

## РОЗДІЛ 5

### Розроблення покриттів різного функціонального призначення

Одним із перспективних методів підвищення експлуатаційних характеристик технологічного устаткування в умовах впливу агресивних середовищ є захист поверхонь деталей машин і механізмів полімерними композитними матеріалами (КМ) у вигляді захисних покриттів. Важливими властивостями, які визначають довговічність захисних покриттів, є адгезійна міцність і залишкові напруження. Відомо, що поліпшеними адгезійними властивостями до металевої основи характеризуються покриття, сформовані на основі епоксидного зв'язувача [156]. Водночас такі матеріали відзначаються підвищеними залишковими напруженнями, що призводить до зменшення ресурсу експлуатації технологічного обладнання.

Показано, що поліпшити фізико-механічні властивості КМ можна введенням наповнювачів різної фізичної природи при оптимальному вмісті [159-168]. Крім того, відомо, що поліпшити фізико-хімічну взаємодію на межі поділу фаз “олігомер-наповнювач”, а, отже, і адгезійні та когезійні властивості композитів, можна у результаті модифікування часток дисперсного наповнювача або обробленням композицій (на попередній стадії їх формування) енергетичними полями [169]. Попередньо встановлено, що таке модифікування у комплексі (незалежно часток наповнювача епоксидним олігомером і на наступному етапі – композицій енергетичним полем, зокрема ультрафіолетовим опроміненням) приводить до підвищення когезійної міцності епоксипластів (п.п. 3, 4). Однак, цікавим, з наукової і практичної точки зору, було дослідження впливу природи, дисперсності і вмісту наповнювачів з одного боку, а також способів модифікування порошоків олігомером і композицій енергетичним полем з другого боку на адгезійну міцність і залишкові напруження у розроблених матеріалах.

## 5.1. Дослідження адгезійної міцності і залишкових напружень у модифікованих епоксидних композитах

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

- оксид алюмінію ( $Al_2O_3$ ) (63мкм);
- карбід бору ( $B_4C$ ) (63мкм);
- оксид міді ( $CuO$ ) (63мкм);
- технічний графіт (ТГ) (10...20мкм);
- електрокорунд (ЕК) (10...20мкм);
- коричневий шлам (КШ) (10...20мкм).

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 їх термооброблення при  $T=353\pm 2K$  протягом  $\tau=30\pm 2xв.$  за методикою, наведеною у п.2.3;

- ультрафіолетове опромінення (УФО) суміші модифікованих дисперсних часток наповнювача та олігомерної композиції до введення твердника [152].

Відомо, що експлуатаційні характеристики епоксидних КМ суттєво залежать не лише від фізичної природи і вмісту наповнювача, але й від його дисперсності [170]. Авторами доведено, що дисперсність наповнювача визначає його критичний вміст у зв'язувачі, позаяк зменшення розміру часток зумовлює збільшення його питомої площі поверхні [169, 170]. 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 на попередньому етапі досліджено вплив вмісту наповнювача на адгезійну міцність КМ, наповнених грубодисперсними (63мкм), такими як оксид алюмінію, карбід

бору і оксид міді, та дрібнодисперсними частками (10...20мкм), такими як КШ, ТГ і ЕК. Експериментально встановлено, що адгезійна міцність пластифікованої епоксидної матриці до металевої основи становить  $\sigma_a=35,8\text{МПа}$  (рис. 5.1). Введення у епоксидний зв'язувач дисперсних часток (з дисперсністю 63мкм) забезпечує підвищення адгезійних характеристик КМ до  $\sigma_a=50...62\text{МПа}$ , залежно від фізичної природи наповнювача (рис. 5.1,а). Встановлено діапазон критичного вмісту грубодисперсного наповнювача у матриці, що становить 30...60мас.ч. (тут і далі за текстом масові частки наповнювача подано на 100мас.ч. епоксидної смоли), при якому адгезійна міцність КМ є максимальною (рис. 5.1,а). Показано, що максимальними адгезійними властивостями ( $\sigma_a=61,7\text{МПа}$ ) відзначаються композити, наповнені оксидом алюмінію при оптимальному вмісті 50мас.ч., порівняно з КМ, які містять частки карбіду бору і оксиду міді.

При аналізі результатів дослідження залежності адгезійної міцності від вмісту дрібнодисперсних наповнювачів (10...20мкм) встановлено, що діапазон критичного вмісту дисперсних часток становить 20...40мас.ч. залежно від природи порошків (рис. 5.1,б). При цьому показано, що максимальними адгезійними характеристиками з досліджуваної групи дрібнодисперсних часток відзначаються КМ, наповнені КШ (рис. 5.1,б). Введення такого наповнювача за оптимального вмісту ( $q=30\text{мас.ч.}$ ) забезпечує підвищення адгезійної міцності, порівняно з пластифікованою епоксидною матрицею, з  $\sigma_a=35,8$  до  $\sigma_a=49,7\text{МПа}$ .

Попередньо нами доведено (п.2.3), що модифікування часток наповнювача епоксидним олігомером і наступне УФО композиції на основі пластифікованого епоксидного зв'язувача за встановленими режимами забезпечує поліпшення когезійних властивостей КМ [152]. Експериментально встановлено, що використання способу такого комплексного модифікування забезпечує підвищення адгезійних характеристик КМ незалежно від природи введеного у зв'язувач наповнювача (рис. 5.1). Показано, що попереднє модифікування незалежно наповнювача і композиції у цілому забезпечує підвищення

адгезійної міцності композицій з грубодисперсними порошками (63мкм) (рис. 5.1,а). При цьому введення у зв'язувач модифікованих часток оксиду алюмінію з наступним УФО 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 – 60мас.ч., при якому значення адгезійної міцності є максимальним при використанні вказаних досліджуваних наповнювачів і становить  $\sigma_a=71,1$ МПа. Крім того, встановлено критичний вміст модифікованих епоксидним олігомером дисперсних часток карбїду бору і оксиду міді у зв'язувачі для отримання композитів з високими показниками адгезійної міцності – 40мас.ч. Показано, що введення модифікованих часток  $B_4C$  і  $CuO$  з подальшим УФО композиції при критичному вмісті забезпечує підвищення адгезійної міцності матеріалів з  $\sigma_a=53,8$  до  $\sigma_a=62,4$ МПа і з  $\sigma_a=54,3$  до  $\sigma_a=56,2$ МПа, відповідно (рис. 5.1,а).

Підвищення адгезійної міцності КМ спостерігали також при модифікуванні дрібнодисперсних часток (10...20мкм) КШ, ТГ і ЕК з наступним опроміненням композицій. Встановлено критичний вміст дрібнодисперсних наповнювачів у композиції, який становить 30мас.ч. незалежно від природи порошоків (рис. 5.1,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  $\sigma_a=49,7$  (для КМ з немодифікованими частками) до  $\sigma_a=59,8$ МПа (при  $q=30$ мас.ч.). Введення при тому ж вмісті модифікованих часток ТГ і ЕК не приводить суттєвого підвищення адгезійних характеристик КМ, що зумовлено впливом 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.

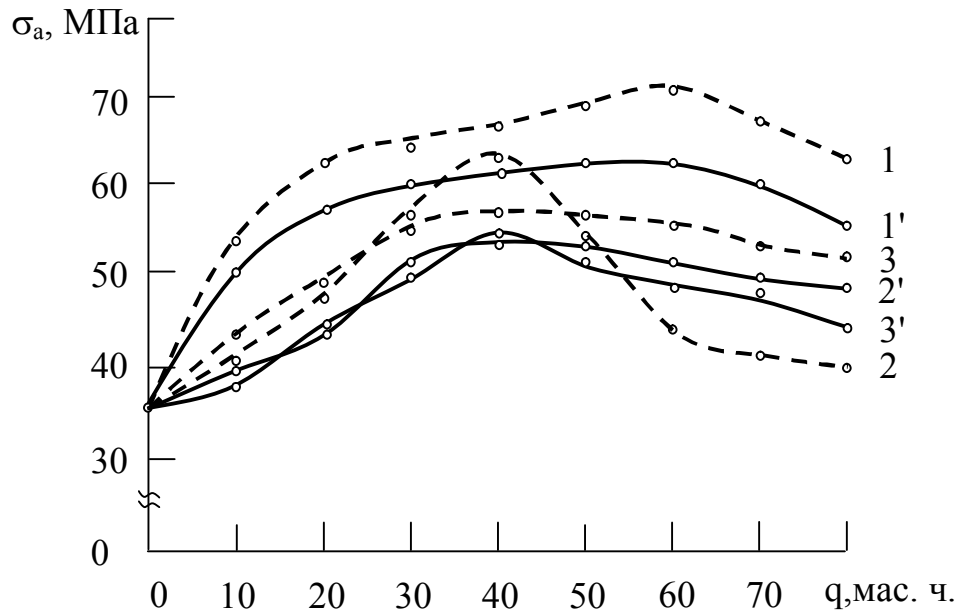


Рис. 5.1,а. Залежність адгезійної міцності КМ від фізичної природи і вмісту наповнювача: 1, 1' – оксид алюмінію; 2, 2' – карбід бору; 3, 3' – оксид міді.

Штриховою лінією позначено опромінені КМ з модифікованим наповнювачем.

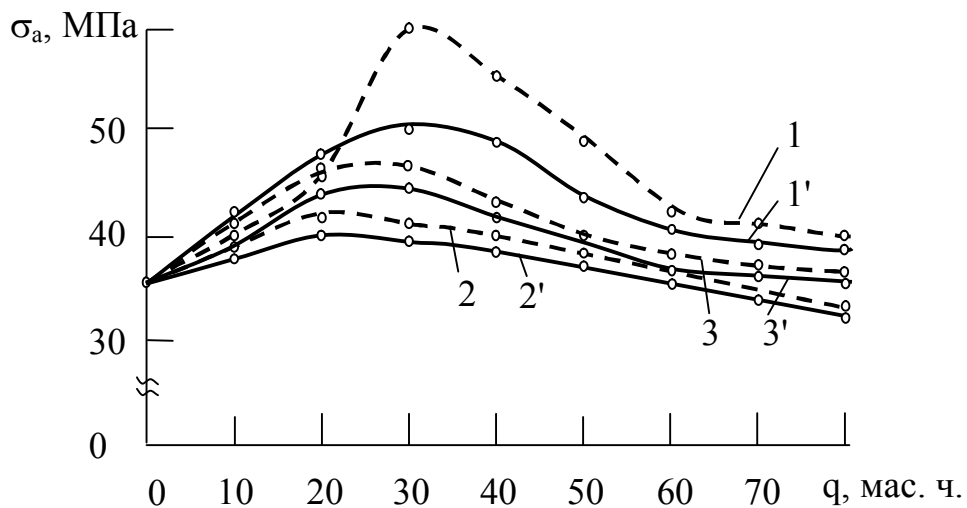


Рис. 5.1,б. Залежність адгезійної міцності КМ від фізичної природи і вмісту наповнювача: 1, 1' – КШ; 2, 2' – ТГ; 3, 3' – ЕК.

Штриховою лінією позначено опромінені КМ з модифікованим наповнювачем.

Поліпшення адгезійних властивостей матеріалів при модифікуванні наповнювачів і композицій у комплексі можна пояснити наступним. Попередньо встановлено, що змочування часток епоксидним олігомером з наступним їх термообробленням за описаними у методиці температурно-часовими режимами забезпечує підвищення реакційної здатності наповнювача (п.2.3). 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 УФО 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 випливає 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 проведено випробування залишкових напружень у вихідних і модифікованих захисних покриттях (рис. 5.2). Зазначимо, що досліджували залишкові напруження у матеріалах:

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

Експериментально встановлено, що абсолютна величина залишкових напружень у пластифікованій епоксидній матриці становить  $\sigma_3=2,7\text{МПа}$ . Після УФО епоксидного зв'язувача значення залишкових напружень у матриці зростає на 18,5% і становить  $\sigma_3=3,2\text{МПа}$ .

