

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО СПРАЦЮВАННЯ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ, ЩО МІСТЯТЬ МОДИФІКОВАНИЙ УЛЬТРАЗВУКОМ «ГІБРИДНИЙ» НАПОВНЮВАЧ

А.В. Букетов<sup>1</sup>, П.Д. Стухляк<sup>1</sup>, І.В. Чихіра<sup>1</sup>,  
І.Г. Добротвор<sup>1</sup>, Е.М. Кальба<sup>2</sup>

## RESEARCH OF THE WEAR RESISTANCE OF EPOXYCOMPOSITES CONTAINING HYBRID FILLERS MODIFIED BY ULTRASOUND

A.V. Buketov, P.D. Stuhlyak, I.V. Chyhira,  
I.G. Dobrotvor, E.M. Kalba

<sup>1</sup>*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна*

<sup>2</sup>*Тернопільський національний педагогічний університет імені В. Гнатюка, Україна*

**Abstract.** Existence of chemical and physical links between active groups of epoxy resin and dispersed particles is determined due. It provides forming interlayers in the filled systems. Influence of nature of dispersed fillers on adhesive resistance and physical-mechanical properties of polymer-composites. Experimentally it is proved, that preliminary processing a ultrasonic field disperse and fibrous store allows to adjust in a wide range operational.

**Вступ.** Одним з основних критеріїв, що характеризують надійність роботи устаткування в умовах впливу агресивних середовищ є його стійкість до спрацювання. Вказаний параметр найбільш суттєвим є для механізмів, які перебувають в умовах постійного впливу динамічних навантажень і градієнту температур [1]. В таких умовах у ділянці контакту захисних покриттів і частинок гідроабразивного середовища постійно виникають фізико-механічні процеси, що призводять до руйнування поверхонь обладнання. Виходячи з цього для захисту від руйнування та продовження міжремонтного терміну роботи обладнання сучасна промисловість ставить високі вимоги до підвищення експлуатаційних характеристик захисних покриттів. У цьому плані перспективним є використання епоксидних композитних матеріалів (КМ), що містять «гібридний» (дисперсний і волокнистий) наповнювач. При цьому, цікавим з наукової і практичної точки зору, є проведення попередньої модифікації інгредієнтів композиту, на попередній стадії їх формування, зовнішніми полями, зокрема ультразвуковою обробкою (УЗО). Це дозволить суттєво підвищити когезійну міцність епоксикомпозитів, а, як наслідок, поліпшити їх стійкість до спрацювання.

Метою роботи є дослідження стійкості до спрацювання епоксикомпозитів, що містять модифікований ультразвуком «гібридний» наповнювач.

**Матеріали та методика досліджень.** Об'єктом дослідження вибрано епоксикомпозити на основі епоксидно-діанового олігомера марки ЕД-20. Твердіння КМ проводили з використанням твердника поліетиленполіаміну при нормальних умовах. Для поліпшення властивостей епоксикомпозитів використовували дисперсні та волокнисті наповнювачі. На основі попередніх досліджень як дисперсний наповнювач вибрано газову сажу (ГС) при оптимальній концентрації - 50 мас.ч наповнювача на 100 мас.ч. епоксидіанової смоли ЕД-20 [2]. Досліджувані зразки формували у вигляді тришарового покриття з розміром 20x10x4 мм з використанням скляної, базальтової та вуглецевої тканин. З метою підвищення ступеня зшивання матриці у поверхневих шарах проводили УЗО епоксидної композиції і тканин незалежно, згідно розробленої методики [3].

Для визначення відносної гідроабразивної стійкості до спрацювання застосовували стандартну методику згідно ГОСТ 23201-78, щодо випробування

матеріалів на гідроабразивне зношування за допомогою відцентрового прискорювача. Зразки досліджували в умовах впливу гідроабразивної суміші з технічної води і абразивних частинок у співвідношенні 5:1. Зазначимо, що дослідження проводили при різних кутах атаки гідроабразивної суміші на зразки, причому кут атаки змінювали у межах:  $\alpha=30\dots 90^\circ$ . Швидкість обертання відцентрового прискорювача становила 3000 об/хв.

Відносну стійкість до спрацювання визначали за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\delta_e}{\delta_3},$$

де  $\delta_e$  - втрата маси еталонного зразка (сталь Ст.3), кг;  $\delta_3$  - втрата маси досліджуваного зразка, кг.

