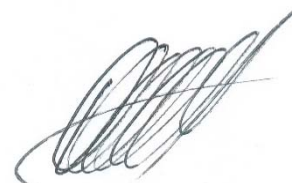


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАТРУНЧИК ДМИТРО МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 621.793:629.7.03

**РОЗРОБКА ЗАХИСНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ З
КЕРОВАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ДЛЯ ЛОПАТОК ВХІДНОГО
НАПРАВЛЯЮЧОГО АПАРАТУ АВІАДВИГУНІВ**

Спеціальність 05.02.01 Матеріалознавство
Технічні науки (13 Механічна інженерія)

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Луцьк – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Луцькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Савчук Петро Петрович,

Луцький національний технічний університет,
ректор Луцького національного технічного університету,
професор кафедри матеріалознавства.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Букетов Андрій Вікторович,

Херсонська державна морська академія,
завідувач кафедри транспортних технологій;

кандидат технічних наук, доцент

Гарматюк Ростислав Тарасович,

Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія
ім. Тараса Шевченка,
доцент кафедри теорії і методики
трудового навчання та технологій.

Захист відбудеться «04» липня 2020 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 32.075.02 при Луцькому національному технічному університеті за адресою: 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, ауд. 216.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Луцького національного технічного університету за адресою: 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75 та на сайті спецради К 32.075.02 (<http://lutsk-ntu.com.ua/uk/k-3207502-specialnist-050201-materialoznavstvo>).

Автореферат розісланий «03» червня 2020 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради К 32.075.02,
кандидат технічних наук, доцент



Д.А. Гусачук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Підвищення терміну експлуатації військової та транспортної авіаційної техніки має важливе стратегічне значення для розвитку економіки та забезпечення обороноздатності країни. Комплексний вплив атмосферних факторів, абразивних частинок та агресивних середовищ спричиняє інтенсивне руйнування поверхні деталей авіаційної техніки, що призводить до втрати конструкційної міцності та функціональності, потребує заміни деталей або відновлення пошкоджених поверхонь. Вирішення проблем, пов'язаних із забезпеченням тривалого захисту деталей авіаційної техніки, підвищить надійність роботи машин та механізмів, зменшить витрати вичерпаних природних ресурсів, а також дозволить знизити витрати на проведення ремонтних робіт, що визначає актуальність наукової роботи та важливість досліджень в напрямку розробки корозійно- та абразивостійких матеріалів.

Найпоширенішим способом захисту авіаційної техніки від комплексного впливу атмосферних факторів є використання композитних покриттів на полімерній основі, які мають малу густину та високу стійкість до агресивних середовищ. Зокрема, композиції на епоксидному в'язучому характеризуються технологічністю, що дозволяє модифікувати структуру полімерної сітки, вводити дисперсні наповнювачі та формувати покриття складного профілю без використання специфічного і дороговартісного обладнання. Епоксикомпозитні покриття забезпечують високу адгезійну міцність, твердість та хімічну стійкість, що дозволяє використовувати їх для захисту зовнішньої поверхні фюзеляжів та корпусів реактивних двигунів від руйнування.

У роботах вітчизняних та закордонних науковців описано особливості структурування полінаповнених та модифікованих полімеркомпозитних матеріалів на основі епоксидних в'язучих, охарактеризовано вплив обробок у фізичних полях на формування структури та властивості епоксикомпозитних матеріалів. Однак, дані матеріали зазвичай мають вузьке функціональне призначення, що не дозволяє їх експлуатувати у складних умовах, притаманних для авіаційної техніки. Тому постає задача розробки технології формування та складу епоксикомпозитного матеріалу, що має високу технологічність, адгезійну міцність та стійкість до комплексного впливу експлуатаційних факторів. При цьому необхідно забезпечити умови для формування заданої структури епоксикомпозиту, яка характеризується високою щільністю хімічних зв'язків та пружністю полімерної сітки при оптимальному наповненні. Це дозволить усунути типові недоліки епоксикомпозитних покриттів, зокрема низьку ударну в'язкість та чутливість до циклічної зміни температури.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні наукові результати роботи отримано у процесі виконання науково-дослідних робіт у Луцькому національному технічному університеті та в рамках держбюджетної теми (номер державної реєстрації: 0117U000630) "Розробка комплексу керованих

властивостей багатодолинних напівпровідників та полімеркомпозитних матеріалів для функціонування в екстремальних умовах експлуатації”.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є визначення особливостей структурування та модифікації структури захисних епоксикомпозитних покриттів, наповнених високодисперсними апретованими частинками оксидів металів, в умовах керованого впливу фізичних полів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні завдання:

- дослідити вплив дрібнодисперсних оксидів металів на фізико-механічні характеристики епоксикомпозитів за умови їх інтенсивного структурування;
- дослідити механізм структурування модифікованих епоксикомпозитів, наповнених апретованими частинками оксиду металу;
- визначити оптимальний вміст термопластичного модифікатора, розчинника та дрібнодисперсного наповнювача в епоксиполімерній матриці;
- дослідити фізико-механічні властивості та структуру епоксикомпозитів, додатково оброблених у фізичних полях;
- розробити технології апретування наповнювача та формування двошарових модифікованих епоксикомпозитних покриттів.

Об’єкт дослідження – модифіковані епоксикомпозитні матеріали, наповнені апретованими порошками оксидів металів.

Предмет дослідження – процеси структурування та властивості модифікованих епоксикомпозитних матеріалів, наповнених апретованими частинками оксидів металів.

Методи дослідження. Застосовано методики визначення адгезійної міцності, міцності при стисканні, залишкових напружень, ударної в’язкості, ударної міцності, вмісту гель-фракції, абразивної стійкості, теплостійкості, стійкості до циклічної зміни температур, корозійної стійкості, водопоглинання. Теплофізичні характеристики визначали методом диференціально-термічного аналізу, використовуючи дериватограф «Thermoscan-2». ІЧ-спектри отримано на спектрометрі марки «IRAffinity-1». Дослідження макро- та мікроструктури проведено на металографічному мікроскопі МИМ-10 та на електронному мікроскопі РЕМ-106И. Оптимізацію складу матеріалу здійснювали з використанням математичного методу багатофакторного планування експерименту та градієнтного спуску по поверхні відгуку.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше встановлено, що введення в оптимальній кількості полівінілхлориду, розчиненого циклогексаноном, призводить до підвищення адгезійної міцності та ударної в’язкості епоксиполімерів за рахунок формування взаємопроникаючих полімерних сіток та утворення хімічних зв’язків між макромолекулами компонентів.

2. Вперше встановлено, що апретування розчином полівінілхлориду порошку титан (IV) оксиду забезпечує утворення на поверхні частинок додаткових хімічних зв'язків з активними групами макромолекул полівінілхлориду.

3. Вперше встановлено, що інтенсивне структурування полімеркомпозитів у тепловому полі необхідно проводити з врахуванням розмірних параметрів сформованих покриттів, що пов'язано з акумулюванням теплової енергії в об'ємі матеріалу, яка визначає ступінь напруженого стану системи.

4. Вперше встановлено, що оптимальна тривалість ультразвукової обробки композицій, наповнених порошком титан (IV) оксиду та модифікованих полівінілхлоридом, забезпечує підвищення механічних характеристик епоксикомпозитів за рахунок інтенсифікації фізико-хімічних процесів та зниження дефектності структури епоксикомпозитів.

5. Вперше встановлено, що модифікація структури епоксикомпозитів розчином полівінілхлориду забезпечує підвищення стійкості матеріалу до впливу циклічної зміни температури, що пов'язано з формуванням гнучких взаємопроникаючих полімерних сіток епоксикомпозиту, які здатні пружно деформуватись без руйнування хімічних зв'язків.

6. Вперше визначено вплив послідовності процесу компонування інгредієнтів на формування щільної структури епоксикомпозитних покриттів, що містять апретовані частинки наповнювача, за рахунок направленої ініціювання утворення максимальної кількості зв'язків між активними групами компонентів композиції.

Практичне значення роботи.

На основі експериментальних досліджень і аналізу отриманих результатів розроблено нові захисні епоксикомпозитні покриття, які захищені відповідними патентами. В результаті порівняльної оцінки властивостей розроблених матеріалів визначено переваги над світовими та вітчизняними аналогами. Розроблено технологію модифікування та інтенсивного структурування захисних багат шарових епоксикомпозитних покриттів, наповнених високодисперсними частинками оксидів металів з обробкою композиції ультразвуком. Визначено склад адгезійного шару, наповненого високодисперсним порошком хром (III) оксиду, що забезпечує високу адгезійну міцність між поверхнею лопатки та зовнішнім експлуатаційним шаром. Оптимізовано склад експлуатаційного шару, наповненого апретованим високодисперсним порошком титан (IV) оксиду, що має високу стійкість до циклічної зміни температури, впливу агресивних середовищ та впливу абразивних частинок, що рухаються у потоці.