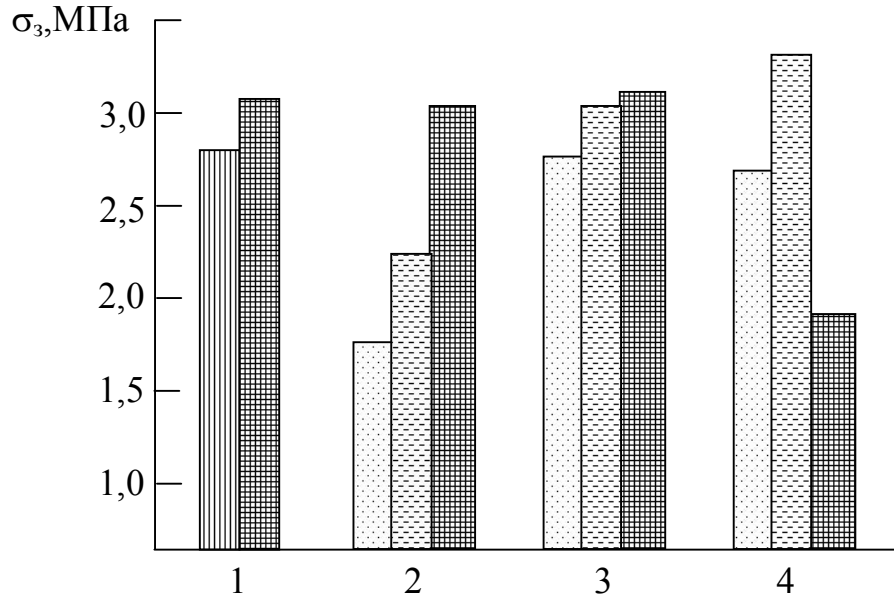


Рис. 5.2,а. Залежність залишкових напружень від природи наповнювача і методу модифікування композицій (вміст наповнювача 80мас.ч. на 100мас.ч. епоксидного олігомера): 1 – епоксидна матриця; 2 – оксид алюмінію; 3 – карбід бору; 4 – оксид міді.

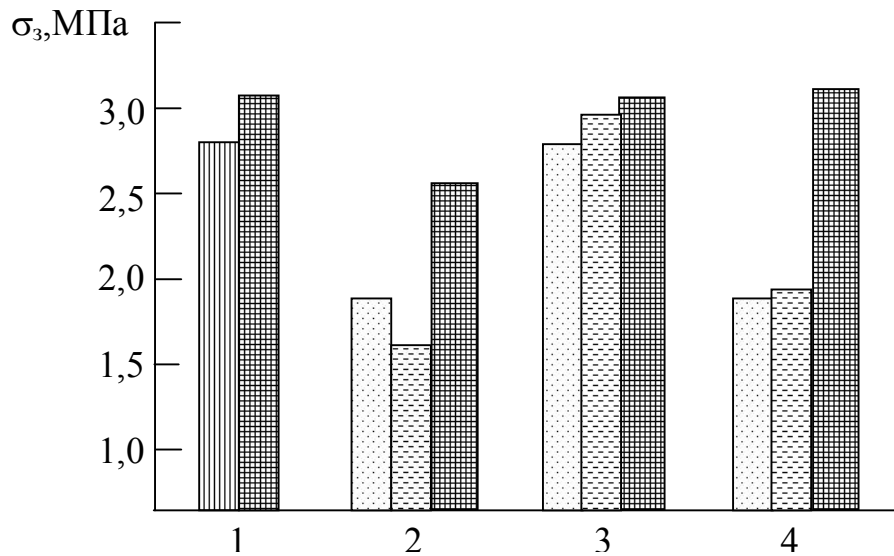






Рис. 5.2,б. Залежність залишкових напружень від природи наповнювача і методу модифікування композицій (вміст наповнювача 80мас.ч. на 100мас.ч. епоксидного олігомера): 1 – епоксидна матриця; 2 – КШ; 3 – ТГ; 4 – ЕК.

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

Внаслідок опромінення збільшується вміст гель-фракції у матриці, зростає кількість фізичних і хімічних зв'язків у об'ємі полімера та 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 КМ встановлено, що введення часток  $Al_2O_3$ , КШ і ЕК забезпечує зменшення  $\sigma_3$  з 2,7 (для вихідної епоксидної матриці) до 1,7...1,9МПа залежно від фізичної природи наповнювача (рис. 5.2). 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  $\sigma_3=2,7$  до  $\sigma_3=2,8$ МПа. Такий ефект зумовлений тим, що при введенні наповнювача у зв'язувач формуються, як було показано вище, ЗПШ з гетерогенною структурою. При цьому геометричні розміри ЗПШ і ступінь зшивання у них суттєво залежать від фізичної природи, дисперсності і критичного вмісту наповнювача у матриці (п.4.3). Отже, прогнозованим введенням наповнювача можна регулювати як адгезійні характеристики, так і залишкові напруження у покриттях, які, в основному, визначають міжремонтний ресурс експлуатації технологічного устаткування.

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. 5.2). Отримані результати добре узгоджуються з результатами дослідження адгезійної міцності КМ. Встановлена кореляція між адгезійною міцністю і залишковими напруженнями: при підвищенні адгезійних характеристик збільшуються залишкові напруження у покриттях. Це свідчить про збільшення ступеня зшивання у ЗПШ матриці внаслідок модифікування дисперсних часток наповнювача.

Додаткове УФО композицій 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  $\sigma_3=3,4$  до  $\sigma_3=1,9$ МПа. На наш погляд це зумовлено тим, що при введенні модифікованих часток CuO з наступним УФО композиції формується матеріал з дислокаціями, внаслідок чого зменшується величина залишкових напружень і адгезійна міцність (при вмісті наповнювача  $q=80$ мас.ч.).

Отже, можна вважати, що модифікування у комплексі як часток наповнювача епоксидним олігомером, так і композицій УФО у 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 дослідження методом електронної мікроскопії 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. 5.3,а). Введення у зв'язувач часток оксиду алюмінію забезпечує утворення КМ, на фрактограмах зламу якого відмічено утворення структури з рівномірно розподіленими частками наповнювача (рис. 5.3,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 попередніх досліджень (рис. 5.2,а). Введення у зв'язувач модифікованого наповнювача сприяє зростанню значення залишкових напружень, про що свідчить утворення раковин на фрактограмах зламу епоксикомпозитів (рис. 5.3,в). Результати аналізу фрактограм

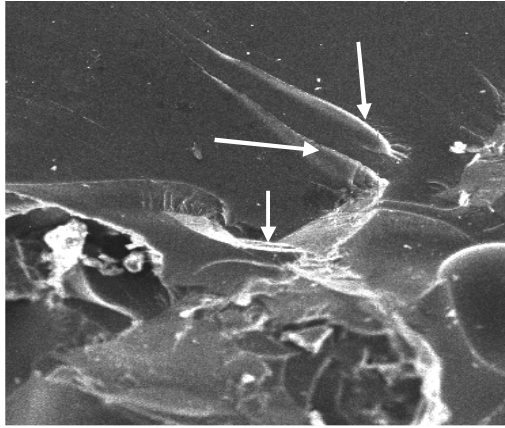
зламу композиту з модифікованими частками оксиду алюмінію після УФО дозволяють констатувати про підвищення когезійної міцності систем (про що свідчить утворення структури матеріалу з рівномірним розподілом наповнювача у об'ємі матриці), які водночас відзначаються значними залишковими напруженнями (рис. 5.3,г). Отже доведено, що спосіб модифікування КМ, який охоплює незалежно етап модифікування часток наповнювача і етап УФО композицій забезпечує підвищення адгезійних характеристик з одночасним зростанням залишкових напружень у матеріалах. На основі результатів дослідження впливу фізичної природи, дисперсності та вмісту наповнювачів, а також режимів модифікування композицій, на адгезійну міцність і залишкові напруження у композитах можна зробити такі висновки.

Введення у епоксидний зв'язувач дисперсних часток (з дисперсністю 63мкм) забезпечує підвищення адгезійних характеристик матеріалів з  $\sigma_a=35,8$  до  $\sigma_a=50\dots62$ МПа, залежно від фізичної природи наповнювача. Встановлено діапазон критичного вмісту грубодисперсного наповнювача у матриці, що становить 30...60мас.ч., при якому адгезійна міцність композитів є максимальною. Показано, що максимальними адгезійними властивостями ( $\sigma_a=61,7$ МПа) відзначаються композити, наповнені оксидом алюмінію при оптимальному вмісті 50мас.ч., порівняно з матеріалами, які містять частки карбїду бору і оксиду міді.

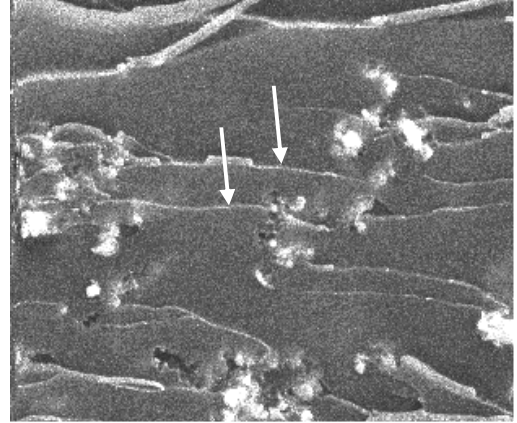
Введення у зв'язувач модифікованих часток оксиду алюмінію з наступним УФО композиції забезпечує підвищення адгезійної міцності матеріалів на 8...16% залежно від вмісту порошку, порівняно з немодифікованими композитами. Встановлено оптимальний вміст модифікованого епоксидним олігомером оксиду алюмінію у композиції – 60мас.ч. на 100мас.ч. епоксидної смоли ЕД-20, при якому значення адгезійної міцності є максимальним і становить  $\sigma_a=71,1$ МПа.

Встановлено, що максимальними адгезійними характеристиками (з досліджуваної групи матеріалів, які містять частки з дисперсністю 10...20мкм) відзначаються КМ, наповнені коричневим шламом. Введення такого наповнювача за

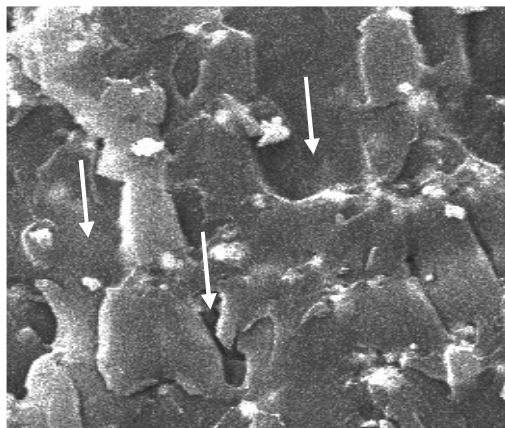
оптимального вмісту ( $q=30$ мас.ч.) забезпечує підвищення адгезійної міцності, порівняно з пластифікованою епоксидною матрицею, з  $\sigma_a=35,8$  до  $\sigma_a=49,7$ МПа.



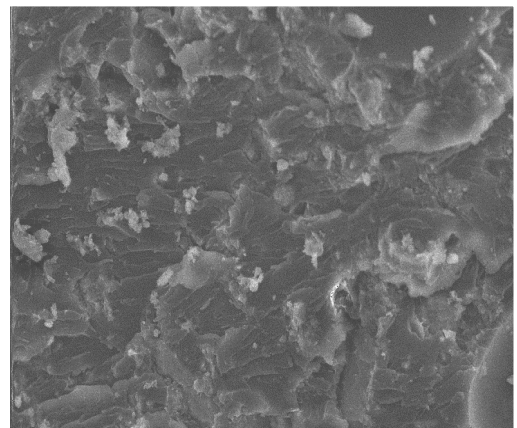
а)



б)



в)



г)

Рис. 5.3. 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.

Встановлено критичний вміст дрібнодисперсних наповнювачів у композиції, який становить 30мас.ч. незалежно від природи порошків. Показано, що максимальне підвищення адгезійної міцності спостерігали при введенні у зв'язувач модифікованих часток КШ. Подальше опромінення композицій забезпечує зростання адгезійних властивостей композитів з

$\sigma_a=49,7$  (для КМ з немодифікованими частками) до  $\sigma_a=59,8$  МПа при  $q=30$  мас.ч.

