

УДК 667.64:678.026

А.В. Букетов, Д.О. Зінченко, В.Д. Нігалатій

Херсонська державна морська академія

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІКРОДИСПЕРСНИХ АНТИФРИКЦІЙНИХ
НАПОВНЮВАЧІВ НА АДГЕЗІЙНУ МІЦНІСТЬ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ**

Досліджено вплив вмісту дисперсних наповнювачів MoS_2 та $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ на міцність адгезійних з'єднань при відриві (σ_n) та зсуві (τ). Встановлено, що дисперсність наповнювача визначає його критичний вміст у зв'язувачі. Підтвердженням практичних і теоретичних положень є результати дослідження залишкових напружень. Аналіз результатів дозволив констатувати, що в системах відбувається збільшення енергії адсорбції, що за нашим припущенням приводить до зміни надмолекулярних структур у зовнішніх поверхневих шарах у матриці навколо часток наповнювачів.

Ключові слова: епоксидний композит, адгезія, залишкові напруження, адсорбція.

А.В. Букетов, Д.А. Зинченко, В.Д. Нигалатий

Херсонская государственная морская академия

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОДИСПЕРСНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ
НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ**

Исследовано влияние содержания дисперсных наполнителей MoS_2 и $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ на прочность адгезионных соединений при отрыве (σ_n) и сдвиге (τ). Установлено, что дисперсность наполнителя определяет его критическое содержание в связующем. Подтверждением практических и теоретических положений являются результаты исследований остаточных напряжений в композитах. Анализ результатов испытаний позволил констатировать, что в системах происходит увеличение энергии адсорбции, что по нашему предположению приводит к изменению надмолекулярных структур во внешних поверхностных слоях в матрице вокруг частиц наполнителей.

Ключевые слова: эпоксидный композит, адгезия, остаточные напряжения, адсорбция.

A.V. Buketov, D.A. Zinchenko, V.D. Nihalatyi

Kherson state Maritime Academy

**THE INVESTIGATION OF MICRODISPERSE ANTI-FRICTION FILLERS INFLUENCE ON
THE EPOXY COMPOSITES ADHESION STRENGTH**

The influence of the content of MoS_2 and $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ disperse fillers on the adhesive compounds strength under abrasion (σ_n) and shear (τ) was investigated. It was established that the filler dispersion determines its critical content in binder. The confirmation of practical and theoretical backgrounds is the results of the study of residual stresses. The analysis of the results allowed concluding that the increase of adsorption energy occurs in the systems that by our assumption lead to supramolecular structures change in the outer surface layers in the matrix around filler particles.

Keywords: epoxy composite, adhesion, residual stresses, adsorption.

Постановка проблеми. Прогрес у різних областях науки і техніки вимагає створення нових матеріалів, які мають комплекс необхідних і наперед заданих властивостей. До них ставляться підвищені вимоги щодо міцності, твердості, теплостійкості, низької вартості тощо. Більшість з цих вимог задовольняють внаслідок впровадження у промисловість полімерних композитних матеріалів (КМ). При цьому залежно від нових вимог сучасної промисловості постає завдання створення нових КМ, що містять різні за фізичною природою дисперсні наповнювачі. У цьому напрямку розвитку нових технологій і розроблення перспективних матеріалів до важливих показників їх експлуатаційної надійності слід віднести адгезійну та когезійну міцність. Адгезійна взаємодія на межі поділу фаз «полімер – наповнювач» визначається, перш за все, адсорбційною взаємодією між двома тілами. При цьому важливим є врахування взаємодії не лише на межі поділу фаз «полімер – наповнювач» чи «полімер – основа», але, що особливо важливо з практичної точки зору, на межі поділу фаз «полімерна композиція – металева основа». Слід зазначити актуальність даної проблематики робіт з даного напрямку, позаяк вивченню перебігу процесів адгезії у світовій літературі присвячено значний обсяг робіт [1-5], однак механізм адгезії на сьогодні ще вивчено недостатньо. Тому дослідження у даному напрямку полімерного матеріалознавства є важливим для подальшого розвитку фізичної хімії наповнених полімерів, що дозволить ширше використати потенційні можливості епоксидних матеріалів, в тому числі і у вузлах тертя.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі теорії адгезії носять обмежений характер. Електрична, дифузійна, релаксаційна та інші теорії адгезії [1,2,6] розглядають явища, що не пояснюють перебіг процесів при структуроутворенні матеріалів. Водночас адсорбційна або