Впровадження розроблених епоксикомпозитних покриттів з високими фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками для захисту лопаток вхідного направляючого апарату реактивного двигуна літака від впливу абразивних частинок та корозії проведено на підприємстві ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» м. Луцька.

Теоретичні та практичні результати досліджень використані в навчальному процесі при викладанні дисциплін “Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів”, “Композити та дисперсні матеріали” та інших споріднених дисциплін при підготовці фахівців в Луцькому національному технічному університеті за спеціальністю 132 “Матеріалознавство”.

Особистий внесок автора. В дисертаційну роботу ввійшли наукові результати, які отримані автором самостійно. Визначення актуальності роботи, аналіз літературних даних, вибір методів та методик досліджень, виготовлення зразків, проведення експериментів та їх математична обробка здійснювалися здобувачем особисто. Визначення мети, постановка задач, обговорення результатів експериментальних досліджень, аналіз та формулювання висновків проведено спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи представлено на: II Міжнародній науково-практичній конференції «Системи розробки та постановки продукції на виробництво» (м. Суми, 2016), IV Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми конструювання, експлуатації та ремонту обладнання лісового комплексу» (м. Луцьк, 2017), X-ї Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (м. Херсон, 2018), V-й Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених та студентів “Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи” (м. Луцьк, 2018), Міжнародній науково-технічній конференції «Інженерія та технології: наука, освіта, виробництво» (м. Луцьк, 2018), VI Міжнародній конференції “Actual problems of Engineering Mechanics”, (м. Одеса, 2019), IX Міжнародній науково-технічній конференції “Прогресивні технології в машинобудуванні”, (м. Львів, 2020).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 17 наукових праць: 8 статей у фахових наукових виданнях, з яких 1 включена до міжнародної бази даних Scopus та 7 тез доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях. За результатами досліджень отримано 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 167 сторінок. Робота виконана на 126 сторінках машинописного тексту, містить 13 таблиць, 49 рисунків та 158 використаних літературних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету та завдання дослідження, встановлено об’єкт та предмет дослідження, подано наукову новизну роботи, практичне значення отриманих результатів та викладено основні положення, що виносяться на захист, наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію та публікації основних результатів досліджень.

В першому розділі дисертаційної роботи “Огляд літератури та постановка задач досліджень” наведено аналіз сучасного стану наукової проблеми, яку досліджує автор у дисертації. Детально розглянуто комплексний вплив апретування на структуру та властивості полімеркомпозитів. Проаналізовано праці Фабуляка Ф.М., Пашенка Є.О., Братичака М.М., Стухляка П.Д., Букетова А.В., Сперлінга Л., Ньюмана С., Циммерера К., Салазара К., Пеліховського Я., Хугенбоома Р., Шуберта У.С. та інших, що стосуються методів модифікування полімеркомпозитних матеріалів. За результатами проведеного аналізу визначено напрямки щодо покращення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей полімеркомпозитних матеріалів. Зокрема розглянуто вплив ультразвукового опромінення та електромагнітного поля на процеси структурування полімеркомпозитів у зонах міжфазної взаємодії, які здатні забезпечити рівномірну абсорбцію сегментів макромолекул, сприяють утворенню оптимальної кількості фізико-хімічних зв'язків та покращують релаксаційну здатність системи. На основі результатів проведеного аналізу поставлено завдання, що полягають у розробці нових епоксикомпозитних покриттів, наповнених високодисперсними апретованими частинками оксидів металів, із застосуванням модифікації композицій у фізичних полях на стадії їх формування.

В другому розділі “Характеристика досліджуваних матеріалів і методів досліджень” подано характеристику вихідних матеріалів, а також описано сучасні методики дослідження властивостей та структури епоксикомпозитних покриттів. Для формування полімерної матриці вибрано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84) та твердник поліетиленполіамін – ПЕПА (ТУ 6-02-594-70). Захисні покриття на лопатках вхідного направляючого апарату реактивних авіадвигунів повинні мати високу адгезійну міцність та абразивну стійкість, тому в якості наповнювачів використовували високодисперсні мінеральні добавки на основі оксидів металів, яким властива висока твердість. Як наповнювачі епоксиолімерних покриттів використано наступні дрібнодисперсні порошки: титан (IV) оксид (TiO_2), хром (III) оксид (Cr_2O_3), алюмінію оксид (Al_2O_3). Як модифікатор використано полівілхлорид (ПВХ), розчинений в циклогексаноні технічному ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$).