**Обговорення результатів експерименту.** Для покращення когезійних властивостей і стійкості до спрацювання КМ досліджувані зразки формували шляхом шарового укладання тканин різної хімічної природи, між якими наносили епоксидну композицію з дисперсним наповнювачем (ГС). Зазначимо, що на основі попередніх досліджень експериментально встановлено вплив природи тканини на когезійні властивості КМ, які працюють в умовах статичних навантажень [2]. Тому, у подальшому з метою поліпшення когезійної міцності і стійкості до спрацювання КМ вважали доцільним формувати захисні покриття шляхом шарового укладання тканин різної природи, враховуючи результати досліджень наведених у роботі [2]. У подальшому прийнято такі варіанти формування захисних покриттів: I-варіант: 1-шар базальтової тканини, 2-шар вуглецевої тканини, 3-шар скляної тканини; II-варіант: 1,2-шари базальтової тканини, 3-шар вуглецевої тканини, III-варіант: 1,3-шар базальтової тканини, 2-шар вуглецевої тканини. Згідно з результатами попередніх досліджень [3], найкращі адгезійні властивості (порівняно з іншими тканинами) має базальтове волокно. У зв'язку з цим, як адгезійний шар, що контактує зі сталюю основою, вибрано базальтову тканину в усіх варіантах формування покриттів. Наступні шари, які характеризують міцнісні властивості самого композиту, вибирали виходячи з їх когезійних характеристик.

Експериментальними дослідженнями встановлено високу стійкість до спрацювання полімеркомпозитів на основі епоксидної матриці відносно сталі Ст.3 незалежно від способу укладання тканин (рис.1). Встановлено, що використання у вигляді 1-го шару, що безпосередньо контактує з металевою поверхнею, базальтової тканини, дозволяє значно підвищити не лише адгезійну міцність, а й стійкість до спрацювання КМ. Це досягається за рахунок вищої адгезійної міцності базальтової тканини до металевої основи, порівняно з іншими досліджуваними тканинами, та формуванням структури з більшою кількістю ефективних вузлів структурної сітки. Крім того, додаткова ультразвукова обробка тканин сприяє більшому проникненню епоксидної композиції у проміжки між волокнами тканин, що покращує зшивання епоксидної композиції з базальтовою тканиною. Використання у вигляді 1-го шару скляної та вуглецевої тканини недоцільно, оскільки адгезійні властивості вказаних тканин на 20-26% нижчі [2].

У подальшому головним критерієм при виборі 2-го шару покриття були демпфуючі властивості епоксикомпозитів під впливом гідродару абразивної суміші. Експериментально встановлено, що найкращі демпфуючі характеристики виявлено у КМ, де поєднано базальтову та вуглецеву тканини, що характерно для 1-го і 3-го варіанту формування композиту (рис. 1). Таке поєднання дозволяє максимально знизити проникнення абразивної суміші у об'єм покриття внаслідок часткового руйнування поверхневого (3-го) шару і значних демпфувальних властивостей 2-го шару. При виборі 3-го шару покриття враховувалось можливість тканин сприяти зміцненню попередньо створених зв'язків між тканинами попередніх шарів. Крім того, поверхневий шар має мати високі когезійну міцність на межі поділу фаз «тканина –

епоксидна матриця – наповнювач». Встановлено, що найкращі когезійні характеристики, а, відповідно, стійкість до спрацювання характерні для покриття, що сформоване за третім варіантом: 1,3-шари базальтова тканина, 2-шар вуглецева тканина. (рис.1). Тобто використання у вигляді 3-го шару базальтової тканини, порівняно з вуглецевою і скляною тканинами, забезпечує підвищення стійкості до спрацювання КМ на 16...20% залежно від кута атаки гідроабразивної суміші.