молекулярна теорія адгезії розглядає процес взаємодії при дії міжмолекулярних сил на межі поділу фаз [7]. Взаємодію полімерних молекул з поверхнею, яка має місце у наповнених системах, можна розглядати як процес, що приводить до перерозподілу міжмолекулярних зв'язків у системі і до утворення додаткових фізичних зв'язків у структурній сітці внаслідок взаємодії сегментів з поверхнею. Відомо, що утворення додаткових зв'язків знижує молекулярну рухливість у системі [8]. Дослідження молекулярної рухливості у наповнених системах підтверджено основними положеннями, наведеними у працях [9-11].

Окрім того, введення наповнювачів зменшує можливість утворення тріщин на початковому етапі формування КМ, знижує ступінь усадки, що, як наслідок, поліпшує фізико-механічні і теплофізичні властивості матеріалів [1-11].

Мета роботи – на основі залежності властивостей матеріалів від вмісту наповнювачів встановити критичний вміст дисперсних часток у зв'язувачі для формування покриттів з необхідними адгезійними властивостями.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні 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.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо [8], що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$. 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 (MoS_2) і мікротальку ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$) з розміром 7...10 мкм (рис.1).

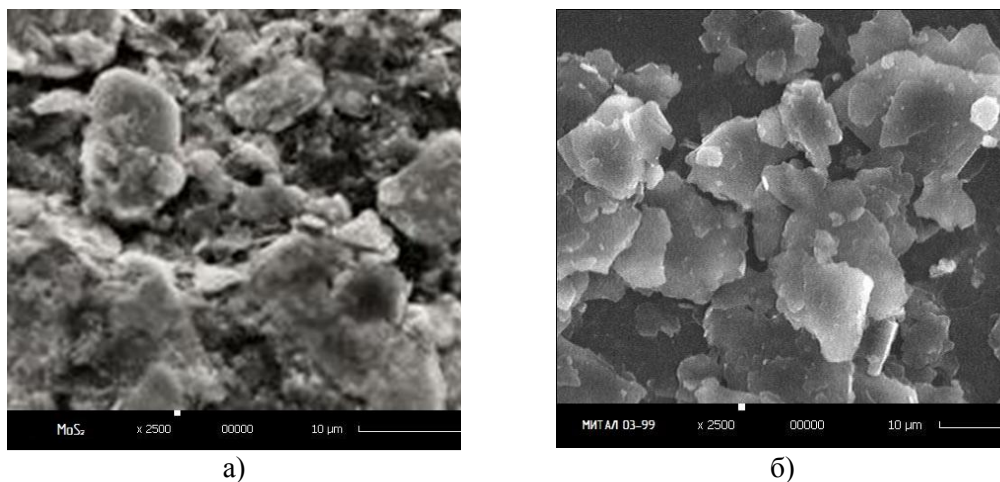


Рис. 1. Загальний вигляд мікродисперсних часток наповнювачів:
а) дисульфід молібдену; б) мікротальк

Дисульфиду молібдену (ДМ) є сухою мастильною речовиною зі стабільними властивостями у вакуумі та за умов експлуатації до температури 350 °С. Такі матеріали використовують в критично важливих компонентах, наприклад, у системах змащування суднових двигунів. При введенні даного наповнювача у полімерний зв'язувач формуються композити до з поліпшеними когезійними властивостями [7]. Хімічний склад ДМ наведено в табл.1 [13].

Таблиця 1

Хімічний склад дисульфиду молібдену

Назва сполуки (елементу)	MoS_2	Кремній, Si	Залізо, Fe	Алюміній, Al	Кальцій, Ca	Волога, H_2O
Вміст, %	99,7	0,02	0,1	0,024	0,068	0,088

Мікротальк (МТ) застосовують як наповнювач для підвищення експлуатаційних характеристик гум, а також лакофарбових покриттів. Крім того, даний наповнювач використовують у вигляді присадок для збільшення терміну експлуатації мастил у системах змащування двигунів внутрішнього згорання. У сфері застосування пластичних мас частки МТ вводять у полімер у вигляді нуклеатора, що дозволяє скоротити тривалість циклу кристалізації полімерів і покращити їх фізико-механічні властивості. Хімічний склад МТ наведено в табл.2 [14].

