

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

КАШИЦЬКИЙ ВІТАЛІЙ ПАВЛОВИЧ

УДК 621.763:667.637.22

**РОЗРОБКА ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ З ПІДВИЩЕНОЮ
ЗНОСОСТІЙКІСТЮ НА ОСНОВІ ЕПОКСИДНИХ
КОМПОЗИТІВ, МОДИФІКОВАНИХ КРЕМНІЙОРГАНІЧНИМ
ЛАКОМ КО-921**

05.02.01 – матеріалознавство

**АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Луцьк – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Луцькому державному технічному університеті на кафедрі матеріалознавства та обробки металів тиском.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Савчук Петро Петрович,
Луцький державний технічний університет,
доцент кафедри матеріалознавства та обробки металів тиском

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Стухляк Петро Данилович,
Тернопільський державний технічний університет
ім. І. Пулюя, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, декан факультету комп'ютерних технологій

кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник
Середницький Ярослав Антонович,
Державне підприємство Інженерний Центр "Техно – Ресурс" НАН України при Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України, завідувач лабораторією

Провідна установа: Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ

Захист відбудеться «21» грудня 2006 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 32.075.02 у Луцькому державному технічному університеті за адресою: 43018, м.Луцьк, вул. Львівська, 75.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Луцького державного технічного університету за адресою: 43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75.

Автореферат розісланий «20» листопада 2006 року.

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради К 32.075.02,
кандидат технічних наук, доцент*

Д.А. Гусачук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Полімеркомпозитні матеріали (ПКМ) набули широкого застосування для захисту технологічного устаткування, деталей машин й механізмів від зношування в умовах сухого фрикційного контакту або впливу гідроабразивних середовищ.

Науковими школами П.Н. Богдановича (Білорусія), І.В. Крагельського (Росія), П.Д. Стухляка, Є.М. Кальби, М.М. Братичака (Україна) та інших значний прогрес був досягнутий в створенні нових зносостійких ПКМ на основі епоксидної матриці.

Однак створені матеріали не в повній мірі задовільняють споживача через недостатню когезійну міцність, термо- та зносостійкість епоксикомпозитних систем. Використання епоксикомпозитних матеріалів (ЕКМ) у вузлах тертя без підводу мастила при жорстких навантажувально-швидкісних режимах потребує введення до їх складу термостабілізуючих добавок, які б виступали сповільнювачами деструктивних процесів при виникненні високих температур в зоні трибоконтакту. В цьому плані перспективним є модифікування епоксиолімерів кремнійорганічними сполуками. Однак на сьогодні недостатньо вивчені механізми структурування та процеси, що відбуваються при формуванні та експлуатації епоксикремнійорганічних наповнених композитних матеріалів.

Направлене формування полінаповнених ЕКМ дозволяє суттєво підсилити їх експлуатаційні характеристики. Тому важливим є аналіз комплексного впливу мінеральних та органічних різнофункціональних наповнювачів на структуроутворюючі процеси та фізико-механічні, теплофізичні характеристики епоксикомпозитів.

Висока однорідність отримуваних систем забезпечується обробкою композицій на стадії формування у фізичних полях, що викликає необхідність вивчення їх впливу на характер структурування та властивості ЕКМ.

Важливим аспектом є також дослідження особливостей перетворень для забезпечення керованості процесів, які відбуваються в зоні трибоконтакту при фрикційній взаємодії для підвищення ресурсу роботи трибовиробів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в рамках співпраці Луцького державного технічного університету і Тернопільського Національного педагогічного університету ім. В. Гнатюка за темами: “Дослідження структури градієнтних полімеркомпозиційних матеріалів на основі модифікованих епоксидних смол і дисперсних наповнювачів з метою підвищення зносо- і корозійної стійкості технологічного устаткування” (держ. реєстр. № РН 0100U002410) та “Дослідження впливу зовнішніх фізичних полів на самоорганізацію структур полімеркомпозиційних матеріалів” (держ. реєстр. № РН 0103U003117).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є встановлення закономірностей комплексного впливу термостійкого кремнійорганічного модифікатора й різнофункціональних наповнювачів при додатковому прикладенні фізичних полів у процесі формування систем на структуру та властивості ЕКМ і створення на їх основі захисних покриттів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- вивчити вплив термостійкого кремнійорганічного лаку марки КО-921 та температурно-часових параметрів обробки на фізико-механічні характеристики та процеси структурування композитних матеріалів на основі епоксидної смоли ЕД-20;
- дослідити комплексний вплив різнофункціональних наповнювачів, ультразвукової, ультрафіолетової та магнітної обробки на фізико-механічні та триботехнічні характеристики епоксикомпозитного матеріалу;
- встановити умови стабілізації фрикційних характеристик та утворення самоорганізуючих стійких плівок переносу при трибоконтакті;
- розробити склад та технологію формування захисних покриттів на основі епоксикомпозитного матеріалу;
- впровадити розроблені матеріали для захисту поверхонь днища і надколісних ніш автомобільної техніки.

Об'єкт дослідження – композитний полінаповнений матеріал на основі епоксидної смоли, модифікований кремнійорганічним лаком КО-921.

Предмет дослідження – комплексний вплив термостійкого кремнійорганічного модифікатора, різнофункціональних полідисперсних та волокнистого наповнювачів, а також режимів тверднення на структуру й властивості епоксикомпозитного матеріалу.

Методи дослідження. При розробці епоксидного композитного матеріалу використано комплекс сучасних методів й методик, які дозволяють всебічно дослідити його структуру та властивості.

Ступінь структурування визначали за вмістом гель-фракцій. Дослідження макро- та мікроструктури матеріалу проводили на оптичному та металографічному мікроскопах. Фрактограми зламу досліджували на скануючому електронному мікроскопі. Мікроструктури досліджували, використовуючи метод пластмасографічного аналізу. При цьому, для аналізу графітонаповнених епоксикомпозитів апробовано вдосконалену методику додаткової плазмохімічної обробки поверхонь мікрошліфів. Дослідження фізико-механічних властивостей матеріалу проводили з використанням методик визначення адгезійної міцності, внутрішніх напружень, ударної міцності, модуля пружності, міцності при стиску та згині, твердості. Теплофізичні характеристики визначали методом

диференціально-термічного аналізу та при дилатометричних дослідженнях. Зносостійкість композиту встановлювали ваговим та лінійним методами. Статистичну обробку результатів досліджень та планування експерименту проводили, використовуючи відповідний математичний апарат.

Наукова новизна одержаних результатів:

- науково обґрунтованим підбором інгредієнтів та застосуванням в подальшому методу математичного планування експерименту встановлено оптимальне концентраційне співвідношення елементів системи при застосуванні епоксидно-діанової смоли ЕД-20, кремнійорганічного модифікатора та поліфункціональних наповнювачів та підтверджено покращення адгезійно-міцнісних, фізико-механічних, теплофізичних характеристик отриманих матеріалів порівнянно з існуючими;
- вперше запропоновано ступінчасту високотемпературну обробку оптимізованих наповнених епоксикремнійорганічних композитів при кінцевій температурі 483 К та показано її ефективність для підвищення зносостійкості оптимізованого композиту;
- доведено ефективність комплексної ультразвукової та ультрафіолетової обробки оптимізованого ЕКМ для підвищення його зносостійкості;
- вперше описано й апробовано для пластмасографічного аналізу графітонаповнених епоксикомпозитів методику додаткової плазмохімічної обробки поверхонь мікрошліфів;
- показано, що стабілізація процесу тертя та зношування розробленого епоксикремнійорганічного композиту в оптимальному навантажувально-швидкісному діапазоні трибоконтакту ($P=1,0\ldots1,2$ МПа, $v=3,0\ldots4,5$ м/с) відбувається за умови утворення плівки переносу або її окремих конгломератів на поверхні контртіла.