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 УФО композицій підвищує густину зшивання матриці у ЗПШ, а також приводить до збільшення їх об'єму у полімері, внаслідок чого поліпшуються адгезійні властивості матеріалів. Доведено, що додаткове УФО композицій, наповнених модифікованими частками, забезпечує підвищення ступеня зшивання матриці у ЗПШ, про що свідчить підвищення абсолютного значення залишкових напружень, порівняно з матеріалами, що містять лише модифікований наповнювач на 6...72%, залежно від фізичної природи дисперсних часток.

## **5.2. Оптимізація складу інгредієнтів адгезійного шару для епоксикомпозитних багат шарових покриттів**

Відомо, що КМ на полімерній основі широко використовують для формування захисних покриттів різного функціонального призначення з метою підвищення експлуатаційних характеристик технологічного обладнання [169]. При цьому епоксидні композитні покриття характеризуються поліпшеними фізико-механічними, діелектричними і теплофізичними властивостями, і мають підвищені показники корозійної тривкості і стійкості до спрацювання [20, 26, 51, 53]. Однак, зазначимо, що на сьогодні є невирішеною проблема створення КМ і захисних покриттів на їх основі, які б відзначались підвищеними показниками комплексу експлуатаційних характеристик. Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є створення багат шарових покриттів. У них кожен шар виконує

свої певні функціональні навантаження. Наприклад, зовнішній шар відзначається зносостійкістю, проміжний – демпфуючими характеристиками, шар біля основи (поверхня деталі, яка повинна бути захищеною) – адгезійними характеристиками. Низькі адгезійні характеристики таких багат шарових покриттів призведуть до їх відшарування під час експлуатації виробу, що знизить надійність роботи усього агрегату або вузла. У цьому плані актуальним є розроблення і оптимізація складу інгредієнтів адгезійного шару покриття, що призначений для підвищення взаємодії на межі поділу фаз “захисне покриття – металева основа”.

Авторами показано, що підвищення адгезійної міцності на межі поділу фаз “захисне покриття – металева основа” досягають шляхом виконання тонкого проміжного шару полімера, що значно посилює взаємодію між полярними групами адгезиву та субстрату [171]. Відомо, що адгезійна взаємодія поліпшується при введенні у зв’язувач наповнювачів, у тому числі і дисперсних [170]. Однак, дослідженню впливу дисперсних наповнювачів різної фізичної природи на властивості адгезійного шару на сьогодні приділено не достатньо уваги. Крім того, слід зауважити, що картина експлуатаційних характеристик з точки зору адгезійної міцності покриттів буде не зовсім повною без дослідження залишкових напружень у матеріалах. У зв’язку з цим, важливим, з наукової і практичної точки зору, є встановлення закономірностей прогнозованого регулювання адгезійних властивостей і залишкових напружень у КП за рахунок введення наповнювачів різної фізичної природи.

При формуванні адгезійного шару для захисних покриттів з підвищеними показниками адгезійної і когезійної міцності як основний наповнювач використано частки  $Al_2O_3$ ,  $B_4C$  і  $CuO$  з дисперсністю 63мкм, а як додатковий наповнювач – частки КШ з дисперсністю 10...20мкм.

Виходячи з попередніх результатів дослідження впливу природи, дисперсності і вмісту наповнювачів на адгезійні характеристики і залишкові напруження у КМ (п. 5.1) вибрано такі варіанти формування адгезійного шару для покриттів:

- епоксидний зв'язувач + оксид алюмінію + коричневий шлам;

- епоксидний зв'язувач + карбід бору + коричневий шлам;

- епоксидний зв'язувач + оксид міді + коричневий шлам.

Методом багатофакторного планування експерименту оптимізовано технологічні режими формування і вміст інгредієнтів адгезійного шару. При виборі керованих факторів враховували фізичну природу і діапазон критичного вмісту основного та додаткового наповнювача у пластифікованому епоксидному зв'язувачі (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Фактори та рівні варіювання

№ п/п	Фактори	Позначення	Рівні варіювання		
1	Вид основного наповнювача	$X_1$	$Al_2O_3$	$B_4C$	$CuO$
2	Вміст основного наповнювача, q, мас.ч.	$X_2$	20...60		
3	Вміст додаткового наповнювача (КШ), q, мас.ч.	$X_3$	20...40		

Для вибраного числа факторів та рівнів варіювання побудовано план експерименту. Його представлено у вигляді робочої частини матриці (табл. 5.2). Абсолютні значення адгезійної міцності і залишкових напружень, залежно від природи і вмісту основного та додаткового наповнювачів, вибрано критеріями оптимізації складу інгредієнтів адгезійного шару згідно з планом експерименту. Результати проведених експериментальних досліджень наведено у табл. 5.3.

Таблиця 5.2

## План експерименту

№п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	40
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	20
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	30
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	40
5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	20
6	B <sub>4</sub> C	20	40
7	B <sub>4</sub> C	40	20
8	B <sub>4</sub> C	40	30
9	B <sub>4</sub> C	40	40
10	B <sub>4</sub> C	60	20
11	CuO	20	40
12	CuO	40	20
13	CuO	40	30
14	CuO	40	40
15	CuO	60	20

Аналіз результатів дослідження показав, що з кожної вибраної групи матеріалів найкращі характеристики адгезійної міцності мають композити, які містять, мас.ч.: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (40) + КШ (30) ( $\sigma_a=75,5\dots76,3$ МПа); B<sub>4</sub>C (40) + КШ (20) ( $\sigma_a=71,2\dots72,1$ МПа) і CuO (40) + КШ (20) ( $\sigma_a=60,0\dots62,7$ МПа). Тобто доведено, що введення у матрицю як основного наповнювача часток оксиду алюмінію або карбиду бору, при одночасному введенні коричневого шламу за критичного вмісту наповнювача, приводить до поліпшення адгезійної

міцності матеріалів. Водночас введення у комплексі часток оксиду міді і коричневого шламу не забезпечує суттєвого поліпшення адгезійної міцності матеріалів. Зміна показників  $\sigma_a$  знаходиться у межах похибки експерименту.

На наступному етапі досліджено залишкові напруження у матеріалах, що містять модифіковані наповнювачі різної дисперсності і при різному вмісті у зв'язувачі (табл. 5.3). Порівняльний аналіз результатів дослідження впливу вмісту і природи полідисперсного наповнювача на адгезійну міцність і залишкові напруження дозволяє стверджувати, що отримані характеристики корелюють між собою. При збільшенні адгезійної міцності КМ, залишкові напруження у матеріалах, в основному, також зростають. Водночас зауважимо, що з усього спектру досліджуваних матеріалів найбільшими значеннями залишкових напружень характеризуються КМ, наповнені частками  $\text{CuO}$  і КШ. Для таких матеріалів значення залишкових напружень становлять  $\sigma_3=3,0\dots3,7\text{МПа}$  залежно від вмісту дисперсних часток. Навпаки, введення у комплексі часток ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{КШ}$ ) або ( $\text{B}_4\text{C} + \text{КШ}$ ) забезпечує утворення композитів, які мають залишкові напруження, абсолютні значення яких знаходяться у межах  $\sigma_3=2,4\dots3,5\text{МПа}$  залежно від вмісту дисперсних часток. Це свідчить про те, що наповнення зв'язувача модифікованими олігомером частками приводить до формування адгезійного шару з поліпшеними не лише адгезійними, але й когезійними властивостями. При цьому, аналізуючи отримані результати, можна констатувати, що оптимальним двокомпонентним наповнювачем для адгезійного шару є частки оксиду алюмінію (40мас.ч) з дисперсністю 63мкм і коричневого шламу (30мас.ч) з дисперсністю 10...20мкм. Введення такого комплексного наповнювача у зв'язувач забезпечує формування адгезійного шару з максимальними значеннями адгезійної міцності ( $\sigma_a=75,5\dots76,3\text{МПа}$ ) серед вибраного спектру досліджуваних матеріалів, і незначними показниками залишкових напружень ( $\sigma_3=2,5\dots2,7\text{МПа}$ ).



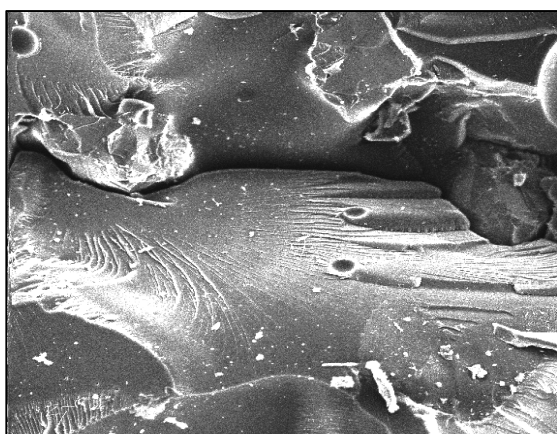
Таблиця 5.3

Результати експериментальних досліджень

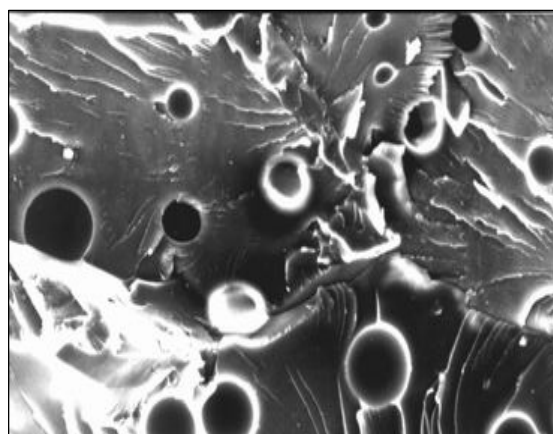
№п/п	Адгезійна міцність, $\sigma_a$ , МПа		Залишкові напруження, $\sigma_3$ , МПа	
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_1$	$Y_2$
1	75,3	74,1	3,0	2,8
2	63,8	63,0	2,8	2,7
3	76,3	75,5	2,7	2,5
4	72,1	70,4	2,8	2,7
5	67,4	65,3	2,8	2,6
6	65,9	64,7	3,4	3,3
7	72,1	71,2	3,5	3,3
8	65,9	64,3	3,3	3,2
9	61,2	60,1	2,6	2,4
10	68,0	66,4	3,2	3,0
11	59,6	58,8	3,7	3,6
12	62,7	60,0	3,6	3,5
13	60,6	58,6	3,3	3,1
14	52,3	50,4	3,5	3,4
15	60,6	58,5	3,1	3,0

Методом електронної мікроскопії досліджено фрактограми зламу композитів, що містять у комплексі наповнювачі різної фізичної природи, дисперсності і вмісту. Зауважимо, що при формуванні композитів частки попередньо модифікували епоксидним олігомером з наступним гідродинамічним суміщенням компонентів, після чого її обробляли УФО. Показано,

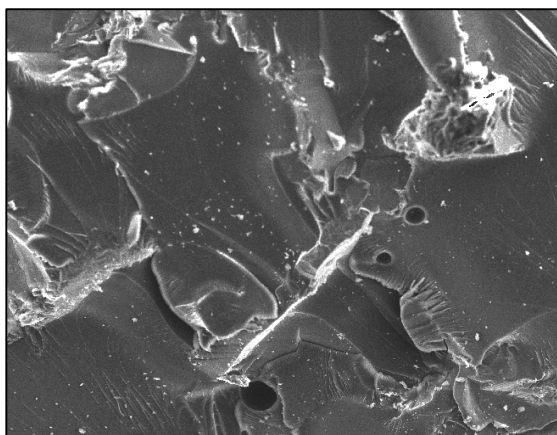
що введення часток оксиду міді і КШ призводить до формування композиту, який відзначається гетерогенною структурою безпосередньо самої матриці (рис. 5.4,а). Зокрема доведено, що руйнування відбувається у об'ємі матриці, при цьому матеріал характеризується ділянками сколювання. Це є свідченням значних залишкових напружень у сформованій системі, що підтверджує наведені вище результати дослідження (табл. 5.3).



а)



б)



в)

Рис. 5.4. Фрактограми зламу КМ, наповнених (x750):

- а)  $\text{CuO} + \text{КШ}$ ;
- б)  $\text{B}_4\text{C} + \text{КШ}$ ;
- в)  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{КШ}$ .