Таблиця 1

Хімічний склад мікротальку

Назва сполуки (елементу)	Оксид магнію, MgO	Оксид кремнію, SiO ₂	Оксид залізі, Fe ₂ O ₃
Вміст, %	30–35	65–70	0–0,05

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 в епоксидний олігомер; 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 при температурі $T = 293 \pm 2$ 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 при температурі $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: адгезійна міцність при відриві та зсуві, залишкові напруження.

Адгезійну міцність КМ до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівне напруження («метод грибків») 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 сталевих зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 за швидкості навантаження $v = 10$ м/с. Діаметр робочої частини сталевих 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 [12]. Покриття товщиною $\delta = 0,3 \dots 0,8$ мм формували на сталевій основі. Параметри основи: загальна довжина $l = 100$ мм; робоча довжина $l_0 = 80$ мм; товщина $\delta = 0,3$ мм.

Результати досліджень та їх обговорення. Доведено [5], що дисперсність наповнювача визначає його критичний вміст у зв'язувачі, позаяк зменшення розміру часток зумовлює збільшення його питомої площі поверхні. Виходячи з цього у роботі використовували частки наповнювачів з дисперсністю 7...10 мкм. На початковому етапі проведено дослідження впливу вмісту дисперсних наповнювачів MoS₂ та Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂ на адгезійну міцність при відриві (σ_a) та зсуві (τ).

Експериментально встановлено (рис. 2), що адгезійна міцність модифікованої УЗО епоксидної матриці становить $\sigma_a = 24,4$ МПа. Введення у епоксидний олігомер часток дисперсного наповнювача ДМ за вмісту $q = 5 \dots 15$ мас.ч. (тут і далі за текстом вміст дисперсних часток наведено у мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру) приводить до збільшення показників адгезійної міцності при відриві КМ до $\sigma_a = 51,0 \dots 54,5$ МПа (рис. 2, крива 1). Такі результати можна пояснити адсорбційною взаємодією компонентів системи та зміною надмолекулярних структур зовнішніх поверхневих шарів (ЗПШ) і всієї полімерної фази у наповненій системі. Надалі введення ДМ за вмісту $q = 20 \dots 80$ мас.ч. призводить до зниження адгезійної міцності, яка становить $\sigma_a = 34,1 \dots 49,9$ МПа. Такі дані можна пояснити поступовим перенасиченням адсорбенту, а отже зменшенням енергії адсорбції та молекулярної рухливості структурних елементів ланцюгів,

підвищенням в'язкості системи і водночас меншим ступенем змочування дисперсного наповнювача олігомером та виникнення у зв'язку з цим дефектів в адгезійному шарі. Також, за рахунок слабких ван-дер-ваальсових сил взаємодії між атомами сірки в MoS_2 , шари можуть легко ковзати один відносно одного. Це призводить до появи антифрикційного ефекту. Такий вплив наповнювача розповсюджується на увесь об'єм полімеру і змінює його макрохарактеристики.

Введення ДМ за вмісту $q = 10$ мас.ч. сприяє появі максимуму на кривій залежності міцності адгезійних з'єднань. Такі композити відзначаються адгезійною міцністю, яка становить $\sigma_a = 54,5$ МПа. На наш погляд, це можна пояснити нормалізацією енергії адсорбції внаслідок введення часток наповнювача за критичного вмісту. При структуроутворенні композитів відбувається перерозподіл міжмолекулярних зв'язків у композиційній системі «олігомер – наповнювач – твердник» та утворення фізичних зв'язків у структурній сітці внаслідок взаємодії сегментів олігомеру з активними центрами на поверхні часток дисперсного наповнювача.