Практичне значення одержаних результатів. На основі результатів дисертаційної роботи створено нові епоксикомпозитні матеріали та захищено їх 4-ма патентами України на винахід.

На підприємстві ВАТ “ЛуАЗ” проведено дослідно-промислову перевірку та освоєно технологію нанесення захисних покриттів з підвищеною зносостійкістю на основі епоксидної матриці та різнофункціональних наповнювачів для захисту днища та надколісних ніш автомобільної техніки, а також поверхонь трибоконтакту роликів транспортних платформ. Економічний ефект від впровадження розроблених матеріалів складає 158 грн на 1 м² робочої поверхні.

Матеріали дисертації використовуються при читанні лекцій та проведенні лабораторних занять з дисципліни “Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів” у Луцькому державному технічному університеті.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які становлять суть дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. Аналіз літературних даних, вибір методів та методик досліджень, проведення експериментів та їх математична обробка здійснювалися здобувачем особисто. Постановка задач, аналіз результатів досліджень та формулювання висновків й рекомендацій проводились спільно з науковим керівником. У публікаціях зі співавторами автору належить: [1, 3, 12-15] – постановка задач, проведення експерименту, математична обробка та аналіз отриманих результатів, формулювання висновків; [2, 4, 11] – постановка задач, проведення експерименту, формулювання висновків; [10] – участь у постановці задач та обговоренні висновків. У роботах [1-4, 10] співавтори брали участь у проведенні експерименту, обговоренні та аналізі отриманих результатів; у роботах [11-15] – участь у постановці задач, формулюванні висновків.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи представлено на V-й Міжнародній науково-методичній конференції “Інтеграція освіти, науки і виробництва” (м. Луцьк, 2001 р.), IV-му Міжнародному симпозіумі “Трибофатика ISTF-2002” (м. Тернопіль, 2002 р.), XXII-й науково-практичній конференції “Композиционные материалы в промышленности” (м. Ялта, 2002 р.), Міжнародній науково-технічній конференції “Зносостійкість і надійність вузлів тертя машин ЗНМ-2003” (м. Хмельницький, 2003 р.), XXIV-й Міжнародній конференції і виставці “Композиционные материалы в промышленности” (м. Ялта, 2004 р.), I-й Міжнародній науково-технічній конференції “Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин DSR AM-I” (м. Тернопіль, 2004 р.).

Публікації. За результатами досліджень за темою дисертації опубліковано 5 статей у фахових наукових виданнях [1-5] та 6 тез доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях [10-15].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота викладена на 139 сторінках, включає 14 таблиць, 43 рисунки та містить 146 використаних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання досліджень, наведено відомості про наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та викладено основні положення, що виносяться на захист, наведено відомості про апробацію та публікації основних результатів досліджень, описано структуру та зміст роботи.

У першому розділі дисертаційної роботи на основі аналізу літературних джерел показано основні принципи розробки захисних покриттів на основі епоксидних олігомерів, які полягають у формуванні оптимальної структури епоксикомпозитного матеріалу, що забезпечує його високі техніко-експлуатаційні характеристики. Розкрито суть модифікування епоксидних смол іншими полімерами з метою регулювання параметрів структурної сітки та отримання матеріалу з наперед заданими властивостями. Обґрунтовано введення до складу полімерної матриці дисперсних та волокнистих наповнювачів, що дозволяє підвищити фізико-механічні властивості та розширити сферу використання полімеркомпозитів. Проаналізовано вплив технологічних режимів формування на структуру та властивості епоксикомпозитів.

Охарактеризовано способи компенсації негативного впливу теплових полів шляхом цілеспрямованого підбору добавок, які при підвищених температурах беруть участь у процесах структурування, в результаті чого підвищується термостійкість матеріалу, або, в окремих випадках, обумовлюють формування на поверхні контртіла плівок переносу, які забезпечують стабільність протікання фрикційних процесів у зоні трибоконтакту.

Показано доцільність використання зовнішніх фізичних полів при формуванні матеріалу, що призводить до покращення фізико-механічних характеристик епоксикомпозитів за рахунок виникнення сприятливих умов для протікання фізико-хімічної взаємодії між складовими системи.

На основі аналізу літературних джерел сформульовано основні задачі, які необхідно вирішити для отримання нових захисних покриттів на основі епоксидних композитів з високими фізико-механічними, теплофізичними й триботехнічними характеристиками.

У другому розділі охарактеризовано вибрані для вирішення поставлених у роботі завдань матеріали та методи досліджень.

Як вихідний матеріал матриці використано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), що є технологічною при переробці у вироби, твердне при нормальній або підвищених температурах без зовнішнього тиску, забезпечує високу щільність матеріалів. Для тверднення епоксидних композицій застосовували поліетиленполіамін – ПЕПА (ТУ 6-02-594-70).

Як модифікатор застосовували кремнійорганічний лак марки КО-921 (ГОСТ 16508-70-74), полімери на основі якого характеризуються високими діелектричними властивостями, хімічною інертністю, волого- та термостійкістю.

Як наповнювач ЕКМ використано комплекс інгредієнтів: лускатий графіт (ЛГ), фторопласт (Ф), вуглеволокна (ВВ), оксид міді (CuO).

Визначення фізико-механічних та теплофізичних характеристик проводили за стандартними методиками.

Границю адгезійної міцності при нормальному відриві визначали методом "грибків". Досліджуваний матеріал наносили на торцеву поверхню стержнів (грибків) з конічним виступом для самоцентрування. Дослідження проводили на розривній машині марки УММ-5 при швидкості переміщення нижньої траверси 2 мм/хв.

Для визначення міцності захисних покриттів при ударі застосовували прилад УТ-1 (ГОСТ 25812-83).

Внутрішні напруження визначали консольним методом, який базується на вимірюванні відхилення від початкового положення вільного кінця консольно закріпленої пружної металевої пластини під дією внутрішніх напружень, які виникають у покриттях.

Процеси термоокислювальної деструкції епоксикремнійорганічних композитів вивчали методом диференційно-термічного аналізу на дериватографі системи Ф.Паулік, І.Паулік, Л.Ердей. Нагрів здійснювали на повітрі в динамічному режимі зі швидкістю 10 град/хв в інтервалі температур 293...773 К.

Дослідження зносостійкості проводили на машині тертя СМЦ-2 за схемою "диск-колодка" в умовах сухого тертя. Визначення температури в зоні тертя здійснювали введенням термопари "хромель-копель" у дослідний зразок на відстані 1 мм від поверхні тертя.

Ступінь тверднення матеріалів визначали за вмістом гель-золь-фракцій шляхом виявлення не зв'язаних в полімерну сітку фрагментів на екстракторі Соксклета.

Дослідження макро- та мікроструктури матеріалу проводили на оптичному мікроскопі МБС-9 при збільшенні (x30) та металографічному мікроскопі МИМ-10 (x100...600). Фрактограми зламу досліджували на скануючому електронному мікроскопі SUPERPROBE 733 (фірми JEOL, Японія) при прискорюючій напрузі 25 кВ шляхом аналізу зображень після напилення золотом.