Водночас зазначимо, що КМ, наповнені частками карбїду бору і КШ або оксиду алюмінію і КШ, також характеризуються значними напруженнями, про що свідчать фрактограми зламу композитів з такими наповнювачами (рис. 5.4, б, в). Однак, на світлинах зламу КМ, наповнених частками ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{КШ}$ ) не спостерїгали різких областей розмежування у матриці, порівняно з фрактограмами зламу композитів, наповнених

частками ( $V_4C + KШ$ ). Це дозволяє стверджувати не лише про невисокі значення залишкових напружень у КМ з частками оксиду алюмінію і коричневого шламу, але й про підвищені когезійні характеристики таких матеріалів. На наш погляд, інтенсивна міграція дипольних сегментів та ланцюгів макромолекул олігомерного зв'язувача при структуроутворенні КМ, внаслідок модифікування часток епоксидним олігомером і наступним УФО композицій, зумовлює покращення взаємодії полімерних ланцюгів у областях навколо наповнювача і поліпшення когезійних властивостей досліджуваних систем.

При поясненні результатів дослідження фізико-механічних властивостей КМ слід враховувати явище вибіркової адсорбції компонентів зв'язувача [172]. Молекули епоксидно-діанової смоли, які мають епоксидні та гідроксильні функціональні групи, взаємодіють з активними центрами на поверхні дисперсних наповнювачів. У результаті такої взаємодії утворюються фізичні зв'язки, за рахунок дії кулонівських сил та сил Ван-дер-Ваальса, і хімічні зв'язки, внаслідок хімічної взаємодії. Дані припущення підтверджено результатами дослідження методом ІЧ-спектроскопії. Встановлено, що в ІЧ-спектрах полімеркомпозитів з наповнювачами  $Al_2O_3$  і КШ спостерігається зміщення смуги поглинання гідроксильної групи при частоті  $3760\text{cm}^{-1}$  на  $20\text{cm}^{-1}$  та зменшення її інтенсивності відносно полімерної матриці, що свідчить про конверсію реакційноздатних гідроксильних груп внаслідок виникнення водневих зв'язків з поверхнею наповнювачів. Крім того, встановлено, що у присутності наповнювачів відбувається розкриття епоксидного циклу та утворення карбонільної групи, коливання якої виявлено при частоті  $1700\text{cm}^{-1}$ . Зміщення частоти коливань даної групи, а також групи  $-CH_2-$  на  $10...30\text{cm}^{-1}$  у низькочастотну область дозволяє констатувати, що комплексоутворення охоплює подвійний зв'язок. На відміну від КМ з іншими наповнювачами у матеріалах з оксидом алюмінію і КШ в утворенні зв'язків із поверхнею часток беруть участь групи  $-NH-$  і  $\equiv C-N=$ . Підтвердженням цьому є зміщення смуг поглинання при частотах  $1515\text{cm}^{-1}$  та  $1610\text{cm}^{-1}$  відповідно на  $10...20\text{cm}^{-1}$ . Отже, введення реакційно

активних і модифікованих епоксидним олігомером наповнювачів  $Al_2O_3$  і КШ приводить до підвищення адсорбції зв'язувача до наповнювача, внаслідок чого покращується взаємодія на межі поділу фаз. Додатково формуються зв'язки між макромолекулами зв'язувача за рахунок рекомбінації радикалів, що утворились внаслідок УФО, і активними центрами на поверхні основи. Це дозволяє стверджувати, що введення модифікованих часток у зв'язувач з наступним УФО композицій забезпечує водночас підвищення когезійних і адгезійних характеристик захисних покриттів.

На основі отриманих експериментальних результатів встановлено можливість значного поліпшення фізико-механічних властивостей покриттів за рахунок використання адгезійного шару при оптимальному вмісті інгредієнтів у системі і за оптимальної товщини адгезійного шару, яка становить 10...150мкм [173]. У зв'язку з цим, важливим було проведення дослідження з метою визначення оптимальної товщини шару, що забезпечує максимальні показники адгезійної міцності покриття до металевої основи та невисокі значення залишкових напружень. Встановлено, що суттєве підвищення адгезійної міцності та зменшення залишкових напружень розтягу спостерігали при оптимальній товщині адгезійного шару –  $h=70...80$ мкм [174]. При зменшенні товщини адгезійного шару композит втрачає свої адгезійні властивості, а залишкові напруження близькі за значеннями до напружень КМ, отриманих без шару. У покриттях, товщина яких більша від  $h=80$ мкм, седиментація дисперсного наповнювача призводить до погіршення тиксотропних властивостей композитів, що позначається на їх когезійній міцності.

Отже, виявлено можливості регулювання адгезійних властивостей і залишкових напружень у захисних покриттях шляхом формування адгезійного шару на основі опроміненої ультрафіолетом композиції, що містить пластифікований епоксидний зв'язувач і модифіковані дисперсні наповнювачі. На основі результатів дослідження матеріалів методом електронної мікроскопії, ІЧ-спектроскопії та математичного планування експерименту доведено підвищення показників

адгезійної міцності і зниження залишкових напружень у покриттях. Цього досягали модифікуванням епоксидним олігомером дисперсних часток з подальшим УФО композицій. Встановлено, що найвищими показниками адгезійної міцності ( $\sigma_a=75,5\dots76,3\text{МПа}$ ) і незначними залишковими напруженнями ( $\sigma_3=2,5\dots2,7\text{МПа}$ ) характеризуються покриття, наповнені частками оксиду алюмінію (40мас.ч.) з дисперсністю 63мкм і коричневого шламу (30мас.ч.) з дисперсністю 10...20мкм.

### **5.3. Дослідження повзучості у агресивних середовищах епоксикомпозитів з безперервними волокнами і модифікованим дисперсним наповнювачем**

Однією з найважливіших фізико-механічних властивостей епоксидних КМ є повзучість в умовах впливу статичних та динамічних навантажень у процесі експлуатації технологічного устаткування під дією агресивних середовищ. Слід зазначити, що повзучість у процесі експлуатації матеріалів є наслідком погіршення таких основних фізико-механічних властивостей КМ як модуля пружності і руйнівного напруження при розтягу, стиску, згинанні та крученні, ударної в'язкості, циклічної і когезійної міцності. Найсуттєвіше повзучість матеріалів зростає під час їх експлуатації в умовах впливу агресивних середовищ. Встановлено, що поліпшити вказані вище властивості матеріалів і, як наслідок, зменшити їх повзучість в умовах впливу статичних та циклічних навантажень, градієнту температур можна за рахунок використання епоксидних композитних "гібридних" матеріалів, які містять неперервні волокна різної фізичної природи та тканин на їх основі [65]. При формуванні композитів з підвищеними показниками фізико-механічних властивостей найчастіше використовують "гібридні" КМ, у яких регулярно чергуються волокна у одному шарі матеріалу або кожен шар композиту сформовано при вмісті тканин різного типу. Зазначимо, що при формуванні таких композитів і захисних покриттів на їх основі найчастіше використовують скляні, базальтові, вуглецеві, борні та металеві волокна або тканини.

Важливим при формуванні таких матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками, у тому числі і з невисокими показниками повзучості, є вибір олігомерного зв'язувача. Встановлено, що використання епоксидної матриці забезпечує поліпшення адгезійних та когезійних властивостей КМ, які, в основному, визначають експлуатаційні характеристики при довготривалій експлуатації покриттів [160]. Встановлено, що для поліпшення когезійної міцності у зв'язувач необхідно додатково вводити дисперсні наповнювачі, які попередньо модифікують епоксидним олігомером [20]. Таке модифікування поверхні наповнювача збільшує його взаємодію з макромолекулами олігомерного зв'язувача. У подальшому оброблення епоксидних композицій з модифікованими частками зовнішніми енергетичними полями, у тому числі і УФО, забезпечує утворення активних радикалів у олігомері, що поліпшує взаємодію на межі поділу фаз біля поверхні наповнювача. При цьому формують матеріал з поліпшеними когезійними властивостями, який доцільно використовувати як проміжний шар між тканинами для різного типу у “гібридних” КМ. Це дозволить зменшити повзучість композитів при їх експлуатації в агресивних середовищах.

Отже, при формуванні двошарових покриттів важливим є виконання одного шару, що знаходиться ближче до основи з демпфуючими та релаксаційними характеристиками. Зовнішній шар у цьому випадку може нести інше функціональне навантаження: корозійну тривкість, зносостійкість, температуро- чи теплопровідність і т.д. Виходячи з результатів дослідження фізико-механічних властивостей КМ (розділи 3, 4) і процесів структуроутворення матеріалів, що містять частки різної фізичної природи (п.п. 4.1, 4.2), для поліпшення експлуатаційних характеристик композитів у зв'язувач вводили наповнювачі: коричневий шлам (КШ) і оксид міді (80мас.ч. на 100мас.ч. епоксидної смоли) з дисперсністю 63мкм.

Повзучість епоксикомпозитів досліджували у агресивних середовищах – дощовий розчин і “нафта-сирець”. Крім того, за результатами попередніх досліджень впливу природи модифікованого епоксидним олігомером дисперсного наповнювача і УФО композицій на швидкість та ступінь

структурування КМ, які містять волокна, встановлено, що при використанні скляних волокон для отримання матеріалів з підвищеними показниками когезійної міцності у епоксидну композицію необхідно вводити частки КШ (п. 4.1). Аналогічно, при використанні базальтових волокон у епоксидну композицію необхідно вводити частки оксиду міді (п. 4.2). У роботі досліджували повзучість в умовах впливу агресивних середовищ “гібридних” епоксидних композитів, сформованих за такими варіантами:

I – композит на основі скляної тканини і епоксидної матриці;

II – композит на основі базальтової тканини і епоксидної матриці;

III – композит на основі скляної тканини і композиції, що містить частки КШ;

IV – композит на основі скляної та базальтової тканини і композиції, що містить частки оксиду міді;

V – композит на основі базальтової тканини і композиції, що містить частки оксиду міді;

VI – композит на основі скляної та базальтової тканини і композиції, що містить частки КШ.

Повзучість композитів досліджували на зразках, що містять два шари окремо вибраних тканин, між якими вводили епоксидну композицію з дисперсними наповнювачем. Зразки формували під пресом із силою навантаження  $F=60\text{H}$  протягом часу  $\tau=72\text{год}$  при температурі  $T=293\pm 2\text{K}$ . Параметри зразків: довжина  $l=120\text{мм}$ , ширина  $b=15\text{мм}$ , висота  $h=0,1\dots 0,2\text{мм}$ . Схему формування зразків для дослідження повзучості матеріалів наведено на рис. 5.5.

При дослідженні повзучості КМ використовували стандартну методику на згинання згідно з ГОСТ 4648-71 при експериментально встановленому статичному навантаженні  $F=2\text{H}$  [114]. Схему пристрою для дослідження повзучості матеріалів наведено на рис. 5.6. Зазначимо, що досліджували матеріали протягом часу  $\tau=72\text{год}$ , при цьому визначали абсолютне значення прогину зразка під навантаженням у конкретно визначені моменти часу.

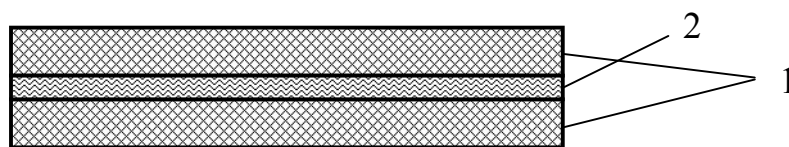


Рис. 5.5. Схема формування зразків для дослідження повзучості матеріалів: 1 – скляна або базальтова тканина; 2 – епоксидна матриця або опромінений композит з модифікованими частками наповнювача.