В процесі дослідження фізико-механічних властивостей визначали границю адгезійної міцності за нормального відриву, границю міцності при стисненні, залишкові напруження, ударну міцність та ударну в'язкість епоксикомпозитних покриттів. Ступінь структурування полімеркомпозитних матеріалів і покриттів визначали за вмістом гель-золь-фракції.

Для дослідження впливу природи в'язучого і наповнювача на термічні перетворення композитів застосовували метод термогравіметричного аналізу, використовуючи дериватограф «Thermoscan-2».

Дослідження водопоглинання та хімічної стійкості отриманих матеріалів здійснювали витримкою у воді та 10 %-х розчинах H_2SO_4 , HNO_3 , HCl , NaCl , NaOH . Випробування на стійкість до абразивного зношування реалізовували на установці,

яка використовується для порівняльної оцінки зносостійкості матеріалів і покриттів при терті в присутності вільного абразиву. Визначення ступеня розтріскування епоксикомпозитних покриттів під впливом знакозмінних температур полягало в оцінці морфологічних параметрів тріщин за еталоном.

Дослідження макро- та мікроструктури матеріалу здійснювали на оптичному мікроскопі МБС-9 за збільшення ($\times 30$). Фрактограми зламу та дослідження структури поверхні зразків полімеркомполімерів за малих збільшень або детальне вивчення ділянки поверхні за великих проводили на растровому електронному мікроскопі (РЕМ-106 И) за збільшення ($\times 100-1000$). ІЧ-спектри реєстрували на спектрофотометрі марки «IRAffinity-1» (Японія) у ділянці частот $400-4000 \text{ см}^{-1}$ однопроменевим методом у відбитому світлі.

В третьому розділі “Вплив модифікування на фізико-механічні властивості епоксикомполімерів” визначено вплив інтенсивності теплового поля та вмісту високодисперсних порошоків оксидів металів апретованих розчином полівінілхлориду на особливості формування епоксикомполімерних матеріалів.

Оскільки згідно технологічних вимог нанесення нового шару епоксиполімерного покриття необхідно здійснювати після переведення сформованого шару у склоподібний стан, тому доцільно було визначити вплив дрібнодисперсних наповнювачів на фізико-механічні властивості за умови попереднього структурування системи за температури $70 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 15 хв.

Для епоксикомполімерів, що містять 6 мас. ч. високодисперсного порошку оксиду титану, відбувається підвищення адгезійної міцності клейового з'єднання на 12-15 %, що зумовлено утворенням додаткових міжмолекулярних зв'язків між реакційноздатними групами на поверхні частинок і гідроксильними групами епоксидної смоли (рис. 1). Подальше підвищення вмісту порошку оксиду титану від 6 мас. ч. до 16 мас. ч. призводить до зниження даної характеристики на 8-12 %, що пов'язано з нерівномірним розподілом частинок порошку в епоксидній матриці та зниженням його ліофільності через високий ступінь дисперсності та утворення агломератів.

При додаванні невеликої кількості порошку оксиду хрому (2-6 мас. ч.) відбувається зниження в 2,1-2,3 рази адгезійної міцності епоксикомполімерного матеріалу до поверхні субстрату порівняно із ненаповненою системою. Це пов'язано із блокуванням процесу утворення ковалентних зв'язків між кінцевими групами епоксидної смоли і амінними групами поліетиленполіаміну через невисоку питому поверхню частинок порошку оксиду хрому.

Введення порошку алюміній оксиду призводить до зниження адгезійної міцності епоксикомполімерного матеріалу, що пов'язано з морфологічними параметрами наповнювача, частинки якого є більшими та мають гострі виступи на поверхні, що підвищує ймовірність появи тріщини та її самовільного поширення.