Дослідження структури епоксидного композитного матеріалу проводили, застосовуючи метод пластмасографії, а графітонаповнених композитів – з додатковою плазмохімічною обробкою поверхні шліфів у полі високочастотного газового розряду на установці ВУП-5М.

У роботі також використано установки для обробки епоксикомпозитів на стадії формування ультразвуком, ультрафіолетовим опроміненням та магнітним полем.

У третьому розділі представлено результати розробки епоксидних композитних матеріалів шляхом встановлення оптимального вмісту твердника, модифікатора, наповнювачів та визначення оптимального температурно-часового режиму тверднення отриманих композитних матеріалів.

Експериментально встановлено, що найвищу адгезійну міцність ($\sigma_a=28,5$ МПа) при нормальному відриві серед немодифікованих термічно оброблених ($T_k=433$ К) епоксиполімерів мають покриття з вмістом твердника ПЕПА 12 мас.ч. (рис. 1), що пояснюється утворенням у композитному матеріалі структурної сітки з оптимальною кількістю вузлів міжмолекулярного зшивання.

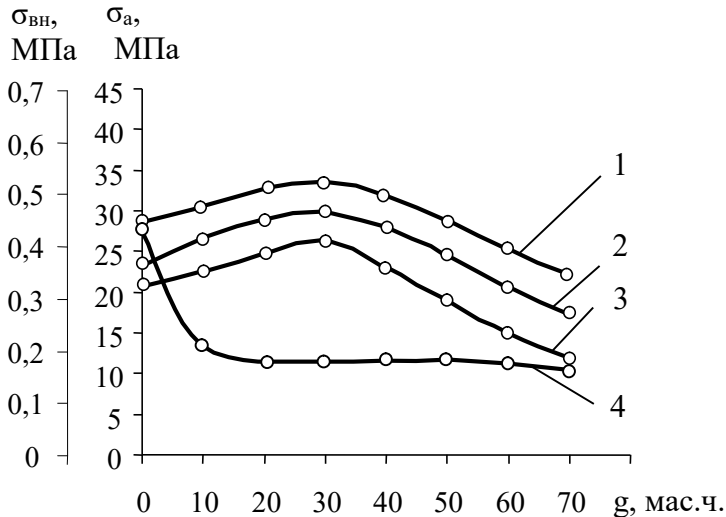


Рис. 1. Вплив модифікатора КО-921 на адгезійну міцність (1, 2, 3) та внутрішні напруження (4) термічно обробленої ($T_k=433$ К) епоксидної матриці при вмісті ПЕПА: 1, 4 – 12 мас.ч., 2 – 13 мас.ч., 3 – 11 мас.ч.

Показано, що введення твердника у кількостях 11 та 13 мас.ч. приводить до зниження адгезійної міцності епоксидної матриці до 24,1 МПа та 21,0 МПа відповідно. Вміст ПЕПА у кількості 11 мас.ч. є недостатнім для протікання повною мірою реакції полімеризації, про що свідчить зниження на 3,2 % вмісту гель-фракції у матриці, а при вищому вмісті твердника формується дефектна структура з вищими у 1,3 раза внутрішніми напруженнями.

Досліджено ефективність модифікування епоксиполімеру кремній-органічним лаком марки КО-921 в діапазоні концентрації до 70 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли ЕД-20.

Встановлено, що підвищення адгезійної міцності досліджуваних матеріалів досягається введенням до складу епоксидної композиції модифікатора в межах 10...30 мас.ч., що пов'язано зі зниженням величини внутрішніх напружень у 1,9...2,1 раза внаслідок підвищення сегментної рухливості макромолекул епоксидної матриці при введенні модифікатора. Найвище значення адгезійної міцності ($\sigma_a=33,9$ МПа) отримано при введенні КО-921 в кількості 30 мас.ч. досягається у випадку оптимального співвідношення між величиною структурованості ($G=91,8\%$) та внутрішніх напружень в системі ($\sigma_{вн}=0,24$ МПа).

Введення модифікатора в кількості понад 30 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної компоненти приводить до різкого погіршення міцнісних характеристик отриманого полімеру внаслідок надлишкового вмісту поліметилфенілсилоксану, який гальмує структуроутворюючі процеси. Експериментально визначено, що

вміст гель-фракцій знижується на 1,5...2,1 % при високому вмісті модифікатора ($g \geq 30$ мас.ч.), оскільки утворення максимальної кількості вузлів зшивання при температурі 433 К є неможливим через низьку швидкість протікання хімічних реакцій. Крім того, кремнійорганічний модифікатор в кількості понад 30 мас.ч. створює дефектну структуру, про що свідчить підвищення на 11,2 % величини внутрішніх напружень в епоксикремнійорганічному полімері.

Оскільки матеріал повинен мати високу зносостійкість в умовах сухого трибоконтакту, для наповнення епоксиполімерних систем використовували лускатий графіт та ультрадисперсний фторопласт. Подрібнене вуглеволокно та порошок оксиду міді вводили як армуючі добавки у вказану систему для підвищення, відповідно, ударної міцності та міцності при стиску, а також для покращення теплофізичних характеристик матеріалу.

Експериментально встановлено, що оптимальний вміст лускатого графіту та ультрадисперсного фторопласту становить 5...6 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли. Часткове підвищення адгезійної міцності можна пояснити утворенням оптимальної кількості додаткових вузлів зшивання між активними групами на поверхні наповнювача та функціональними групами епоксидної компоненти. Введення наповнювачів понад 8 мас.ч. призводить до погіршення адгезійної міцності через обмеження рухливості макромолекул матриці та підвищення дефектності структури, що породжує ріст внутрішніх напружень в системі.

Експериментально підтверджено, що наповнювачі незначно знижують ступінь структурування епоксидного композиту пропорційно вмісту добавки. Різке зниження вмісту гель-фракцій відбувається при введенні наповнювачів в межах 3...5 мас.ч. Це можна пояснити утворенням меншої кількості вузлів зшивання між наповнювачами і матрицею, порівняно з ненаповненою системою, що підтверджено результатами фізико-механічних досліджень композиту.

Встановлено, що підвищення вмісту наповнювачів до 7...9 мас.ч. призводить до появи піків за рахунок збільшення загальної кількості активних центрів на поверхні наповнювачів, а при вмісті наповнювачів понад 10 мас.ч. відбувається зниження ступеня структурування ЕКМ.

Загалом, введення наповнювачів сприяє підвищенню ударної міцності системи, оскільки наповнювачі є бар'єром для поширення тріщин. У цьому плані найкраще зарекомендувало себе подрібнене вуглеволокно, яке завдяки своїй витягнутій формі при вмісті 0,9 мас.ч. підвищує ударну міцність у 22,5 рази порівняно з ненаповненим епоксиполімером. Порошок оксиду міді при наповненні 16 мас.ч. незначно підвищує ударну міцність, однак забезпечує збільшення в 1,2 рази межі міцності при стиску.

У результаті досліджень підтверджено, що оптимізація температурно-часових режимів тверднення є важливим технологічним етапом розробки ЕКМ,

оскільки недостатній час полімеризації за низької температури не може забезпечити утворення достатньої кількості хімічних зв'язків між макромолекулами матриці та частинками наповнювача, а при надто високій температурі має місце зниження фізико-механічних характеристик матеріалу внаслідок руйнування зв'язків у композиті через термодеструктивні процеси та ріст внутрішніх напружень. Зокрема, показано, що температура 433 К є недостатньою для повної поліконденсації кремнійорганічних сполук, термічне тверднення яких відбувається в діапазоні температур 473...523 К.