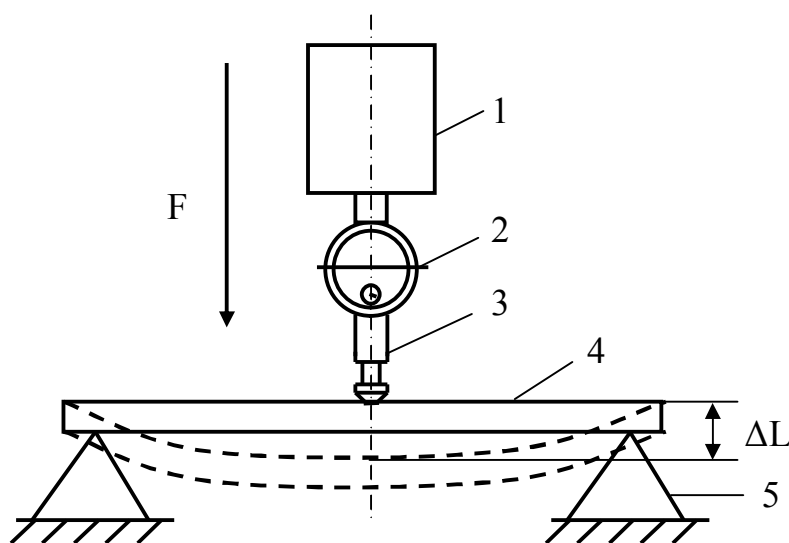


Рис. 5.6. Схема пристрою для дослідження повзучості матеріалів: 1 – несучий вантаж; 2 – індикатор; 3 – ідентор; 4 – зразок; 5 – опора.

Відносну деформацію зразків визначали, враховуючи початкове і кінцеве (або проміжне) значення прогину зразка, за формулою:

$$\varepsilon = \frac{l_k - l_n}{l_k} \cdot 100\%$$

де:

$l_n$  – абсолютне значення прогину зразка після навантаження на початку дослідження;

$l_k$  – абсолютне значення прогину зразка після навантаження у кінці (або на проміжному етапі) дослідження.

Швидкість повзучості визначали за формулою:



$$V_n = \frac{\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)}{t_2 - t_1},$$

де:

$\varepsilon(t_2), \varepsilon(t_1)$  – відносна деформація матеріалів у моменти часу  $t_1$  і  $t_2$ , відповідно.

Модуль повзучості визначали за формулою:

$$E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)},$$

де:

$\sigma$  – напруження, що діють на дослідний зразок.

Здатність до повзучості визначали за формулою:

$$j_n = \frac{1}{E_n}.$$

Показник відновлення після повзучості визначали за формулою:

$$R = \frac{l_k - l(t)}{l_k - l_n} \cdot 100\%,$$

де:

$l(t)$  – абсолютне значення прогину зразка у момент часу  $t$ .

На першому етапі досліджували повзучість КМ у дощовому розчині. Експериментально встановлено, що прогин зразків, які містять лише скляну тканину та ненаповнену пластифіковану епоксидну матрицю, на початку дослідження становить  $L_{\pi}=1,18 \cdot 10^{-3}$  м (рис. 5.7, табл. 5.4). Для КМ, сформованих на основі базальтової тканини і ненаповненої пластифікованої епоксидної матриці, початковий прогин становить  $L_{\pi}=1,03 \cdot 10^{-3}$  м. Наповнення епоксидної композиції дисперсними частками КШ і  $\text{CuO}$ , а також формування “гібридних” композитів, які одночасно містять скляну та базальтову тканини, забезпечує зменшення початкового про-

гину зразків на 26...60%, залежно від природи дисперсних часток і виду тканини. Зазначимо, що найменшим прогином зразків ( $L_{п}=0,42 \cdot 10^{-3}$  м) на початку дослідження в умовах впливу агресивного середовища дощового розчину характеризуються “гібридні” матеріали, сформовані за варіантом VI (композити на основі скляної та базальтової тканини і композиції, що містить частки КШ). Це свідчить про підвищені показники модуля пружності і когезійної міцності таких КМ, порівняно з іншими досліджуваними матеріалами. У першу чергу це зумовлено поліпшенням властивостей матеріалів внаслідок використання шарів з тканин різного виду: скляної і базальтової. С.Чемісом і Р.Ларком доведено, що формування міжшарових “гібридних” матеріалів, тобто таких, які містять шари з тканин або волокон різної природи, зумовлює значне підвищення модуля пружності і міцності КМ за рахунок синергічного ефекту [175]. Наявність такого ефекту пояснюють збільшенням жорсткості шарів композитів, особливо віддалених від осьової площини матеріалу. Такий ефект зумовлений зміною перебігу фізичних процесів при структуроутворенні матеріалів, наповнених тканинами різної природи. Зокрема доведено, що внаслідок модифікування наповнювача та подальшого УФО композицій поліпшується взаємодія макромолекул зв’язувача і активних радикалів, які утворились у об’ємі олігомера в результаті опромінення, не лише з активними центрами на поверхні дисперсного наповнювача, але й з активними центрами на поверхні волокон [111]. У цьому аспекті цікавим, з практичної точки зору, є наповнення матеріалів тканинами різної природи. Результати дослідження структури базальтових волокон методом ІЧ-спектроскопії показали, що матеріал поверхневих шарів волокон характеризується значною концентрацією катіонів Me чи  $Al^{3+}$  [48]. Для скляних волокон спостерігали зворотній ефект – вміст катіонів металів на поверхні доволі низький. Це свідчить про різний механізм взаємодії скляних і базальтових волокон з макромолекулами та радикалами епоксидного зв’язувача. При використанні базальтових волокон у взаємодії з ланцюгами макромолекул і радикалами, в основному, беруть участь катіони металів. При використанні скляних волокон, в основному,

взаємодія визначається рекомбінацією катіонів  $Al^{3+}$  з молекулами кисню ланцюга макромолекул чи радикалів епоксидного олігомера.

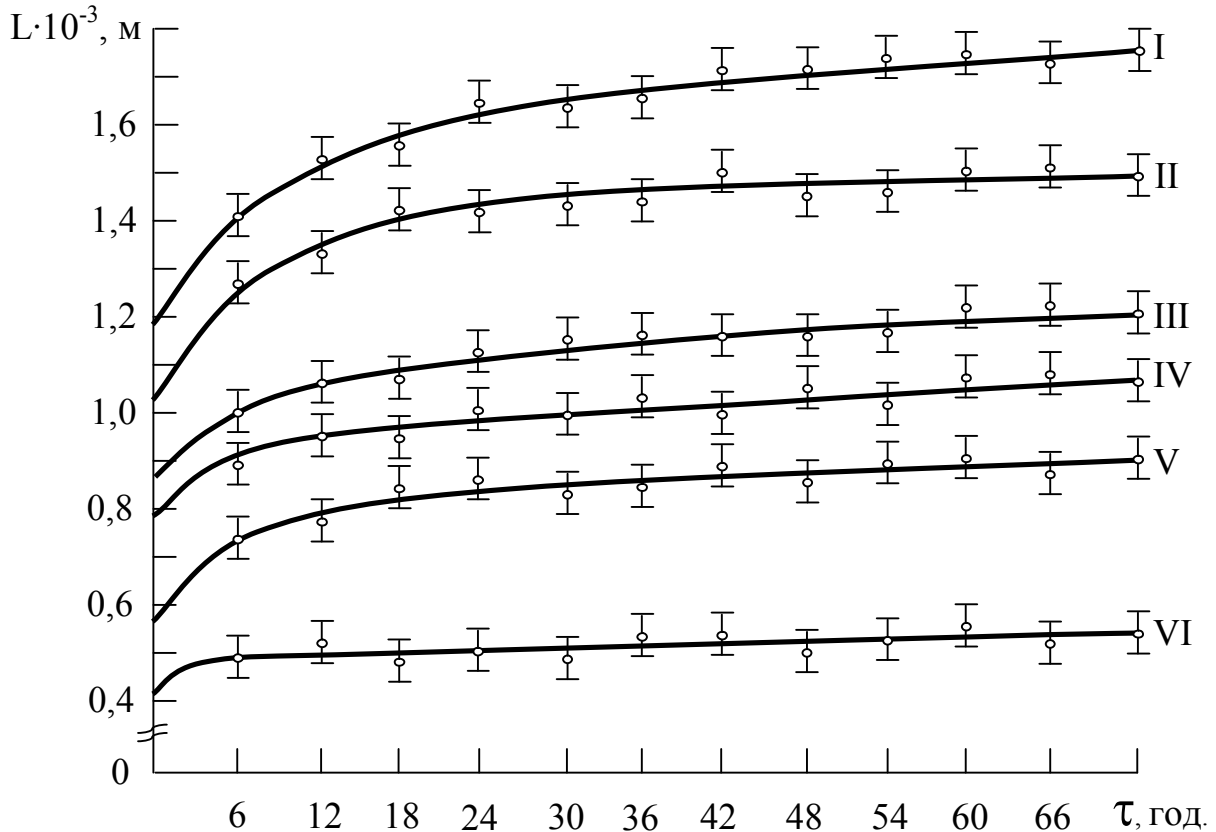


Рис. 5.5. Залежність абсолютної деформації від тривалості впливу статичного навантаження ( $F=2H$ ) у сформованих на основі скляної та базальтової тканини КМ, що містять 80мас.ч. дисперсного наповнювача на 100мас.ч. епоксидної смоли в умовах впливу агресивного середовища (дощовий розчин) (I...VI – варіанти формування покриттів).

Отже, наповнення КМ тканинами різної природи приводить до активації і перебігу фізико-хімічних процесів різної природи. Це, у свою чергу, збільшує міжфазову взаємодію, що приводить до синергічного ефекту у підвищенні когезійної міцності епоксикомпозитів. Додатково І.Калніном показано, що модуль пружності композитів суттєво змінюється не лише від вмісту шарів у матеріалі, але й від черговості взаємного розміщення шарів у композиті [176]. Враховуючи наведені положення, а також, виходячи з результатів

дослідження впливу природи тканин на експлуатаційні характеристики матеріалів [177], зовнішній шар формували на основі базальтової тканини (варіанти V і VI).

Таблиця 5.4

Вплив виду тканини і модифікованого дисперсного наповнювача на повзучість оброблених УФО композитів в умовах впливу агресивного середовища (дощовий розчин)

Варіанти формування композитів	Абсолютне значення прогину зразка після початкового навантаження, $L_p \cdot 10^{-3} \text{ м}$	Відносна деформація, $\varepsilon$ , %	Швидкість повзучості, $V_p \cdot 10^{-3}$ , %/год	Модуль повзучості, $E_p(t) \cdot 10^3$	Здатність до повзучості, $J_p(t) \cdot 10^{-6}$	Показник відновлення після повзучості, $R$ , %
I	1,18	48,1	6,7	270	3,7	12,3
II	1,03	42,7	5,9	304	3,3	14,1
III	0,87	31,0	4,3	419	2,4	28,6
IV	0,57	34,4	4,6	378	2,6	37,1
V	0,78	32,1	4,5	405	2,5	32,5
VI	0,42	26,2	3,6	496	2,0	35,4

Примітка. У таблиці наведено характеристики повзучості матеріалів при їх дослідженні протягом часу  $\tau = 72$  год.

Крім того, попередньо показано, що введення у епоксидний зв'язувач часток КШ при одночасному використанні скляних чи базальтових волокон забезпечує формування композитів з порівняно невисокими показниками тангенса кута механічних втрат під час структуроутворення матеріалів, що додатково вказує на їх високу когезійну міцність (п.п. 4.1, 4.2).

У подальшому при аналізі повзучості “гібридних” матеріалів встановлено, що протягом усього часу дослідження відбувається деформування композитів з одночасним руйнуванням фізичних зв’язків структурної сітки матриці, про що свідчить зростання прогину зразків і збільшення їх відносної деформації. Встановлено, що максимальними показниками відносної деформації характеризуються матеріали, які містять ненаповнену пластифіковану матрицю і незалежно скляні чи базальтові тканини. Для варіанту I відносна деформація становить  $\varepsilon=48,1\%$ , для варіанту II –  $\varepsilon=42,7\%$  (табл. 5.4). Введення у епоксидний зв’язувач модифікованих часток оксиду міді або КШ з наступним УФО забезпечує зменшення відносної деформації зразків до  $\varepsilon=31,0\dots34,4\%$ , залежно від природи часток і типу тканини (варіанти III і IV). Водночас зауважимо, що формування “гібридних” КМ, які одночасно містять нижній шар зі скляної, а верхній – з базальтової тканини (варіант VI – КМ на основі скляної та базальтової тканини і композиції, що містить частки КШ) дозволяє додатково зменшити показники відносної деформації до  $\varepsilon=26,2\%$ . Отже, можна стверджувати, що матеріали з високими показниками когезійної міцності, “гібридні” КМ, сформовані за варіантами III-VI, характеризуються незначною повзучістю.