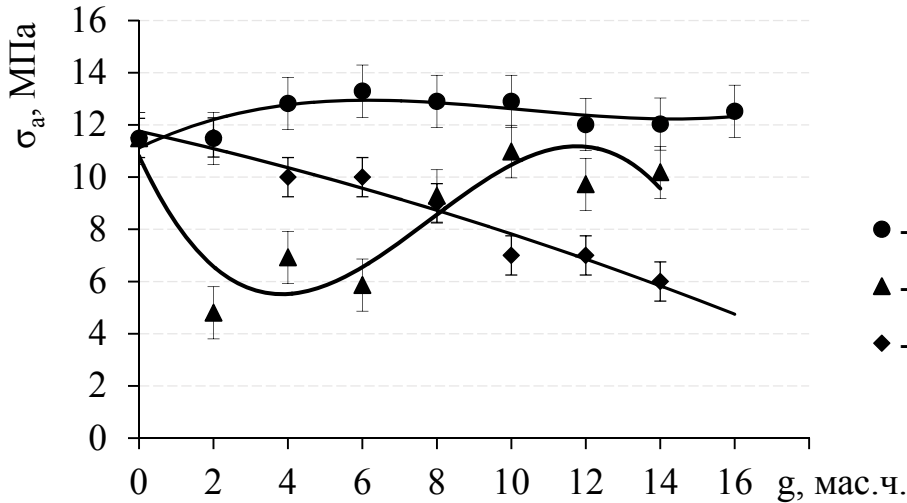


Рис. 1. Залежність адгезійної міцності епоксикомпозитів від вмісту високодисперсного порошку:
1 – титан (IV) оксид;
2 – хром (III) оксид;
3 – алюміній оксид

Введення порошку оксиду хрому призводить до підвищення вмісту гель-фракції епоксикомпозитів в діапазоні наповнення системи 2-4 мас.ч. (рис. 2). Експериментально встановлено, що найвищий ступінь структурування (84,35 %) властивий епоксикомпозитам з вмістом 2 мас. ч. порошку оксиду хрому. В діапазоні наповнення 6-14 мас. ч. відбувається зниження вмісту гель-фракції, що пов'язано з надлишковим вмістом наповнювача. Даний наповнювач в оптимальному наповненні утворює міжмолекулярні зв'язки з епоксиолімерною матрицею, а у випадку подальшого підвищення вмісту порошку нові зв'язки не утворюються, що обумовлено невеликою кількістю активних груп на поверхні частинок.

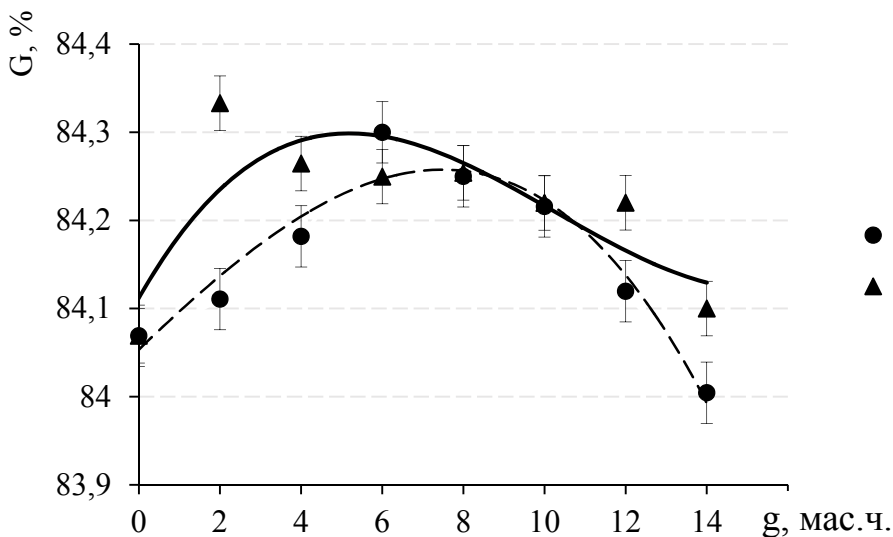


Рис. 2. Залежність вмісту гель-фракції епоксикомпозитів від вмісту високодисперсного порошку:
1 – титан (IV) оксид;
2 – хром (III) оксид

Для епоксикомпозитів, що містять в складі порошок оксиду титану в діапазоні 2-8 мас. ч. відбувається підвищення вмісту гель-фракції в результаті утворення додаткових зв'язків між компонентами системи. Максимальне значення ступеня структурування становить 84,33 % для вмісту наповнювача 6 мас. ч. При

подальшому збільшенні вмісту порошку оксиду титану до 14 мас. ч. відбувається значне зниження показника, що можна пояснити агломерацією частинок порошку.

Максимальні значення ступеня структування епоксикомпозитів, наповнених порошком оксиду титану, зміщені в сторону вищого вмісту порошку, оскільки даний вміст забезпечує утворення максимальної кількості міжмолекулярних зв'язків з макромолекулами в'язучого. Це визначається наявністю гідроксильних груп, кількість яких на поверхні частинок оксиду титану є вищою, порівняно з порошком оксиду хрому.