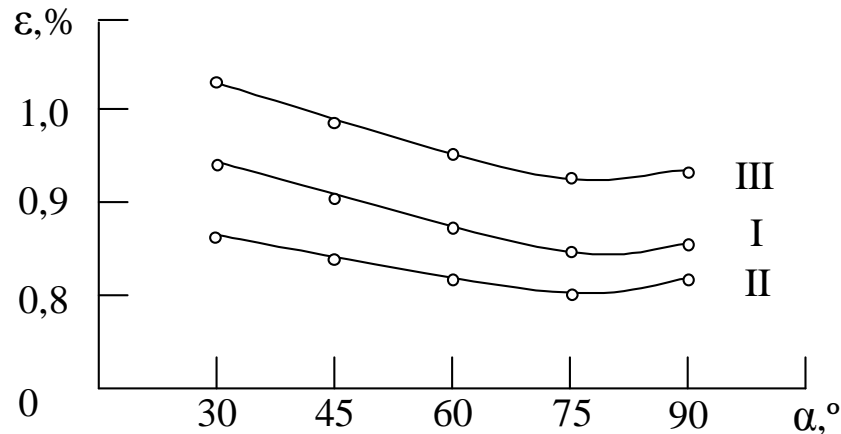


Рис.1. Залежність відносної стійкості до спрацювання від кута атаки ( $\alpha$ ) гідроабразивної суміші для покриттів, сформованих за варіантами: I-варіант: 1-шар базальтової тканини, 2-шар вуглецевої тканини, 3-шар скляної тканини; II-варіант: 1,2-шари базальтової тканини, 3-шар вуглецевої тканини, III-варіант: 1,3-шар базальтової тканини, 2-шар вуглецевої тканини.

З метою підтвердження результатів вище описаних досліджень стійкості до спрацювання КМ у роботі проведено дослідження поверхні матеріалів методом електронної мікроскопії. Експериментально встановлено, що при використанні КМ, сформованих за першим і другим варіантом реалізується пружнопластичний ковзальний контакт абразивних частинок на поверхні КМ і спрацювання відбувається внаслідок багатократного пластичного деформування матеріалу абразивом. При цьому на поверхні полімеркомпозитів утворюються канавки у напрямку швидкості різання, що підтверджено результатами оптичної мікроскопії (рис.2,а). Крім того, спостерігали пластичний характер руйнування поверхні покриття з одночасною деформацією його поверхневого шару абразивними частинками середовища, що свідчить про недостатні когезійні властивості композитів, сформованих за другим варіантом (рис. 2,б).

Водночас, при дослідженні КМ, сформованих за третім варіантом, внаслідок ковзальної дії гідроабразивної суміші, інтенсивність зношування незначна, оскільки нормальні зусилля у ділянці контакту мають невеликі значення (рис.2,б). Отже, у цьому випадку спрацювання є результатом мікрорізання та, частково, пластичного деформування матеріалу. Відомо [4], що під впливом гідроабразиву виникає процес спрацювання поверхні матеріалу, який зумовлює виникнення мікротріщин у ділянці контакту. Крім того, важливим є дослідження процесу мікрорізання з утворенням рельєфної поверхні, залежно від кута падіння гідроабразивної суміші, оскільки поверхня захисного покриття при гідроабразивному спрацюванні піддається постійній дії гідроабразивної суміші під різними кутами. У зв'язку з цим наступним етапом було проведення аналізу результатів досліджень з метою визначення впливу кута атаки гідроабразиву на стійкість до спрацювання КМ.



а)



б)



в)

Рис.2. Вигляд поверхні після гідроабразивного руйнування при куті атаки гідроабразивної суміші  $60^\circ$  композитів з дисперсними частинками газової сажі (50 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли ЕД-20), що містять тканини, які укладені за такими варіантами: а) базальтова, скляна і вуглецева тканини; б) базальтова, базальтова і вуглецева тканини; в) базальтова, вуглецева і базальтова тканини.