Експериментально встановлено, що низьке значення адгезійної міцності при нормальному відриві ($\sigma_a=16,1$ МПа) немодифікованих епоксидних полімерів властиве матеріалам, сформованим при кінцевій температурі 453 К (рис. 2), оскільки така температура є межею термостійкості епоксиполімеру, що підтверджено результатами диференційно-термічного аналізу.

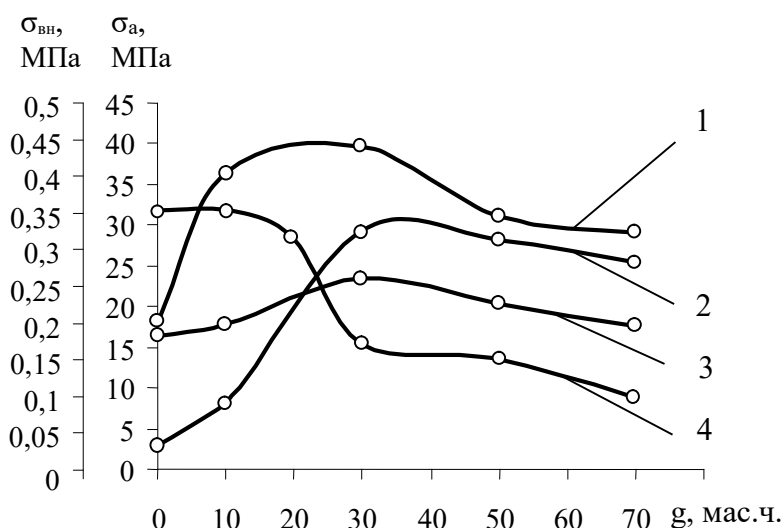


Рис. 2. Вплив модифікатора КО-921 на адгезійну міцність (1, 2, 3) та внутрішні напруження (4) епоксидної матриці при кінцевій температурі термічної обробки: 1, 4 – 483 К, 2 – 513 К, 3 – 453 К

Крім того, термообробка при $T_k=453$ К не призводить суттєвого підвищення адгезійної міцності модифікованого епоксиполімеру, що свідчить про недостатній тепловий вплив на процеси структурування за наявності кремнійорганічної добавки.

Встановлено, що кінцева температура термообробки 483 К є оптимальною для епоксикремнійорганічних полімерів, оскільки за такого режиму досягається максимальне підвищення адгезійної міцності ($\sigma_{a\max}=39,2$ МПа) та зниження внутрішніх напружень на 51,4 % при введенні модифікатора у кількості 30 мас. ч. порівняно з немодифікованим епоксиполімером. Це пов'язано з високою рухливістю конгломератів макромолекул матриці, що дозволяє повною мірою протікати реакції поліконденсації та забезпечує найвищий ступінь структурування композиту порівняно з іншими режимами термічної обробки.

Зниження адгезійної міцності на 15,2 % при збільшенні вмісту лаку КО-921 до 50 мас.ч. пов'язано з підвищенням дефектності структури в епоксикремнійорганічному полімері через надлишок модифікатора.

Проведена комплексна обробка у фізичних полях забезпечила підвищення адгезійної міцності на 10,2 % та зносостійкості в 1,7 раза внаслідок утворення додаткових вузлів зшивання між активними групами на поверхні наповнювача та функціональними групами епоксидної компоненти. Експериментально встановлено, що при цьому зростає однорідність системи та мінімізується кількість пор (рис. 3). Найвищий ступінь структурування мають композити після обробки ультразвуком та ультрафіолетовим випромінюванням. При цьому полімери без обробки фізичним полем менш здатні до активної взаємодії структурних складових на границях поділу фаз, порівняно з обробленими.

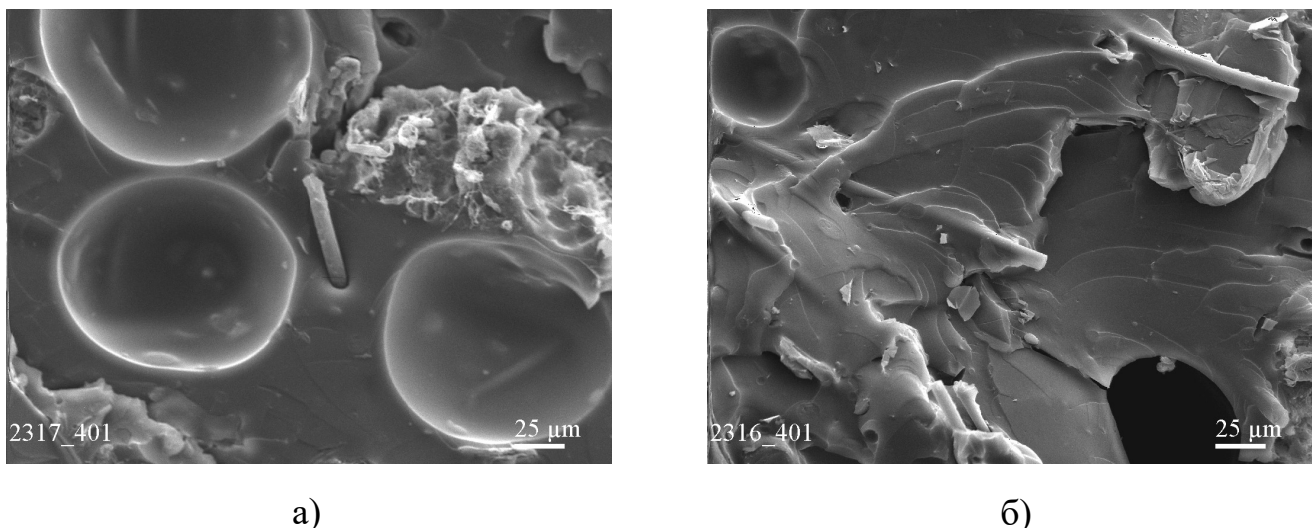


Рис. 3. Фрактограма зламу оптимізованого ЕКМ без обробки (а) та після комплексної обробки системи у фізичних полях (б).

Показано, що незалежно від часу термічної обробки найвищі внутрішні напруження ($\sigma_{\text{вн}}=0,23\ldots0,35$ МПа) характерні для епоксидного композиту, структурованого при повільному нагріві, а найнижчі – при ступінчастому ($\sigma_{\text{вн}}=0,14\ldots0,33$ МПа). Це пов'язано із локальним зшиванням макромолекул при різкому нагріві, що опосередковано підтверджує мікроаналіз зразків, підданих екстрагуванню: процес відбувається хаотично та породжує нерівномірність формування тривимірної сітки. При повільному нагріві спостерігається обмежена рухливість конгломератів через вищий ступінь структурування, і як наслідок зменшення когезійної міцності системи (границя міцності на стиск та твердість зменшуються на 16,7% і 23,4% відповідно, порівняно зі ступінчастим нагрівом).

Таким чином, експериментально підтверджено, що ступінчастий нагрів ЕКМ є оптимальним. Зокрема, він забезпечує максимально повне структурування ($G=94,3\%$) через найвищу сумарну величину виниклих первинних вузлів

зшивання на першому етапі та створює оптимальні умови для конформаційних перетворень та релаксації залишкових напружень ($\sigma_{\text{вн}}=0,18$ МПа) на заключній стадії термотверднення.