Стосовно наповнювача МТ встановлена наступна тенденція (рис.2, крива 2). При введенні дисперсного наповнювача за вмісту $q = 5 \dots 30$ мас.ч. спостерігали монотонне зростання міцності адгезійних з'єднань з $\sigma_a = 24,4$ МПа до $\sigma_a = 27,6 \dots 42,5$ МПа. Максимум на кривій залежності міцності адгезійних з'єднань від вмісту МТ встановлено при вмісті $q = 40$ мас.ч. дисперсного наповнювача ($\sigma_a = 44,7$ МПа). Як зазначено вище, встановлений максимум пов'язаний зі збільшенням енергії адсорбції, що, за нашим припущенням, приводить до зміни надмолекулярних структур у ЗПШ навколо часток наповнювача. Введення мікротальку у кількості $q = 50 \dots 80$ мас.ч. призводить до незначного зменшення міцності адгезійних з'єднань відносно максимального значення ($\Delta\sigma = 4,49$ МПа), при цьому $\sigma_a = 40,2 \dots 44,5$ МПа. Поясненням цього є те, що введення часток наповнювача понад критичного вмісту спричиняє початок підвищення в'язкості системи і водночас зменшення ступеня його змочування. У результаті зазначених явищ утворюються концентратори напружень в адгезійному шарі, які сприяють утворенню дефектів і, як наслідок, зменшення міцності адгезійних з'єднань.

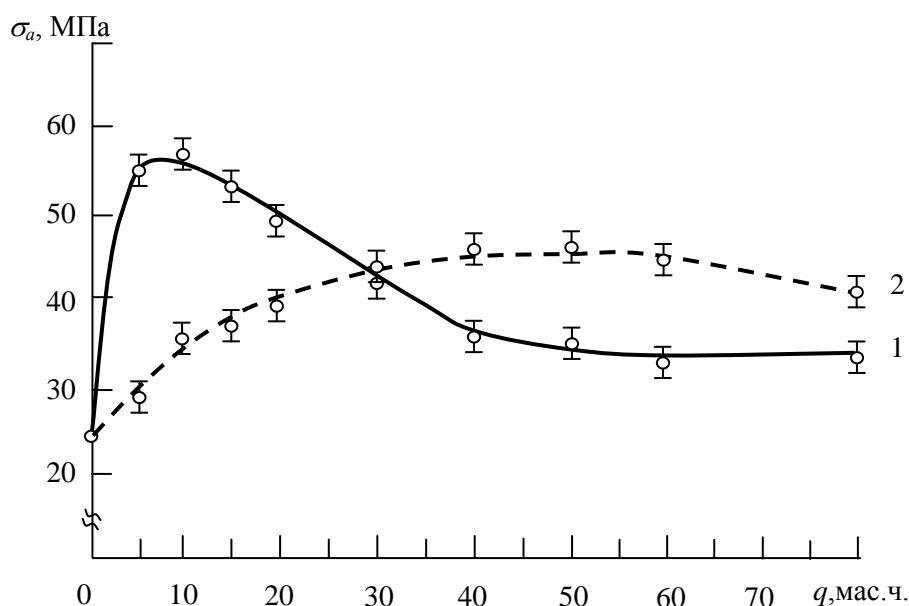


Рис. 2. Залежність адгезійних властивостей (σ_a) КМ від вмісту мікродисперсних наповнювачів: 1 – MoS_2 ; 2 – $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

Додатково проводили дослідження адгезійної міцності при зсуві (рис. 3). Встановлено, що введення ДМ за вмісту $q = 5 \dots 20$ мас.ч. приводить до суттєвого збільшення показників адгезійної міцності при зсуві з $\tau = 9,0$ МПа (для вихідної епоксидної матриці) до $\tau = 15,92 \dots 16,95$ МПа (рис.3, крива 1). Виникнення максимуму на кривій залежності адгезійної міцності при зсуві ($\tau = 16,95$ МПа) від вмісту наповнювача, який спостерігали при кількості останнього $q = 10$ мас.ч., пов'язано зі збільшенням швидкості перебігу фізико-хімічних процесів полімеризації за рахунок активації функціональних груп інгредієнтів зв'язувача. Це приводить до підвищення ступеня зшивання КМ. Надалі введення наповнювача у кількості $q = 30 \dots 80$ мас.ч. призводить до монотонного зменшення міцності адгезійних з'єднань відносно максимального значення ($\Delta\tau = 2,94$ МПа), при цьому $\tau = 14,01 \dots 15,61$ МПа.