Високі показники відносної деформації у КМ, сформованих за варіантами I і II, зумовлені незначною когезійною міцністю матеріалів, внаслідок чого проявляється пластифікуючий ефект Ребіндера [178]. Встановлено, що у процесі навантаження (у нашому випадку статичного) у КМ виникають напруження розтягу у нижній частині зразка і стиску у верхній його частині. Відбувається руйнування зв’язків на межі поділу фаз “дисперсний наповнювач – матриця”, “волокно – матриця” або у об’ємі самої матриці. Враховуючи те, що зразки досліджували у агресивному середовищі дощового розчину, можна стверджувати про проникнення у процесі дослідження молекул води у об’єм КМ. Таким чином відбувається набухання КМ, а у подальшому молекули води, які утримуються у мікротріщинах матеріалу, тобто у місцях розриву зв’язків, зумовлюють “розклинювання”, що спричиняє подальше руйнування матеріалів.

Встановлено, що на початкових етапах дослідження найвищу швидкість повзучості  $V_{\text{п}}=(31\dots43)\cdot 10^{-3}\%/ \text{год}$  спостерігали у КМ, сформованих на основі скляних чи базальтових тканин (варіанти I і II) та на основі базальтової тканини і наповнювача оксиду міді (рис. 5.8). Водночас експериментальні дослідження показують, що для “гібридних” КМ, сформованих за варіантами III, IV і VI, на початковому етапі (протягом шести годин дослідження) швидкість повзучості знаходиться у межах  $V_{\text{п}}=(23\dots26)\cdot 10^{-3}\%/ \text{год}$ . При подальших дослідженнях протягом часу  $\tau=72\text{год}$ . встановлено, що найменшою швидкістю повзучості характеризуються матеріали, сформовані за варіантом VI:  $V_{\text{п}}=3,6\cdot 10^{-3}\%/ \text{год}$  (табл. 5.4).

Надалі демпфуючі властивості матеріалів досліджували, обчислюючи модуль повзучості ( $E_{\text{п}}$ ) і здатність до повзучості ( $J_{\text{п}}$ ) “гібридних” композитів (табл. 5.4). Встановлено, що найнижчими серед усіх досліджуваних КМ показниками модуля повзучості ( $E_{\text{п}}=270\cdot 10^3$  і  $E_{\text{п}}=304\cdot 10^3$ ), а, отже, і найбільшою здатністю до повзучості ( $J_{\text{п}}=3,7\cdot 10^{-6}$  і  $J_{\text{п}}=3,3\cdot 10^{-6}$ ) характеризуються матеріали, сформовані за варіантами I і II, відповідно. Найвище значення модуля повзучості ( $E_{\text{п}}=496\cdot 10^3$ ) і найменшу здатність до повзучості ( $J_{\text{п}}=2,0\cdot 10^{-6}$ ) має матеріал, сформований за варіантом VI, що містить скляну та базальтову тканину і композиції, які містять частки КШ. Найвищими показниками модуля повзучості і найменшими значеннями швидкості повзучості та відносної деформації характеризуються “гібридні” КМ, сформовані за варіантом VI. Це свідчить про їх високі когезійні характеристики і значний відсоток гелеутворення матриці при введенні модифікованого дисперсного наповнювача і тканин відповідного виду.

Після зняття навантаження визначали можливість епоксидного зразка виходити у початковий прогин. Низьке значення відновлення свідчить про значний відсоток кількості зруйнованих хімічних зв'язків у просторовій сітці, що утворена макромолекулами зв'язувача. Це зумовлює суттєву пластичну деформацію матеріалу. Тому можна стверджувати про незначну когезійну міцність системи таких композитів, що підтверджується попередніми дослідженнями [65, 106]. Вихід зразка у початкову форму після зняття навантаження свідчить

про пружні властивості матеріалу, що дозволяє стверджувати про його високі когезійні характеристики. Отже, у такому випадку формується система, яка під впливом заданого навантаження практично деформується лише у пружній області і у подальшому характеризується високими експлуатаційними характеристиками. Встановлено, що найкращими характеристиками відновлення (R) після зняття навантаження у дощовому розчині відзначаються “гібридні” КМ, які містять скляну і базальтову тканину та зв’язувач з модифікованими епоксидним олігомером дисперсними частками (R=28,6...35,4) (табл. 5.4). Встановлено, що після витримки зразків під навантаженням протягом усього часу дослідження кількість зруйнованих зв’язків на межі поділу фаз і у об’ємі композиту є незначною.

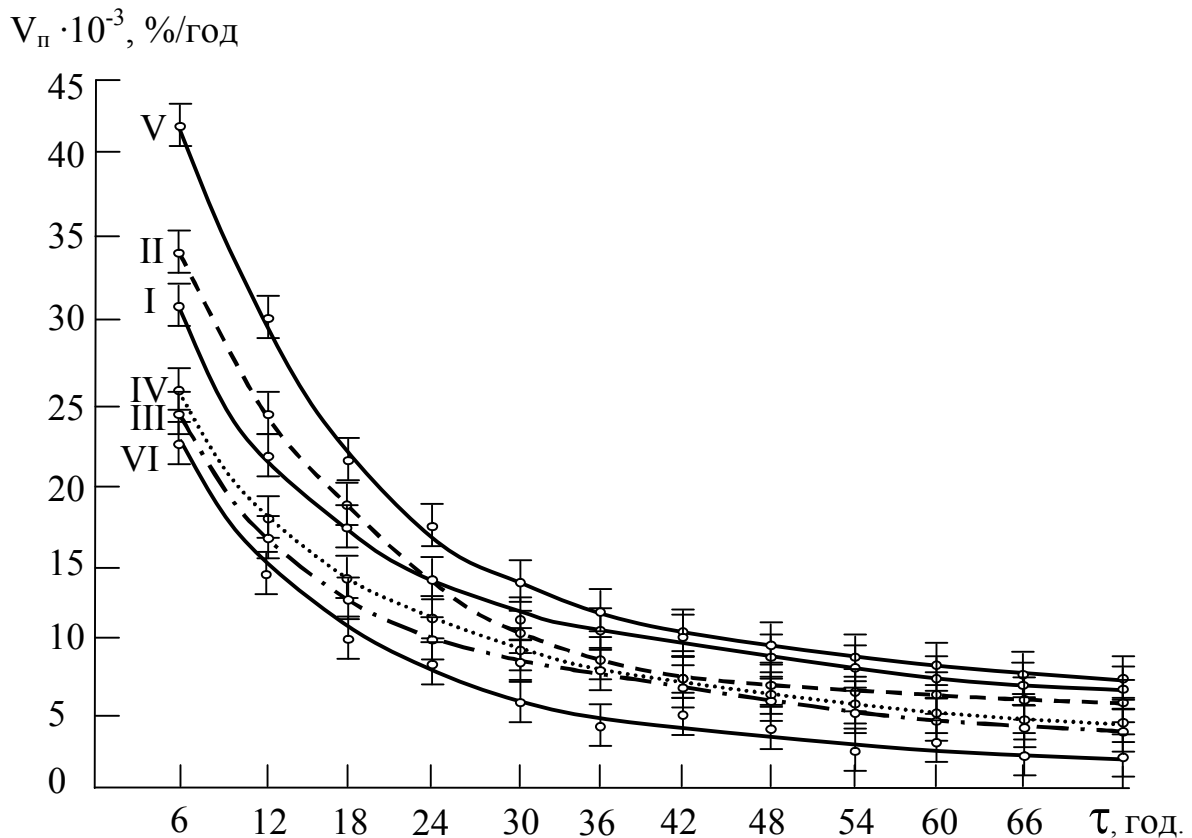


Рис. 5.8. Залежність швидкості повзучості від тривалості впливу статичного навантаження ( $F=2H$ ) у сформованих на основі скляної та базальтової тканини композитах, що містять 80мас.ч. дисперсного наповнювача на 100мас.ч. епоксидної смоли в умовах впливу агресивного середовища (дощовий розчин): I...VI – варіанти формування покриттів.

Отже, на основі проведених досліджень “гібридних” КМ в умовах впливу агресивного середовища дощового розчину встановлено, що найменшими показниками повзучості відзначаються матеріали на основі скляної та базальтової тканини і опроміненої ультрафіолетом композиції, що містить модифіковані епоксидним олігомером частки КШ.

Далі досліджували повзучість КМ у середовищі “нафта-сирець”. Встановлено, що найбільшими показниками початкового прогину також характеризуються матеріали сформовані за варіантами I і II (рис. 5.7).

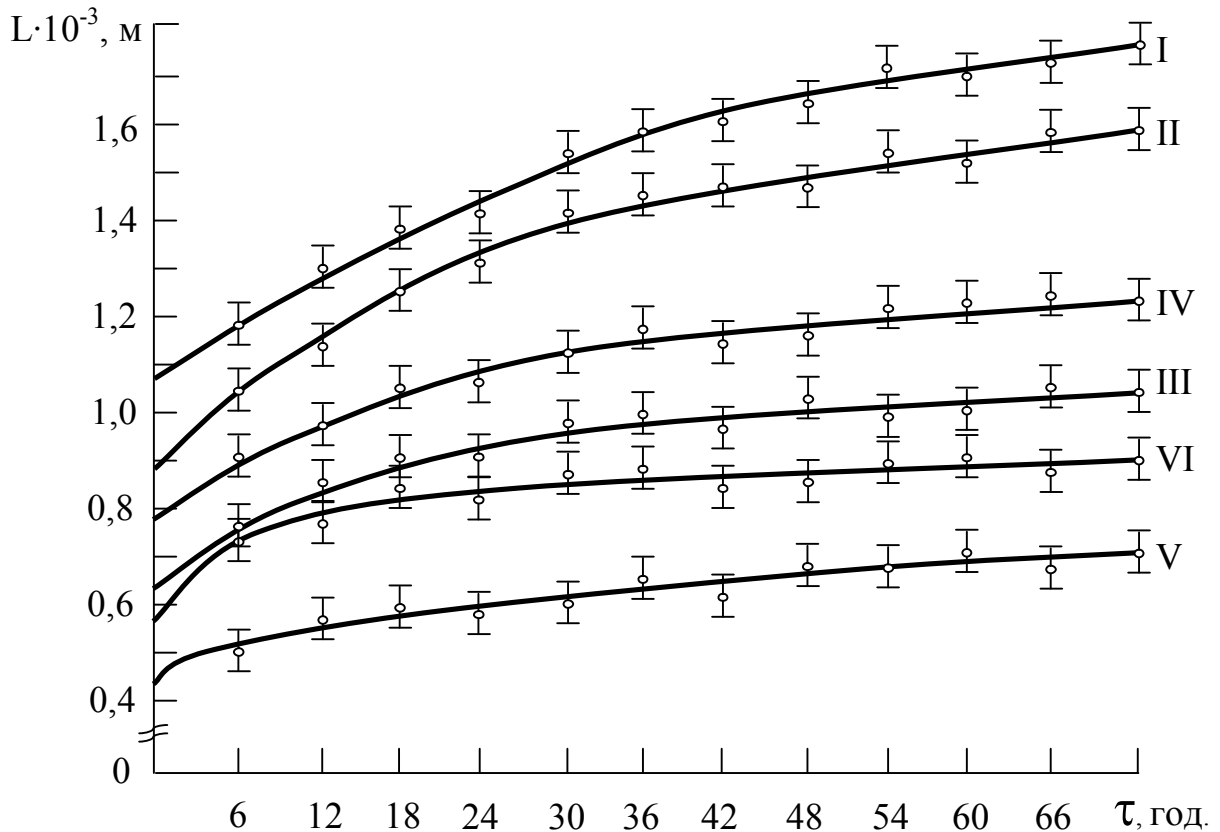


Рис. 5.7. Залежність абсолютної деформації від тривалості впливу статичного навантаження ( $F = 2H$ ) у сформованих на основі скляної та базальтової тканини композитах, що містять 80мас.ч. дисперсного наповнювача на 100мас.ч. епоксидної смоли в умовах впливу агресивного середовища “нафта-сирець” (I...VI – варіанти формування покриттів).