У четвертому розділі представлено аналіз результатів досліджень експлуатаційних характеристик епоксикремнійорганічних композитів.

Обґрунтовано, що одночасне використання різнофункціональних наповнювачів пов'язане з процесами їх взаємодії із матрицею та між собою і суттєво впливає на триботехнічні характеристики. Для вивчення процесів комплексного впливу наповнювачів на основі апріорних даних застосовано метод багатofакторного планування експерименту. При цьому, факторами, які визначають властивості наповнених систем, вибрано комплекс наповнювачів із лускатого графіту (X_1), фторопласту (X_2), оксиду міді (X_3) та вуглеволокна (X_4), а параметром оптимізації – інтенсивність вагового зношування (I_g , 10^{-3} г/км). Дослідження проводили при $v=0,2$ м/с і $P=0,6$ МПа в умовах сухого тертя.

У результаті розрахунку коефіцієнтів лінійної і парної взаємодії та їх подальшої перевірки за критеріями Кохрена та Фішера отримано відповідний поліном першого ступеня: $y=8,54-1,36X_1+0,93X_2-3,86X_3-3,5X_4+1,01X_1X_3+1,5X_3X_4$, що адекватно описує результати даного експерименту.

Подальше застосування методу крутого сходження за градієнтом по поверхні відклику дозволило встановити оптимальне співвідношення інгедієнтів: $X_1=7,1$ мас.ч., $X_2=5,04$ мас.ч., $X_3=11,0$ мас.ч., $X_4=0,5$ мас.ч. Оскільки подальший спуск призводить до підвищення інтенсивності вагового зношування, тому отриманий результат ($I_g=0,5 \cdot 10^{-3}$ г/км) прийнятий за оптимальний. Слід зазначити, що отримане концентраційне співвідношення інгредієнтів системи корелює з максимальними значеннями границі міцності на стиск ($\sigma_{\text{ст}}=32,4$ МПа) та ударної міцності ($A=54,8$ Дж).

Зносостійкість ЕКМ значною мірою залежить від ступеня зшивання епоксиолімерної матриці, що визначає ймовірність відокремлення неструктурованих ланок олігомеру при трибовзаємодії і їх негативний вплив вцілому. Встановлено кореляцію між триботехнічними і фізико-механічними характеристиками досліджуваних систем, зокрема симбатне зростання показників зносостійкості, границі міцності при стиску при збільшенні температури термостатування до 483 К та їх підвищення при комплексній обробці фізичними полями, що особливо відчутно при жорсткіших режимах фрикційного навантаження ($P \geq 1$ МПа).

Досліджено вплив КО-921 на зносостійкість ЕКМ в широкому діапазоні температурно-часового впливу. Встановлено, що ефект модифікування епоксидної смоли кремнійорганічним лаком КО-921 не прослідковується при

швидкості ковзання до 1,0 м/с, коли в зоні контакту виникають невисокі температури (313...333 К). Експлуатація епоксикремнійорганічного композиту при жорсткіших навантажувально-швидкісних режимах ($v=1,5$ м/с) дозволила оцінити роль поліметилфенілсилоксану, як термостабілізуючого фактора, що підвищує в 1,6 раза зносостійкість епоксикомпозиту при введенні в невеликих кількостях лаку КО-921 (10 мас. ч.).

Показано, що оптимальний вміст модифікатора, за якого знос є мінімальним ($I_g=0,75 \cdot 10^{-3}$ г/км), становить 30 мас. ч. КО-921 на 100 мас.ч. епоксидної компоненти після термічної обробки при кінцевій температурі 433 К. Це концентраційне співвідношення забезпечує найвищу зносостійкість системи, що підтверджується результатами ДТА.

Наведені результати експериментальних досліджень впливу кількості кремнійорганічного лаку КО-921 за різних температур тверднення на інтенсивність зношування при навантаженні $P=1,2$ МПа та швидкості ковзання $v=1,5$ м/с вказують, що при кінцевій температурі 483 К інтенсивність зношування модифікованого епоксидного композиту нижча на 32,8 %, ніж за температури 513 К, що пояснюється початком процесів термоокислювальної деструкції та виникненням додаткових внутрішніх напружень в системі. При температурі 513 К відбувається руйнування епоксидної компоненти та відрив органічних радикалів від силоксанового скелету поліметилфенілсилоксану, що супроводжується зростанням інтенсивності зношування та зниженням вмісту гель-фракції у композиті.

Експериментально встановлено, що мінімум на кривій зношування епоксикремнійорганічного композиту термічно обробленого при температурі 483 К спостерігається у разі введення 30 мас.ч. лаку КО-921 і пояснюється ефектом формування сервовитної плівки у вузлах тертя при оптимальних умовах. При трибовзаємодії модифікованого ЕКМ відбувається самоорганізоване формування плівки переносу (рис. 4, а) або її фрагментів на поверхні металевго контртіла та проміжної плівки (рис. 4, б), яка при цьому є найбільш чітко вираженою та рівномірною.

За структурою вказана плівка являє собою окремі конгломерати, об'єднані в стійкі угруповання з яскраво вираженою орієнтацією в напрямку тертя, що підтверджується результатами електронної мікроскопії та породжує стабілізацію фрикційних характеристик ЕКМ для такого роду трибоконтракту. При терті ЕКМ, сформованого без компонента КО-921, відбувається інтенсифікація термоокислювальних процесів, зокрема утворення пероксидів на поверхні композиту, які ініціюють окислення поверхні контртіла. За таких умов утворення плівки переносу є неможливим, що підтверджується погіршенням експлуатаційних характеристик матеріалу. У випадку застосування

модифікованого ЕКМ матриця є стійкою до підвищених температур і плівка переносу формується на ювенільній поверхні контртіла, що підтверджується також результатами електронної мікроскопії.

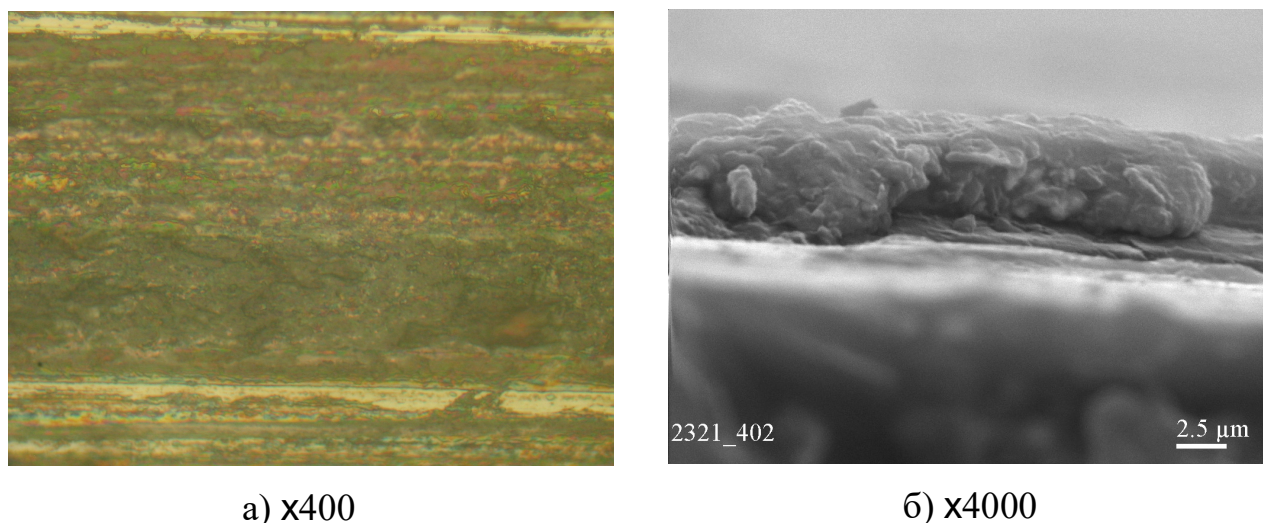


Рис. 4. Фрагменти плівки переносу (а) та фрактограма проміжної плівки (б) при оптимальних умовах трибоконтакту