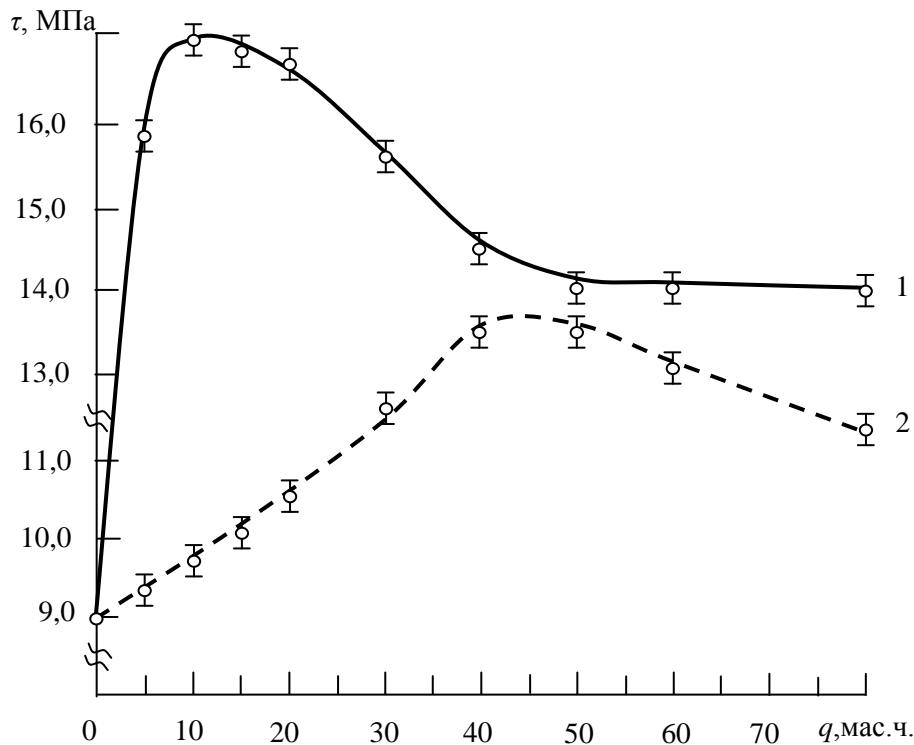


Рис. 3. Залежність адгезійних властивостей (τ) КМ від вмісту мікродисперсних наповнювачів: 1 – MoS_2 ; 2 – $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

Стосовно наповнювача МТ встановлена наступна тенденція (рис.3, крива 2). При введенні дисперсного наповнювача за вмісту $q = 5 \dots 30$ мас.ч. спостерігали монотонне зростання міцності адгезійних з'єднань з $\tau = 9,0$ МПа до $\tau = 9,4 \dots 11,6$ МПа. Максимум на кривій залежності міцності адгезійних з'єднань від вмісту МТ встановлено при вмісті $q = 40$ мас.ч. дисперсного наповнювача ($\tau = 13,6$ МПа). Встановлений максимум пов'язаний зі збільшенням енергії адсорбції та ефективної густини сітки для шарів полімеру, що знаходяться на твердій основі. Введення мікротальку у кількості $q = 50 \dots 80$ мас.ч. призводить до зменшення міцності адгезійних з'єднань відносно максимального значення, при цьому $\tau = 11,43 \dots 13,06$ МПа. Поясненням цього є підвищення в'язкості системи і водночас зменшення ступеня його змочування та ущільнення густини просторової сітки.

Підтвердженням практичних і теоретичних положень, викладених вище, є результати дослідження залишкових напружень (рис. 4).

Встановлено, що величина залишкових напружень у матриці становить $\sigma_3 = 1,4$ МПа. Введення часток ДМ за вмісту $q = 5 \dots 80$ мас.ч. приводить до збільшення залишкових напружень відносно матриці і становить $\sigma_3 = 1,5 \dots 2,2$ МПа (рис. 4, крива 1). Мінімум на кривій залежності залишкових напружень встановлено за вмісту $q = 5 \dots 10$ мас.ч., при цьому $\sigma_3 = 1,5 \dots 1,6$ МПа. Тобто наведені дані добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень адгезійної міцності при відриві та зсуві (адгезія за даного вмісту ДМ має максимальне значення). Можна стверджувати про виникнення значної кількості як фізичних, так і хімічних зв'язків на межі поділу фаз «полімер – наповнювач», «полімер – металева основа», що, у свою чергу, підвищує ступінь зшивання композитів та приводить не лише до підвищення показників міцності адгезійних з'єднань, але й до зменшення залишкових напружень. Введення наповнювача за вмісту $q = 15 \dots 80$ мас.ч. приводить до збільшення залишкових напружень до $\sigma_3 = 1,7 \dots 2,2$ МПа, а, отже, і до дефектної структури адгезійного шару.