Показано, що найменшими показниками абсолютного прогину ( $L_{п}=0,58 \cdot 10^{-3} м$  та  $L_{п}=0,78 \cdot 10^{-3} м$ ) і відносної деформації



( $\varepsilon=44,9\%$  та  $\varepsilon=46,6\%$ ) відзначаються композити, сформовані за варіантами V і VI, відповідно (табл. 5.5). Водночас результати дослідження швидкості повзучості матеріалів показують, що найменшу швидкість повзучості мають матеріали, які містять базальтові тканини і модифікований наповнювач оксид міді (рис. 5.8). Для них також характерний максимальний модуль повзучості ( $E_{п}=290 \cdot 10^3$ ) і найменша здатність до повзучості ( $J_{п}=3,4 \cdot 10^{-6}$ ) (табл. 5.5).

Таблиця 5.5

Вплив типу тканини і модифікованого дисперсного наповнювача на повзучість оброблених УФО композитів в умовах впливу агресивного середовища (“нафта-сирець”)

Варіанти формування композитів	Абсолютне значення прогину зразка після початкового навантаження, $l_{п} \cdot 10^{-3} \text{ м}$	Відносна деформація, $\varepsilon, \%$	Швидкість повзучості, $V_{п} \cdot 10^{-3}, \%$ /год	Модуль повзучості, $E_{п}(t) \cdot 10^3$	Здатність до повзучості, $J_{п}(t) \cdot 10^{-6}$	Показник відновлення після повзучості, $R, \%$
I	1,08	57,4	7,9	226	4,4	7,4
II	0,88	73,9	10,3	175	5,7	6,3
III	0,44	52,3	7,3	249	4,0	24,3
IV	0,62	61,3	8,5	212	4,7	10,6
V	0,58	44,9	6,2	290	3,4	27,4
VI	0,78	46,6	6,5	279	3,6	28,0

Примітка. У таблиці наведено характеристики повзучості матеріалів при їх дослідженні протягом часу  $\tau = 72$  год.

Дослідження показника відновлення КМ після повзучості доводять, що матеріали, сформовані за варіантом V ( $R=27,4\%$ ),

мають значну когезійну міцність. У процесі статичного навантаження у прийнятному часовому діапазоні дослідження деформацію спостерігали лише у пружній області матеріалу. Композит на основі базальтової тканини і опроміненої ультрафіолетом композиції, що містить модифіковані епоксидним олігомером частки оксиду міді можна рекомендувати для формування захисних покриттів на деталі та вузли технологічного устаткування, яке експлуатують в умовах впливу агресивного середовища “нафта-сирець”.

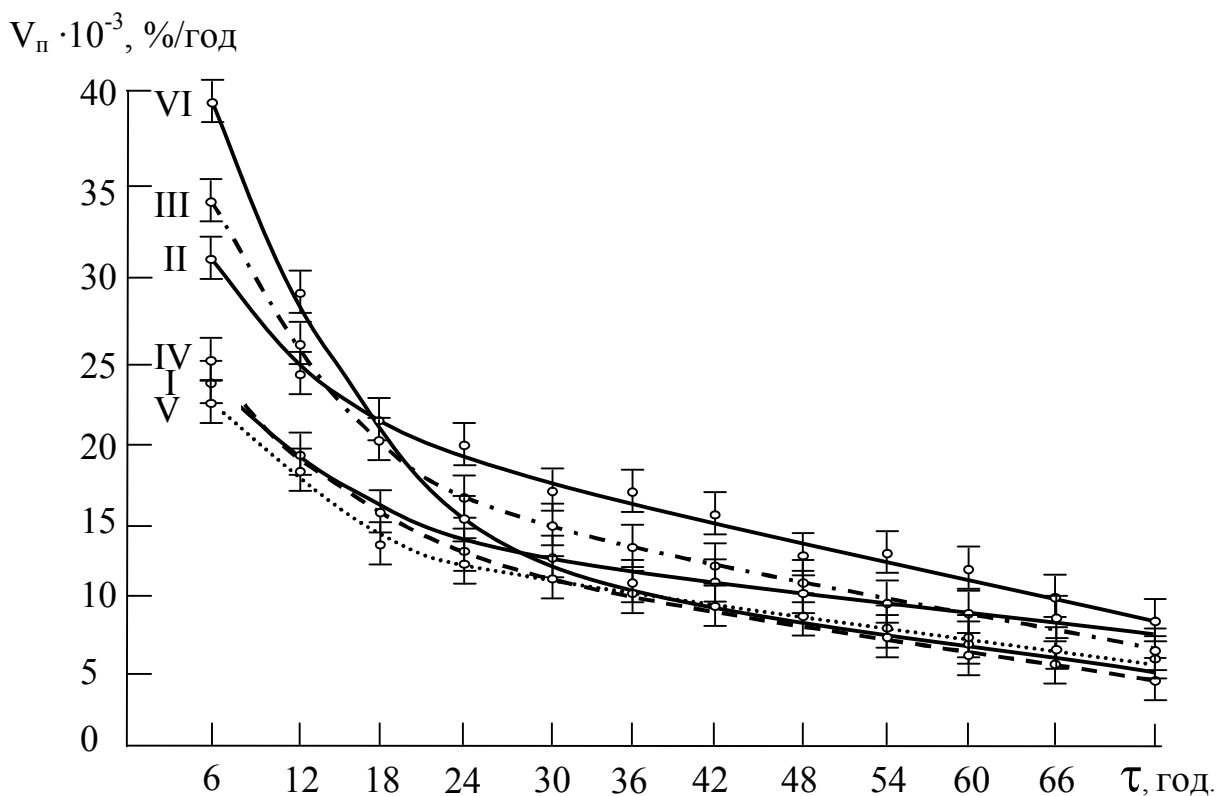


Рис. 5.8. Залежність швидкості повзучості від тривалості впливу статичного навантаження ( $F = 2H$ ) у сформованих на основі скляної та базальтової тканини композитах, що містять 80мас.ч. дисперсного наповнювача на 100мас.ч. епоксидної смоли в умовах впливу агресивного середовища (“нафта-сирець”): I...VI – варіанти формування покриттів.

Отже встановлено, що для зменшення повзучості матеріалів, особливо в умовах впливу агресивних середовищ, необхідно використовувати двошарові епоксидні композитні

“гібридні” матеріали, які містять скляні і базальтові тканини. З метою підвищення експлуатаційних характеристик композитів у вигляді проміжного шару слід використовувати оброблений УФО пластифікований епоксидний зв’язувач, що містить попередньо модифіковані епоксидним олігомером дисперсні частки наповнювача.

На основі результатів дослідження “гібридних” композитів в умовах впливу агресивного середовища дощового розчину встановлено, що найменшими показниками повзучості відзначаються матеріали на основі скляної та базальтової тканини і опроміненої композиції, яка містить модифіковані епоксидним олігомером частки КШ. Такі матеріали мають незначні показники початкового прогину при навантаженні ( $L_{\text{п}}=0,42 \cdot 10^{-3}\text{м}$ ), відносної деформації ( $\varepsilon=26,2\%$ ) і швидкості повзучості ( $V_{\text{п}}=3,6 \cdot 10^{-3}\%/ \text{год}$ ).

Для захисту устаткування, яке експлуатується у агресивному середовищі “нафта-сирець” рекомендовано композити на основі базальтової тканини і опроміненої композиції, що містить модифіковані епоксидним олігомером частки оксиду міді. Для таких матеріалів характерний максимальний модуль повзучості ( $E_{\text{п}}=290 \cdot 10^3$ ) і найменша здатність до повзучості ( $J_{\text{п}}=3,4 \cdot 10^{-6}$ ).

#### **5.4. Технологія формування і практичне використання розроблених покриттів**

Композити на основі полімерів забезпечують необхідний комплекс фізико-механічних властивостей, корозійну тривкість і стійкість до спрацювання, а також високу ремонтоздатність за рахунок неоднократного відновлення поверхонь деталей композитами, що використовують, як покриття. У цьому напрямку цікавим є використання матеріалів на основі епоксидних смол, які, крім вказаних властивостей, мають значну адгезію до металевої основи, технологічність при формуванні у вигляді покриттів на поверхнях зі складним профілем, розвинуту сировинну базу. Для поліпшення технологічних властивостей покриттів у епоксидні олігомери

вводять пластифікатори. Крім того, формування зв'язувачів, які містять пластифікатори, забезпечує краще змочування наповнювача, підвищує рухливість макромолекул, що забезпечує високий ступінь зшивання, у тому числі, і у зовнішніх поверхневих шарах матриці навколо дисперсних часток.

Відомі матеріали, що використовують у вигляді полімерних матриць для захисних покриттів, мають недоліки [179]. Це зокрема, значна тривалість технологічного процесу полімеризації і багатоступеневий режим термічного оброблення, високі показники залишкових напружень, що погіршує фізико-механічні властивості КМ під час їх експлуатації. Поставлену задачу підвищення фізико-механічних властивостей та теплостійкості технологічного устаткування, яке працює в умовах значного градієнту температур і циклічних навантажень вирішують за рахунок використання епоксидного зв'язувача, який містить епоксидну діанову смолу, пластифікатор (полієфір ПЕ-220 і ПДЕА-4) та твердник з таким співвідношенням компонентів, мас.ч.: епоксидна діанова смола – 100, твердник – 12...14, пластифікатор: ПЕ-220 – 8...12, ПДЕА-4 – 18...22 [180].

Для зшивання епоксидного зв'язувача використовували твердник холодного тверднення – поліетиленполіамін (ПЕПА), що вводили при стехіометричному співвідношенні компонентів. Формування композиту на основі епоксидної діанової смоли ЕД-20 та пластифікатора, що містить полієфір ПЕ-220 (8...12мас.ч.) і ПДЕА-4 (18...22мас.ч.) дозволяє поліпшити реологічні властивості епоксидних композицій та знизити залишкові напруження у процесі експлуатації покриття. Епоксидний зв'язувач формують і наносять на поверхню за такою технологією. Дозування компонентів, гідродинамічне суміщення пластифікаторів та олігомера ЕД-20 до отримання однорідної суміші, вакуумування композиції протягом 40...60хв., введення твердника. Отриману композицію протягом 10...20хв. наносять на попередньо обезжирену поверхню методом пневматичного розпилення або використовують у вигляді зв'язувача для КМ.

Наведений склад композиції і спосіб формування захисного покриття має техніко-економічні переваги, порівняно з відомими матеріалами: поліпшені фізико-механічні властивості та теплостійкість за рахунок раціонально підбраного складу інгредієнтів, що забезпечує високу когезійну міцність композитів, достатні реологічні властивості та низькі показники залишкових напружень.

На основі розробленого епоксидного зв'язувача формували захисні покриття з високими експлуатаційними характеристиками різного функціонального призначення.

**Покриття 1.** Основне призначення – збільшення міжремонтного ресурсу роботи технологічного устаткування [173].

В основу розробки поставлено завдання підвищення адгезійної і когезійної міцності, зниження залишкових напружень у захисних покриттях шляхом виконання епоксикомпозитного покриття, що містить епоксидну діанову смолу, пластифікатор, твердник та неорганічний наповнювач з таким співвідношенням інгредієнтів у шарах, мас.ч.: епоксидна діанова смола – 100, пластифікатор: поліефір ПЕ-220 – 8...12 і ПДЕА-4 – 18...22, твердник – 12...14, неорганічний наповнювач: оксид алюмінію (60...80мкм) – 30...50, коричневий шлам (10...20мкм) – 20...40.

Введення, як основного наповнювача, часток оксиду алюмінію та додаткового коричневого шламу при оптимальному вмісті забезпечує формування стійкої до седиментації тиксотропної системи з поліпшеними адгезійними і когезійними властивостями. Збільшення вмісту вказаних наповнювачів зумовлює виникнення напруженого стану та дефектів у зовнішніх поверхневих шарах, що спричиняє підвищення залишкових напружень у захисних покриттях.