Експериментально встановлено, що направлене введення в епоксиполімерну систему кремнійорганічної складової в кількості 30 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли при додатковому термічному впливі дозволяє отримати ЕКМ з найвищою зносостійкістю ($I_g=0,5$ мг/км при $P=1,2$ МПа та $v=1,5$ м/с) за рахунок оптимальної щільності структурної сітки та протікання процесів самоорганізації при трибоконтакті.

Експлуатація епоксикремнійорганічних композитних матеріалів за жорсткіших режимів без погіршення їх властивостей можлива внаслідок зміни конструкції вузла тертя. Це забезпечує більш інтенсивний тепловідвід та підвищує навантажувальну здатність трибопари. Використання розробленого композитного матеріалу у вигляді покриття дозволяє знизити його інтенсивність вагового зносу до 0,35 мг/км для модифікованого композиту (рис. 5) при $P=1,2$ МПа та $v=3,0$ м/с. При збільшенні швидкості до 4,5 м/с відбувається інтенсивне виділення тепла в зоні контакту і через низьку термостійкість немодифікований композит різко втрачає трибовластивості. Для композиту з вмістом лаку КО-921 в кількості 30 мас.ч. спостерігається стабілізація триботехнічних характеристик за даного режиму тертя.

Таким чином, технологічне застосування розроблених ЕКМ у вигляді покриттів дозволяє значно підвищити швидкісно-навантажувальні режими тертя, особливо у випадку введення в систему кремнійорганічної складової в оптимальному концентраційному співвідношенні.

У п'ятому розділі конкретизовано способи формування та представлено характеристики покриттів на основі розроблених ЕКМ. Встановлено, що найнижчі внутрішні напруження ($\sigma_{\text{вн}}=0,03$ МПа) мають епоксиполімери, структуровані за температури 293 К протягом 240 хв з наступною ізотермічною обробкою при 393 К протягом 60 хв. Підвищення тривалості тверднення при температурі 293 К приводить до підвищення внутрішніх напружень у 2,3 раза. При цьому покриття товщиною максимально до 300 мкм забезпечує видалення залишків толуолу, який негативно впливає на сформовану багатокомпонентну систему.

З метою покращення адгезійної міцності та виходячи з технологічних умов запропоновано використати двошарове покриття: нижній (адгезійний) шар являє собою композицію епоксидно-діанової смоли ЕД-20 і кремнійорганічного лаку КО-921, що забезпечує підвищені термостійкість та адгезійну міцність до субстрату ($\sigma_a = 39,8$ МПа); верхній (зносостійкий) шар складається з оптимізованого епоксикремнійорганічного наповненого композитного матеріалу.

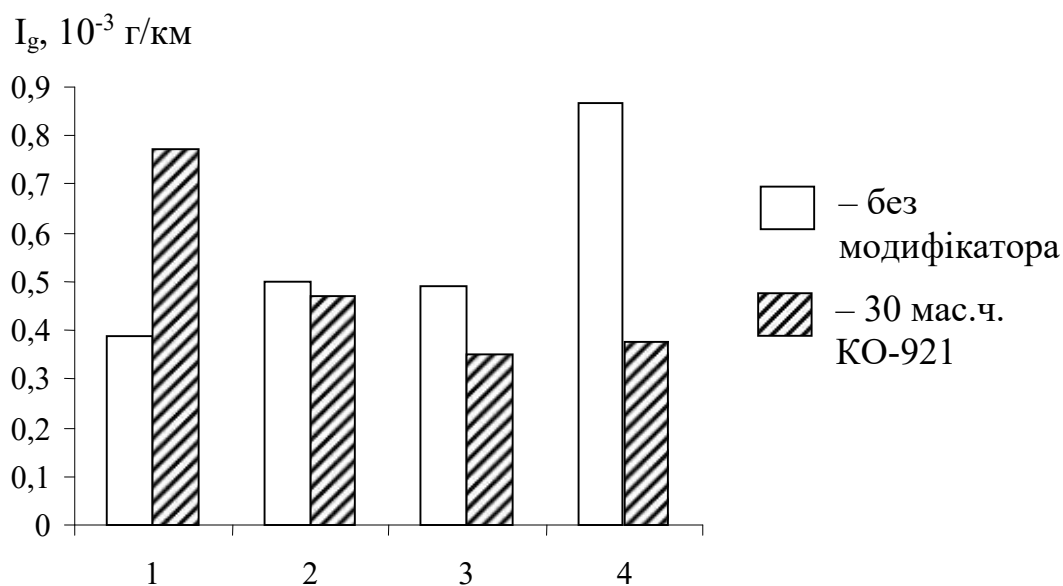


Рис. 5. Залежність інтенсивності зношування епоксикомпозитних покриттів термічно оброблених ($T_k=483$ К) при тиску 1,2 МПа від швидкості ковзання: 1 – 0,6 м/с; 2 – 1,5 м/с; 3 – 3,0 м/с; 4 – 4,5 м/с

Розроблена технологія використана при виготовленні захисних покриттів днища, надколісних ніш автобусів та роликів транспортних платформ для переміщення каркасів автобусів на ВАТ “ЛуАЗ”. Вказані механізми працюють в умовах значних динамічних навантажень, абразивного зношування, перепадів температур, сухого тертя ковзання та кочення.

Розроблені композитні матеріали придатні до експлуатації в діапазоні температур від 258 К до 383 К в різних агресивних рідинних та газових

середовищах (фарбувальна ділянка, вода, повітря). Економічний ефект від впровадження розроблених матеріалів складає 158 грн на 1 м² робочої поверхні.

ВИСНОВКИ

1. Оптимізовано склад епоксиполімеру при застосуванні кремнійорганічного модифікатора КО-921. Показано, що його введення в кількості 30 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли ЕД-20 при термообробці $T_k=483$ К призводить до підвищення адгезійної міцності на 58,4 % порівняно з немодифікованим епоксиполімером, а також зниження в 1,9 раза внутрішніх напружень у системі. Це пояснюється підвищенням сегментної рухливості макромолекул епоксикремнійорганічної матриці при введенні модифікатора.

2. Розроблено нову технологію формування епоксикремнійорганічних композитів. Визначено, що оптимальним температурно-часовим параметром обробки розробленого матеріалу є ступінчастий його нагрів за схемою: 24 год при 293 К, 1 год при 333 К, 1 год при 393 К, 1 год при 453 К, 4 год при 483 К, що сприяє стабілізації процесу при появі первинних вузлів зшивання та ефективному проходженні конформаційних перетворень на основній стадії.

