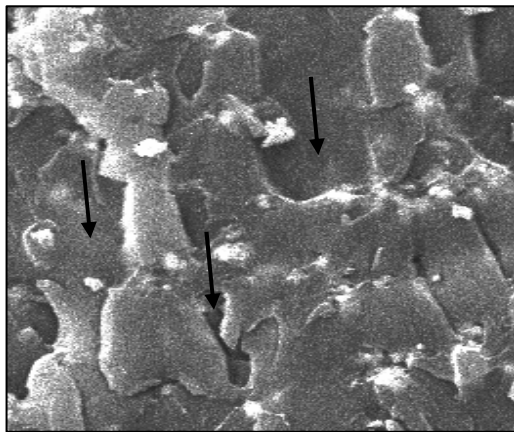
властивостей КМ незалежно від природи введеного у зв'язувач наповнювача. Поліпшення адгезійних властивостей матеріалів при модифікуванні наповнювачів і композицій у комплексі можна пояснити тим, що змочування часток епоксидним олігомером з наступним їх термообробленням забезпечує підвищення реакційної здатності наповнювача. Після введення модифікованих часток у пластифікований зв'язувач відбувається структуроутворення КМ з утворенням навколо часток ЗПШ з більшим об'ємом, порівняно з матеріалами, які містять немодифікований наповнювач. Подальше ультрафіолетове опромінення композицій забезпечує утворення вільних радикалів у зв'язувачі, які активніше взаємодіють з центрами на поверхні дисперсних часток та між собою порівняно з вихідними макромолекулами епоксидної смоли. Це підвищує густину зшивання матриці у ЗПШ, а також приводить до збільшення їх протяжності у полімері, внаслідок чого поліпшуються адгезійні властивості матеріалів.



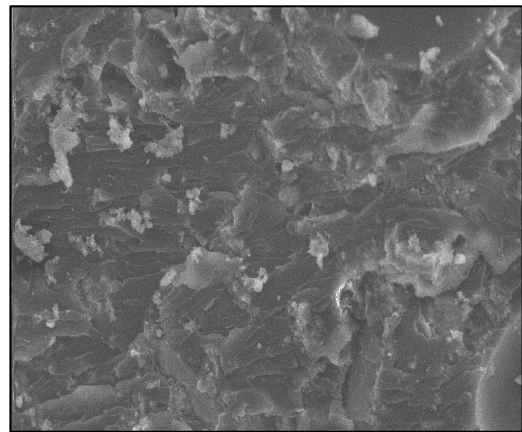
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 - Фрактограми зламу КМ, наповнених оксидом алюмінію: а) пластифікована епоксидна матриця; б) композит з немодифікованим наповнювачем; в) композит з модифікованим наповнювачем; г) композит з модифікованим наповнювачем після УФО

Водночас підтверджено, що при такому комплексному модифікуванні підвищуються залишкові напруження у захисних покриттях, які пришвидшують старіння матеріалів при їх експлуатації. Знизити величину залишкових напружень і одночасно підвищити адгезійну міцність композитів можна введенням у зв'язувач двокомпонентного полідисперсного наповнювача при критичному вмісті. Такі дослідження заплановано провести авторами у подальшому.

Література

1. Соболевский М.В., Музовская С.А., Помелева Г.С. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов.-М.: Химия, 1975.- 296с.
2. Савчук П.П., Кальба Є.М., Андрієвський В.В., Гарматюк Р.Т. Спосіб отримання електретних структур на основі епоксидних композиційних матеріалів // Наукові нотатки.- Луцьк: ЛДТУ.-2008.- Випуск 28.-С.252-257.
3. Добротвор І.Г. Моделювання росту мікроструктур епоксикомпозитів функціями дискретних відліків // Наукові нотатки. - Луцьк: ЛДТУ.-2008.-Випуск 28.-С.64-73.
4. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Левицький В.В. Епоксидні композити. Дослідження механізму впливу технології формування на властивості // Хімічна промисловість України.-2004.-№5.-С.17-23.
5. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Добротвор І.Г. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями. - Тернопіль: Збруч, 2008.-208с.
6. Корякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий.-М.:Химия, 1988.-272с.
7. Кальба Є.М., Савчук П.П., Голотенко С.М. Структурні зміни та триботехнічні процеси в високонаповнених полімеркомпозитах при терті // Фізика конденсованих високомолекулярних систем. Наукові записки Рівненського педінституту.-В.4.- Рівне. РДПУ.-1997.-С.90-92.

Одержано 10.10.2008 р.