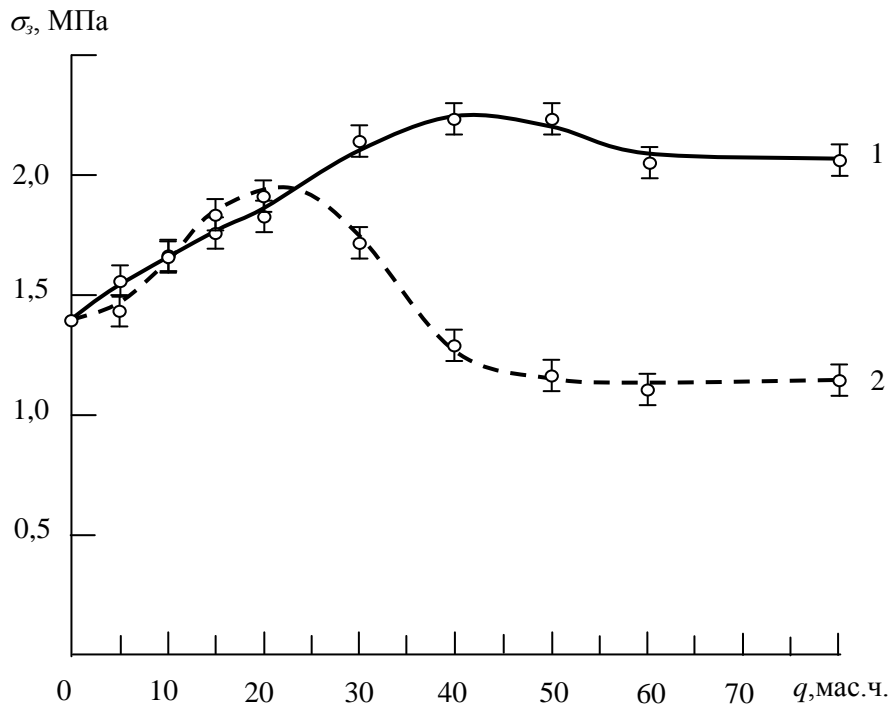


Рис. 4. Залежність залишкових напружень (σ_3) КМ від вмісту дисперсних наповнювачів: 1 – MoS_2 ; 2 – $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

Стосовно наповнювача МТ встановлена наступна тенденція (рис.4, крива 2). Введення часток МТ за вмісту $q = 5 \dots 20$ мас.ч. приводить до збільшення залишкових напружень, які становлять – $\sigma_3 = 1,4 \dots 1,9$ МПа (рис. 4, крива 2). Наведені дані узгоджуються з результатами експериментальних досліджень адгезійної міцності при відриві та зсуві (адгезія за даного вмісту МТ має мінімальне значення). Введення наповнювача за вмісту $q = 30 \dots 80$ мас.ч. приводить до зменшення залишкових напружень до $\sigma_3 = 1,1 \dots 1,7$ МПа, а, отже, і до зменшення дефектної структури КМ. Мінімум на кривій залежності залишкових напружень встановлено за вмісту $q = 50 \dots 80$ мас.ч., які становили при цьому – $\sigma_3 = 1,1 \dots 1,2$ МПа.

У цілому наведені вище дані добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень адгезійної міцності при відриві та зсуві. Тобто динаміка залишкових напружень КМ від вмісту ДМ та МТ корелює з аналогічною залежністю міцності адгезійних з'єднань при відриві та зсуві зразків.

Зважаючи на проведені експериментальні дослідження було визначено оптимальний вміст наповнювачів для формування адгезійного шару, який становить $q = 5 \dots 10$ мас.ч. наповнювача ДМ або $q = 30 \dots 40$ мас.ч. наповнювача МТ на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20.