3. Методом багатофакторного планування експерименту (метод Бокса-Уілсона) оптимізовано склад епоксикомпозитного матеріалу при застосуванні поліфункціональних інгредієнтів: лускатий графіт – 7,1 мас.ч.; оксид міді – 5,04 мас.ч.; фторопласт – 11,0 мас.ч.; вуглеволокно – 0,9 мас.ч.

4. Підтверджено покращення фізико-механічних та триботехнічних властивостей композитного матеріалу при комплексній обробці у фізичних полях. Встановлено підвищення в 1,7 раза зносостійкості оптимізованого наповненого епоксикремнійорганічного композиту при додатковій комплексній ультразвуковій та ультрафіолетовій їх обробці порівняно з необробленою системою в умовах сухого тертя. Оптимальна частота коливань при обробці ультразвуком становила 22 кГц, амплітуда коливань – 10...40 мкм, тривалість – 6 хвилин. Оптимальна тривалість обробки ультрафіолетовим випромінюванням складала 22 хв.

5. Експериментально підтверджено, що стабілізація процесу тертя та зношування розробленого епоксикремнійорганічного композиту відбувається за умови утворення самоорганізованої проміжної плівки або її фрагментів у зоні трибоконтакту, появу якої ініціює кремнійорганічна складова.

6. Отримано двошарові покриття, що складаються з нижнього адгезійного шару епоксикремнійорганічного полімеру ($\sigma_{a\max}=39,2$ МПа) та робочого зносостійкого шару оптимізованого композиту. Встановлено, що мінімальні внутрішні напруження ($\sigma_{вн}=0,03$ МПа) характерні для нижнього шару покриття,

сформованого за температури 293 К протягом 240 хв з подальшою термічною обробкою при 393 К протягом 60 хв.

7. Застосування розроблених епоксикремнійорганічних композитів у вигляді покриттів дозволило знизити інтенсивність зношування до 0,35 мг/км при $P=1,2$ МПа і $v=4,5$ м/с в умовах сухого тертя. Економічний ефект від впровадження розробленого матеріалу як захисного покриття днища і надколісних ніш автомобільної техніки складає 158 грн на 1 м² робочої поверхні.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кальба Є.М., Савчук П.П., Мельник О.Д., Кашицький В.П. Розробка складу та дослідження триботехнічних характеристик полімеркомпозитів на основі епоксидної смоли // Наукові нотатки Луцького державного технічного університету: Міжвузівський збірник. Випуск 6. – Луцьк: ЛДТУ. – 2000. – С. 87-93. *(Дисертант брав участь у постановці задач, проведенні експерименту, математичній обробці та аналізі отриманих результатів, формулюванні висновків).*
2. Савчук П., Кашицький В., Габрусєв В. Порівняльна оцінка триботехнічних властивостей епоксиполімерів і фторопласту // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2001. – Т. 6. – № 3. – С. 13-17. *(Дисертант брав участь у постановці задач, проведенні експерименту, формулюванні висновків).*
3. Савчук П.П., Кашицький В.П., Божко Т.Е., Мельник О.Д. Вплив макросередовища на зносостійкість епоксидного компаунду при фрикційній взаємодії // Наукові нотатки Луцького державного технічного університету: Міжвузівський збірник. Випуск 8. – Луцьк: ЛДТУ. – С. 208-213. *(Дисертант брав участь у постановці задач, проведенні експерименту, математичній обробці та аналізі отриманих результатів, формулюванні висновків).*
4. Савчук П.П., Рудь В.Д., Кашицький В.П., Мельник О.Д. Оптимізація складу та дослідження впливу різнофункціональних наповнювачів на зносостійкість епоксикомпозиту // Наукові нотатки Луцького державного технічного університету: Міжвузівський збірник. Випуск 9. – Луцьк: ЛДТУ. – С. 244-249. *(Дисертант брав участь у постановці задач, проведенні експерименту, формулюванні висновків).*
5. Кашицький В.П. Розробка епоксидних композитів модифікованих полісилоксановим лаком // Наукові нотатки Луцького державного технічного університету: Міжвузівський збірник. Випуск 14. – Луцьк: ЛДТУ. – С. 125-129.
6. Деклараційний патент на винахід 49436 А України, МВК С08К3/00, F16C33/00. Антифрикційний полімеркомпозиційний матеріал / Є.М. Кальба, П.П. Савчук, В.П. Кашицький, А.В. Букетов. – №20011284436; Заявл. 27.12.01; Опубл.

- 16.09.2002. Бюл. №9. *(Дисертант здійснив пошук аналогів й прототипу, підготував формулу і опис винаходу).*
7. Деклараційний патент на винахід 60554 А України, МВК С08К3/00. Антифрикційний полімеркомпозиційний матеріал / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, А.В. Маткова. – №2002129699; Заявл. 04.12.02; Опубл. 15.10.2003. Бюл. №10. *(Дисертант здійснив пошук аналогів й прототипу, підготував формулу і опис винаходу).*
8. Деклараційний патент на винахід 71272 А України, МВК С08L63/00. Епоксидне в'язуче / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, В.Б. Іванюк. – №20031211658; Заявл. 16.12.03; Опубл. 15.11.2004. Бюл. №11. *(Дисертант підготував формулу, реферат і опис винаходу).*
9. Деклараційний патент на винахід 72410 А України, МВК С08К3/00. Антифрикційний полімеркомпозиційний матеріал / П.П. Савчук, В.П. Кашицький. – №20031212973; Заявл. 30.12.03; Опубл. 15.02.2005. Бюл. №2. *(Дисертант здійснив пошук аналогів й прототипу, підготував формулу і опис винаходу).*
10. Савчук П.П., Кальба Є.М., Редько Р.Г., Кашицький В.П. До питання про структурне наповнення та трибоприспосовування епоксикомпозитних матеріалів // Матеріали V-ї міжнародної науково-методичної конференції. – Луцьк: ЛДТУ. – 2001. – С. 127-128. *(Дисертант брав участь у постановці задач та обговоренні висновків).*
11. Савчук П.П., Кашицький В.П. Нові антифрикційні епоксикомпозити модифіковані поліметилфенілсилоксановим лаком КО-921 // Матеріали 22-ї міжнародної науково-практичної конференції. – Київ: УІЦ “Наука. Техніка. Технологія”. – 2002. – С. 162-163. *(Дисертант брав участь у постановці задач, проведенні експерименту, формулюванні висновків).*
12. Савчук П.П., Кашицький В.П., Кальба Є.М. Методи підвищення триботехнічних характеристик епоксикомпозитів // Матеріали 4-го міжнародного симпозіуму трибофатики “ISTF-2002”. – Тернопіль: ТДТУ. – 2002. – С. 778-780. *(Дисертант брав участь у постановці задач, проведенні експерименту, математичній обробці та аналізі отриманих результатів, формулюванні висновків).*
13. Савчук П.П., Кашицький В.П. До питання про підвищення триботехнічних характеристик епоксикомпозитів // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції “Зносостійкість і надійність вузлів тертя машин (ЗНМ-2003)”. – Хмельницький: ТУП. – 2003. – С. 54-55. *(Дисертант брав участь у постановці задач, проведенні експерименту, математичній обробці та аналізі отриманих результатів, формулюванні висновків).*
14. Савчук П.П., Кашицький В.П. Особливості розробки термо- та зносостійких епоксикомпозитів для вузлів тертя сільськогосподарських машин // Матеріали 1-ї міжнародної науково-технічної конференції “Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин (DSR AM-I)”. – Тернопіль: ТДТУ. – 2004. – С. 548-

550. (Дисертант брав участь у постановці задач, проведенні експерименту, математичній обробці та аналізі отриманих результатів, формулюванні висновків).