Експериментально встановлено, що при невеликих кутах атаки ( $\alpha=30\dots60^\circ$ ) інтенсивність спрацювання досліджуваних КМ була незначною, оскільки руйнування матеріалу супроводжувалось ковзанням абразивних частинок по поверхні досліджуваного зразка (рис. 1). При цьому, рух потоку гідроабразивної суміші відбувався по дотичній відносно поверхні захисного покриття. Експериментально встановлено, що для усіх досліджуваних полімеркомпозитів при збільшенні кута атаки інтенсивність спрацювання зростає і досягає свого максимального значення при куті атаки  $\alpha=75^\circ$ . Це зумовлено у першу чергу великими значеннями нормальних і тангенціальних напружень, що виникають у матеріалі покриття, при дії гідроабразиву під вказаним кутом. Показано (рис.3, а,б), що при кутах атаки гідроабразиву  $\alpha=30\dots45^\circ$  на поверхні матеріалу помітні ділянки руйнування матриці внаслідок мікрорізання частинками кварцевого піску. Водночас, при куті атаки  $\alpha=60^\circ$  спостерігали пластичну деформацію, де помітні ділянки макророзривів. Внаслідок цього збільшується руйнування КМ. Показано (рис. 3,г,д), що найбільше руйнуються покриття при кутах атаки  $\alpha=75\dots90^\circ$ . У кінці досліджень на поверхні зразків виявлено суттєве руйнування не лише епоксидної матриці, але й тканини поверхневого шару покриттів. Це підтверджує попередні дослідження і свідчить про важливість врахування кута атаки гідроабразиву при нанесенні захисних покриттів на довговимірні поверхні складного профілю.



а)



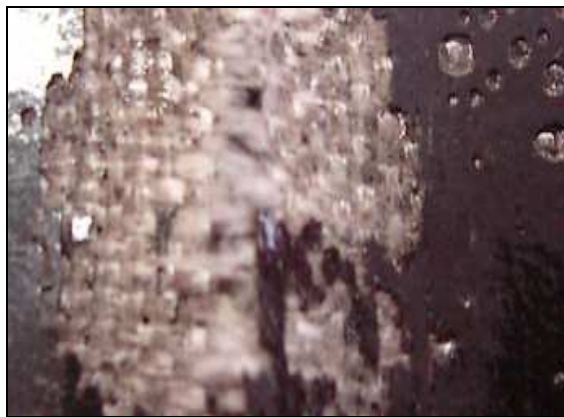
б)



в)



г)



д)

Рис.3. Вигляд поверхні композитів після гідроабразивного руйнування при різних кутах атаки ( $\alpha$ ) гідроабразивної суміші: а)  $\alpha=30^\circ$ ; б)  $\alpha=45^\circ$ ; в)  $\alpha=60^\circ$ ; г)  $\alpha=75^\circ$ ; д)  $\alpha=90^\circ$ .

### Висновки

На основі результатів проведених досліджень розроблено технологію формування композитних матеріалів для захисту технологічного устаткування від гідроабразивного спрацювання. Експериментально встановлено доцільність використання базальтових, вуглецевих і скляних тканин для покращення стійкості до спрацювання обладнання. Показано, що найкращу стійкість до спрацювання мають захисні покриття, сформовані за варіантом: 1,3-шар базальтової тканини, 2-шар вуглецевої тканини. При цьому зазначимо, що попередньо з метою поліпшення когезійної міцності композитів слід провести модифікацію інгредієнтів матеріалу ультразвуковою обробкою. Одночасна обробка ультразвуком тканин і епоксидних композицій з дисперсним частинками газової сажі забезпечить максимальне гелеутворення матриці у поверхневих шарах, що дозволить значно підвищити стійкість до спрацювання епоксикомпозитів. Встановлено, що найбільшу інтенсивність зношування матеріалів спостерігали при куті

атаки, який становить  $75^\circ$ . Це пов'язано з комплексним впливом процесів мікрорізання та пластичного деформування матеріалу, що зумовлено значними дотичними і нормальними напруженнями в епоксикомпозитах при дії гідроабразива.

Враховуючи вище сказане, у майбутньому авторами планується проведення експериментальних досліджень корозійної тривкості розроблених захисних покриттів.

### Література

1. Богданович П.Н., Прущак В.Я. Трение и износ в машинах.-Минск: Высшая школа, 1999.-376с.
2. Букетов А.В., Стухляк П.Д., Чихіра І.В. Дослідження фізико-механічних властивостей модифікованих ультразвуковим полем епоксипластів, що містять “гібридний” наповнювач // Вопросы химии и химической технологии.-2005.-№6.-С.122-128.
3. Букетов А.В., Стухляк П.Д., Чихіра І.В., Микитишин А.Г. Епоксикомпозити. Вплив ультразвукової обробки волокон у водяному середовищі на релаксаційні процеси // Хімічна промисловість України.-2005.-№3.-С.29-34.
4. Справочник по триботехнике: в 3т./Под общ.ред.М.Хебды,А.В.Чичинадзе.-М.,1989.-Т.1:Теоретические основы.-400с.