Висновки. За результатами проведених досліджень композитних матеріалів встановлено критичний вміст дисперсних наповнювачів з розміром $7 \dots 10$ мкм при формуванні адгезійного шару для покриттів, які можна використовувати для підвищення експлуатаційних характеристик технологічного устаткування, що експлуатується в умовах статичних та динамічних навантажень. У результаті проведених експериментів та аналізу результатів дослідження можна констатувати наступне.

1. Встановлено, що для формування покриттів з підвищеними показниками адгезійної міцності до епоксидного олігомеру необхідно ввести частки дисульфиду молібдену за вмісту $q = 5 \dots 10$ мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД-20. При цьому адгезійна міцність при відриві композитів становить $\sigma_a = 53,6 \dots 54,5$ МПа, адгезійна міцність при зсуві – $\tau = 15,9 \dots 16,9$ МПа, а залишкові напруження – $\sigma_3 = 1,4 \dots 1,6$ МПа. Водночас при введенні часток мікротальку у кількості $q = 40$ мас.ч. формуються матеріали з такими властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 44,7$ МПа, $\tau = 13,6$ МПа, залишкові напруження – $\sigma_3 = 1,3$ МПа.

2. Слід зазначити, що при розробці захисних покриттів ефективність, надійність і тривалий час експлуатації досягають створенням дво- чи багатошарових композитів. Тому, зважаючи на проведені експериментальні дослідження, доцільно формувати двошарові покриття,

використовуючи обидва досліджені наповнювачі за оптимального вмісту. Тобто, для формування адгезійного шару слід використовувати частки дисульфід молибдену та мікротальк за вмісту $q = 5 \dots 10$ мас.ч. та $q = 40$ мас.ч. відповідно. Враховуючи те, що результати дослідження адгезійної міцності та залишкових напружень добре узгоджуються між собою надалі доцільним і актуальним є проведення випробувань розроблених матеріалів в умовах впливу динамічних навантажень і теплового поля.

Список використаних джерел

1. Липатов Ю.С. Межфазные явления в полимера / Ю.С. Липатов. – К.: Наукова думка. – 1980. – 260 с.
2. Колупаев Б.С. Физико-химия полимеров / Б.С. Колупаев. – Львів: Вища школа». – 1976. – 192 с.
3. Бартепов Г.М. Прочность и механика разрушения полимеров / Г.М. Бартепов. – М.: Химия. – 1984. – 316 с.
4. Бартепов Г.М., Физика и механика полимеров / Г.М. Бартепов, Ю.В. Зеленов. – М.: Высшая школа. – 1983. – 256 с.
5. DiMarzio E., Dynamics of a polymer attached to a surface: bead and spring model / E. DiMarzio, R.Rubin // J. Polym. Sci. – 1978. – V.16(3). – P. 457-466.
6. Букетов А.В. Фізико-хімічні прониеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів: монографія / А.В. Букетов, П.Д. Стухляк, С.М. Кальба. – Тернопіль: Збруч. – 2005. – 182 с.
7. Tanaka H. New type of pattern formation in polymer mixtures caused by competition between phase separation and chemical reaction / H.Tanaka, T.Suzuki, T.Hayashi, T.Nishi // Macromolecules. – 1992. – V.25(17). – P. 4453-4459.
8. Букетов А.В. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням: монографія / А.В. Букетов, П.Д. Стухляк. – Тернопіль: Збруч. – 2009. – 237 с.
9. Колупаев В.С. Релаксационные и термические свойства наполненных полимерных систем / В.С. Колупаев. – Львів: Вища школа. – 1980. – 284 с.
10. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы: Структура, свойства, технология: Учебное пособие / М.Л.Кербер, В.М.Виноградов, Г.С.Головкин.– М: Профессия.– 2008.– 557 с.
11. Мидлман С. Течение полимеров / С. Мидлман. – М.: Мир. – 1971. – 274 с.
12. Стухляк П.Д. Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості: монографія / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, О.І. Редько– Тернопіль: Крок. – 2011. – 165 с.
13. ТУ 48–19–133–90. Молибдена дисульфид.
14. ТУ 5727–001–40705684–2001. Мікротальк.

Стаття надійшла до редакції 04.03.2016.