15. Савчук П.П., Кашицький В.П. Технологічні основи формування термостійких епоксикомпозитних покриттів триботехнічного призначення // Матеріали 24-ї міжнародної конференції і виставки. – Київ: УІЦ “Наука. Техніка. Технологія”. – 2004. – С. 202. (Дисертант брав участь у постановці задач, проведенні експерименту, математичній обробці та аналізі отриманих результатів, формулюванні висновків).

АНОТАЦІЯ

Кашицький В.П. *Розробка захисних покриттів з підвищеною зносостійкістю на основі епоксидних композитів, модифікованих кремнійорганічним лаком КО-921.* – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. – Луцький державний технічний університет, Луцьк, 2006 р.

Оптимізовано склад модифікованого епоксикомпозиту та досліджено вплив різнофункціональних наповнювачів на фізико-механічні та триботехнічні характеристики матеріалу. Встановлено оптимальні температурно-часові режими обробки епоксикомпозиту.

Показано ефективність додаткової комплексної ультразвукової та ультрафіолетової обробки композиції на стадії формування для підвищення ступеня структурованості та зносостійкості отриманих матеріалів. Досліджено структурні зміни та умови стабілізації фрикційного процесу для розроблених епоксикомпозитів.

Створено нові багат шарові епоксикремнійорганічні композитні покриття. Основні результати роботи набули промислового впровадження для захисту днища та надколісних ніш автомобільної техніки, а також роликів транспортних платформ на підприємстві ВАТ “ЛуАЗ”.

Ключові слова: епоксикомпозитний матеріал, покриття, модифікатор, наповнювач, адгезійна міцність, фізичні поля, зносостійкість, сервовитна плівка.

АННОТАЦИЯ

Кашицкий В.П. *Разработка защитных покрытий с повышенной износостойкостью на основе эпоксидных композитов, модифицированных кремнийорганическим лаком КО-921.* – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. – Луцкий государственный технический университет, Луцк, 2006 г.

В работе изучены закономерности структурирования и свойства эпоксидных композитов отверженных ПЭПА при введении в систему термостойкого модификатора КО-921 и разнофункциональных наполнителей.

Установлено, что максимальную адгезионную прочность ($\sigma_a = 39,2$ МПа) при нормальном отрыве имеют эпоксикремнийорганические полимеры после ступенчатой термической обработки ($T_k = 483$ К) с оптимальным содержанием ПЭПА 12 мас.ч. Максимальные значения адгезионной прочности модифицированных эпоксиполимеров достигнуты при введении КО-921 в количестве 30 мас.ч., вследствие максимального структурирования ($G = 94,3\%$) и снижения внутренних напряжений ($\sigma_{вн} = 0,18$ МПа).

Зафиксированы рост на 10,2 % адгезионной прочности, повышение однородности системы и минимизация количества пор после комплексной ультразвуковой и ультрафиолетовой обработки композиции в физических полях, что подтверждено результатами электронной микроскопии. Наивысшую степень структурирования имеют полимеры после комплексной обработки ультразвуком и ультрафиолетовым излучением.

Исследовано влияние разнофункциональных наполнителей на физико-механические и триботехнические свойства композитов. Методом многофакторного планирования эксперимента установлены оптимальные границы варьирования использованных инградиентов.

Применение метода крутого спуска за градиентом по поверхности отклика позволило установить оптимальное соотношение инградиентов, при котором интенсивность весового износа есть минимальной ($I_g = 0,5 \cdot 10^{-3}$ г/км). Полученное концентрационное соотношение коррелирует с максимальными значениями границы прочности при сжатии ($\sigma_{сж} = 32,4$ МПа) и ударной прочности ($A = 54,8$ Дж).

Результаты экспериментальных исследований влияния КО-921 при разных температурах отвержения на интенсивность изнашивания при нагрузке $P = 1,2$ МПа и скорости скольжения $v = 1,5$ м/с указывают, что при конечной температуре 483 К интенсивность изнашивания модифицированного эпоксидного композита ниже на 49,4% и 24,7%, чем при температуре 513 К и 453 К соответственно.

Зафиксировано, что при трибовзаимодействии модифицированного эпоксикомпозиционного материала (30 мас.ч. лака КО-921) в отдельных случаях происходит самоорганизованное формирование фрагментов пленки переноса на поверхности металлического контртела и промежуточной пленки. За структурой они представляют собой отдельные конгломераты, объединенные в устойчивые угруппирования с ярко выраженной ориентацией в направлении трения, что благоприятствует стабилизации фрикционных характеристик ЭКМ.

Использование разработанного композиционного материала в виде покрытия привело к снижению его интенсивности изнашивания до 0,35 мг/км для модифицированного композита при $P=1,2$ МПа и $v=4,5$ м/с.

С целью улучшения адгезионной прочности и исходя с технологических условий использовано двухслойное покрытие: нижний (адгезионный) слой, с повышенной термостойкостью и адгезионной прочностью к субстрату, и верхний – износостойкий слой.

Установлено, что минимальные внутренние напряжения ($\sigma_{вн}=0,03$ МПа) характерны для нижнего слоя покрытия, сформированного при температуре 293 К на протяжении 240 минут с последующей термической обработкой при 393 К на протяжении 60 минут. Повышение продолжительности отверждения при температуре 293 К вызывает повышение внутренних напряжений в 2,3 раза. При этом покрытие с максимальной толщиной 300 мкм обеспечивает оптимальные триботехнические характеристики ЭКМ. Экономический эффект от внедрения разработанных материалов составляет 158 грн на 1 м² рабочей площади.

Ключевые слова: эпоксикомпозиционный материал, покрытие, модификатор, наполнитель, адгезионная прочность, физические поля, износостойкость, сервовитная плёнка.

ANNOTATION

Kashytsky V.P. *Development of higher wear resistance protective coatings on epoxy composite base modified with silicon organic lacquer KO-921.* – The Manuscript.

Thesis for a candidate's degree in Technical Science by speciality 05.02.01 – Material Science. – Lutsk State Technical University, Lutsk, 2006.

Compound of modified epoxy composite is optimized, effects of fillers with different functions on material's physical, mechanical and tribotechnical characteristics are investigated. Optimum temperature and time treatment conditions of epoxy composites are determined.

Effectiveness of additional complex ultrasonic and ultraviolet composition treatment at the stage of its forming in order to increase the structurization and wear resistance of obtained materials is shown. Structural changes and stabilization conditions of friction process for the developed epoxy composites are investigated.

New multilayer epoxy silicon organic composite coatings are developed. Principal outcomes of the research found an industrial application for proofing automobile bottoms and wheel arches as well as transport platform rollers at the VAT "Luaz" enterprise.

Keywords: epoxy composite material, coating, modifier, filler, adhesive strength, physical fields, wear resistance, transfer film.

Підписано до друку 15.11.2006 р. Формат 60×90/16 арк.
Папір офс. Друк цифровий. Гарнітура Times.
Ум. друк. арк. 0,75. Наклад 100. Зам. 2652

Редакційно-видавничий відділ
Луцького державного технічного університету
43018, м. Луцьк, Львівська, 75
Свідоцтво Держкомінформу України ДК №371
від 05.03.2001 р.