Коричневий шлам, як доступний та структурноактивний наповнювач, вводили з метою здешевлення композиції та збільшення адсорбційної взаємодії на межі поділу фаз “олігомер – наповнювач”, “олігомер – металева основа”. Коричневий шлам складається із суміші оксидів (мас.ч.): оксид заліза – 46...48, оксид алюмінію – 7...9, оксид кремнію – 12...14, оксид кальцію – 18...21, оксид магнію – 1...2, оксид

титану – 4...7, оксид ванадію – 1,5...2,5, оксид олова – 0,9...1,6, оксид барію – 0,7...1,0, інші оксиди – до 100. З метою вилучення інших домішок перед просіюванням проводили очищення коричневого шламу методом ультразвукового оброблення у водному розчині з наступним просушуванням при температурі  $T=443\pm 2\text{K}$  протягом часу  $\tau=1,5\text{...}2,0\text{год}$ .

Композицію формують і наносять на поверхню за такою технологією. Підготовка поверхні, яка полягає у обезжирюванні і видаленні забруднень, окалини, іржі з використанням піскоструминного оброблення. Формування композиції: приготування матриці (дозування компонентів та їх змішування) і приготування наповнювачів (очищення дисперсних часток від домішок методом ультразвукового оброблення). Після отримання однорідних фракцій порошки просушують у сушильній шафі при температурі  $T=323\text{...}353\text{K}$  протягом часу  $\tau=2,0\text{год}$ .

З метою поліпшення взаємодії на межі поділу фаз “олігомер – дисперсний наповнювач” було застосовано спосіб модифікування часток, що полягає у їх змочуванні епоксидним діановим олігомером ЕД-20 з наступним їх термообробленням при  $T=353\pm 2\text{K}$  протягом часу  $\tau=30\pm 2\text{хв}$ . Змочування наповнювача епоксидним олігомером проводили таким чином [174]. На початковому етапі вводили частки у епоксидну смолу і перемішували композицію без твердника протягом часу  $\tau=4\text{...}5\text{хв}$ . Надалі на фільтрувальний папір наносили композицію з мінімально можливою товщиною шару, яка становила  $h=80\text{...}100\text{мкм}$ . Наступним етапом було термооброблення часток наповнювача з метою формування фізичних зв'язків на межі поділу фаз. Ваговим методом встановлено, що вміст епоксидної смоли на поверхні дисперсних часток після їх модифікування олігомером за описаною методикою становить 8...12мас.ч. на 100мас.ч. дисперсного наповнювача.

Після приготування наповнювачів і дозування компонентів олігомерного зв'язувача методом гідродинамічного суміщення компонентів готували композицію. У подальшому обробляли ультрафіолетовими променями суміш модифікованих

дисперсних часток наповнювача та олігомерної композиції протягом часу  $\tau=20\pm 0,2$ хв [180, 181]. Ультрафіолетове опромінення композиції, яка містить епоксидний олігомер, пластифікатор і модифікований дисперсний наповнювач (до введення твердника) забезпечує активацію макромолекул епоксидної смоли і пластифікатора, внаслідок чого утворюються вільні радикали. Такі радикали мають більшу активність і рухливість, порівняно з вихідними (неопроміненими) макромолекулами. Це поліпшує їх взаємодію з активними центрами на поверхні дисперсних часток, що забезпечує збільшення когезійної міцності і, як наслідок, підвищення експлуатаційних характеристик епоксидного покриття.

Після опромінення суміші вводили твердник при стехіометричному співвідношенні компонентів і наносили композицію на захищувану поверхню.

**Покриття 2.** Основне призначення – підвищення корозійної тривкості устаткування, що експлуатується у природних умовах.

В основу розробки поставлено задачу підвищення адгезійної, когезійної міцності і корозійної тривкості захисного покриття шляхом виконання епоксикомпозитного покриття з двох шарів – адгезійного і функціонального. Матеріал адгезійного шару складається з епоксидної діанової смоли, пластифікатора, твердника та двокомпонентного полідисперсного мінерального наповнювача. Інгредієнти для адгезійного шару і технологію його формування наведено вище при описі способу формування покриття 1. Матеріал функціонального шару складається з епоксидної діанової смоли, пластифікатора, твердника, волокнистого і дисперсного наповнювача. Функціональний шар містить скляну та базальтову тканину і неорганічний модифікований наповнювач з таким співвідношенням інгредієнтів, мас.ч.: епоксидна діанова смола – 100, пластифікатор: поліефір ПЕ-220 – 8...12 і ПДЕА-4 – 18...22, твердник – 12...14, наповнювач: скляна тканина (9...12мкм), базальтова тканина (9...12мкм), коричневий шлам (60...80мкм) – 70...90.

Введення у функціональний шар скляної тканини, що містить волокна з діаметром 9...12мкм, забезпечує підвищення демпфуючих властивостей захисних покриттів. Також використання вказаного наповнювача забезпечує суттєве зменшення термічного коефіцієнта лінійного розширення, що у свою чергу, підвищує експлуатаційні характеристики захисних покриттів. Тканини у функціональному шарі укладають у такій послідовності: підшар, що межує з адгезійним шаром, формують зі скляної тканини, а підшар, що межує з навколишнім середовищем, формують з базальтової тканини.

Введення у функціональний шар скляної та базальтової тканин, що містять волокна з діаметром 9...12мкм, забезпечує підвищення демпфуючих властивостей, когезійної міцності і корозійної тривкості захисних покриттів. Також використання тканин забезпечує суттєве зменшення термічного коефіцієнта лінійного розширення, що, у свою чергу, підвищує експлуатаційні характеристики композитів.

Коричневий шлам, як достатньо доступний та структурноактивний неорганічний наповнювач, вводили у функціональний шар з метою забезпечення адсорбційної взаємодії на межі поділу фаз “полімер-наповнювач”. Введення у функціональний шар модифікованого епоксидним олігомером наповнювача коричневого шламу до 70мас.ч. на 100мас.ч. олігомера ЕД-20 призводить до зменшення об’єму полімера у стані зовнішніх поверхневих шарів, при цьому когезійна міцність покриттів знижується. Введення часток коричневого шламу понад 90мас.ч. на 100мас.ч. олігомера ЕД-20 зумовлює підвищення залишкових напружень у КМ внаслідок значної дефектності поверхневих шарів навколо дисперсних часток наповнювача.

Нанесення на сталюну основу (сталь Ст.3) методом пневматичного розпилення адгезійного шару з товщиною 0,1...0,3мм дозволяє суттєво підвищити адгезійну міцність і корозійну тривкість захисних покриттів. Попередня полімеризація адгезійного шару при температурі  $T=313...333\text{K}$  протягом часу  $\tau=20...30\text{хв.}$  забезпечує високий ступінь зшивання макромолекул з утворенням просторової сітки, що



зумовлює поліпшення адгезійної міцності та фізико-механічних властивостей покриттів. Виконання адгезійного шару товщиною, яка менша за 0,1мм, погіршує перебіг дифузійних процесів при полімеризації захисного покриття. Виконання адгезійного шару з товщиною, яка більша від 0,3мм, знижує величину адгезійної міцності гетерогенних матеріалів. Крім того, полімеризація шару при температурі, яка вища оптимальних режимів та тривалістю, що більша від часу  $\tau=30$ хв., зумовлює зменшення міжшарової взаємодії, що погіршує захисні властивості покриттів. Полімеризація шару при температурно-часових режимах, які нижчі від оптимальних значень, погіршує технологічні умови формування захисних покриттів.

Функціональний шар з товщиною 1,5...2,0мм наносять укладанням скляної тканини на адгезійний шар після його попередньої полімеризації. У подальшому методом пневматичного розпилення опромінену епоксидну композицію з модифікованими епоксидним олігомером частками коричневого шламу наносять на поверхню тканини. Далі формують зовнішній підшар на основі базальтової тканини і термостатують покриття за режимом:  $T=493...498$ К,  $\tau=2,0...2,1$ год.

**Покриття 3.** Основне призначення – підвищення корозійної тривкості устаткування, що експлуатується в умовах впливу агресивного середовища “нафта-сирець”.

Вирішена задача підвищення адгезійної, когезійної міцності і корозійної тривкості захисного покриття шляхом модифікування епоксикомпозиту. Таке покриття містить адгезійний і функціональний шари. Інгредієнти для адгезійного шару і технологію його формування наведено вище при описі способу формування покриття 1. Функціональний шар містить базальтову тканину і неорганічний модифікований наповнювач з таким співвідношенням інгредієнтів, мас.ч.: епоксидна діанова смола – 100, пластифікатор: поліефір ПЕ-220 – 8...12 і ПДЕА-4 – 18...22, твердник – 12...14, наповнювач: базальтова тканина (9...12мкм), оксид міді (60...80мкм) – 70...90.

Режими формування і параметри функціонального шару є аналогічними до режимів і параметрів аналогічного шару

покриття 2. Відмінним є те, що функціональний шар складається з двох підшарів, сформованих з базальтової тканини, а до пластифікованої і опроміненої епоксидної композиції вводять модифіковані епоксидним олігомером частки оксиду міді.

Отримані експериментальні результати порівняльних випробувань фізико-механічних, теплофізичних властивостей і корозійної тривкості розроблених та відомих захисних покриттів свідчать про високі експлуатаційні характеристики і доцільність використання нових матеріалів у промисловості (табл. 5.6).

Високу ефективність застосування нових покриттів підтверджено випробуваннями у виробничих умовах при захисті від корозії устаткування нафтопереробної і газотранспортної промисловості. Розроблені КМ і захисні покриття на їх основі впроваджено на УМГ “Черкаситрансгаз”, УМГ “Прикарпаттрансгаз” та ДП “Львівнафтопродукт”. На вказаних підприємствах ставлять у комплексі широкий спектр підвищених вимог до експлуатаційних характеристик захисних покриттів, позаяк технологічне устаткування піддається одночасно постійному впливу атмосферних та агресивних середовищ.

В результаті експлуатації контрольних об’єктів встановлено, що використання захисних покриттів особливо ефективно при захисті від корозії металоконструкцій і устаткування в умовах впливу агресивного середовища “нафта-сирець” (ДП “Львівнафтопродукт”), а також від атмосферної корозії деталей газотранспортного обладнання (УМГ “Черкаситрансгаз” та УМГ “Прикарпаттрансгаз”). Крім того, впровадження розроблених епоксикомпозитних матеріалів у вузлах технологічного устаткування забезпечує підвищення надійності і довговічності обладнання у 2...3 рази. Результати дослідної перевірки експлуатаційних характеристик розроблених композитів у вигляді виробів та захисних покриттів дозволяють констатувати про їх високу надійність і ефективність та необхідність подальшого впровадження у різних галузях промисловості.

Таблиця 5.6

## Порівняльні показники властивостей захисних покриттів

Показник	ПКП 1	ПКП 2	ПКП 3	ПКП 4	ПКП 5	ПКП 6	ПКП 7
Адгезійна міцність, МПа	76,6	76,6	76,6	44,6	52,4	61,2	51,7
Залишкові напруження, МПа	2,6	2,6	2,6	6,3	5,4	7,8	6,3
Ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>	7,1	8,3	7,8	5,6	5,2	6,5	4,7
Руйнівне напруження при згинанні, МПа	69,8	73,5	76,4	52,1	48,6	55,2	46,9
Теплостійкість, К	360	363	362	352	350	354	345
Швидкість повзучості у природніх умовах, $V_{п} \cdot 10^{-3}, \%/год$	4,3	3,6	4,5	5,7	5,6	5,9	6,4

Примітка.

ПКП 1...3 – розроблені покриття;

ПКП 4 – полімеркомпозитне покриття (пат. №97020588, опубл. в “Промислова власність України”, 1997, №5);

ПКП 5 – полімеркомпозитне покриття (а.с. №1148855, опубл. в Б.И., 1985, №13);

ПКП 6 – полімеркомпозитне покриття (пат. Японії №63183914, 29.07.1988р.);

ПКП 7 – полімеркомпозитне покриття (пат. США №4514445, опубл. в Р.Ж., 1986, №1).