Циклогексанон здатний розчиняти полівінілхлорид, тому є доцільність використовувати його для розчинення порошку полівінілхлориду для отримання модифікуючої добавки до складу епоксидного в'язучого в межах від 3 мас. ч. до 21 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли. При цьому важливо було оцінити оптимальний вміст даного розчинника для отримання якісного розчину полівінілхлориду (рис. 3).

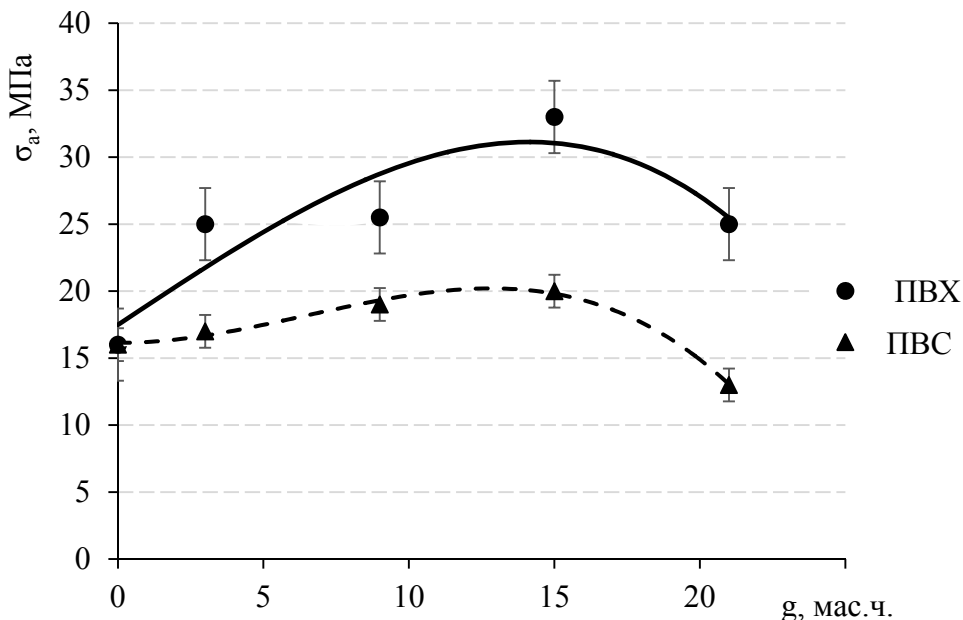


Рис. 3. Вплив вмісту циклогексанону в розчині термопласту на адгезійну міцність епоксиполімерів

Це призвело до підвищення адгезійної міцності епоксиполімерів на 30 % у випадку введення розчинника в кількості 3 мас. ч. За вищого вмісту 9 мас. ч. підвищення адгезійної міцності не відбувається, однак за вмісту циклогексанону 15 мас. ч. зафіксовано різке зростання даної характеристики на 36 %, що пов'язано з оптимальним вмістом речовини для повного розчинення полівінілхлориду. Підвищений вміст циклогексанону (18-21 мас. ч.) призводить до зниження адгезійної міцності, оскільки відбувається його накопичення в об'ємі епоксиполімеру.

Введення до складу епоксидного в'язучого розчиненого циклогексаном полівінілового спирту не забезпечує суттєвого підвищення адгезійної міцності епоксиполімерів, що пов'язано з недостатнім розчиненням даного модифікатора в результаті чого відбувається формування неоднорідної структури полімерної сітки.

Використання модифікуючої добавки порошку полівінілового спирту, який розчиняли циклогексаноном, забезпечує незначне підвищення адгезійної міцності на 22 % епоксикомпозитів, наповнених порошком титан (IV) оксиду в кількості 2-4 мас. ч. (рис. 4). Більш суттєвий результат отримано в результаті використання розчину полівінілового спирту та порошку титан (IV) оксиду в кількості 6 мас. ч., оскільки відбулося незначне підвищення адгезійної міцності, що пов'язано з утворенням додаткових хімічних зв'язків між компонентами та пластифікуючою дією модифікатора. В результаті розчинення макромолекули полівінілового спирту частково змочують поверхню частинок наповнювача, однак при цьому утворення максимальної кількості хімічних зв'язків не відбувається через недостатнє розчинення модифікатора. У випадку використання розчину полівінілхлориду відбувається більш підвищення адгезійної міцності епоксикомпозиту у 2 рази, порівняно з немодифікованою системою, що містить порошок титан (IV) оксиду в кількості 6 мас. ч. Це пов'язано з тим, що молекули полівінілхлориду забезпечують утворення більшої кількості хімічних вузлів між активними групами компонентів.

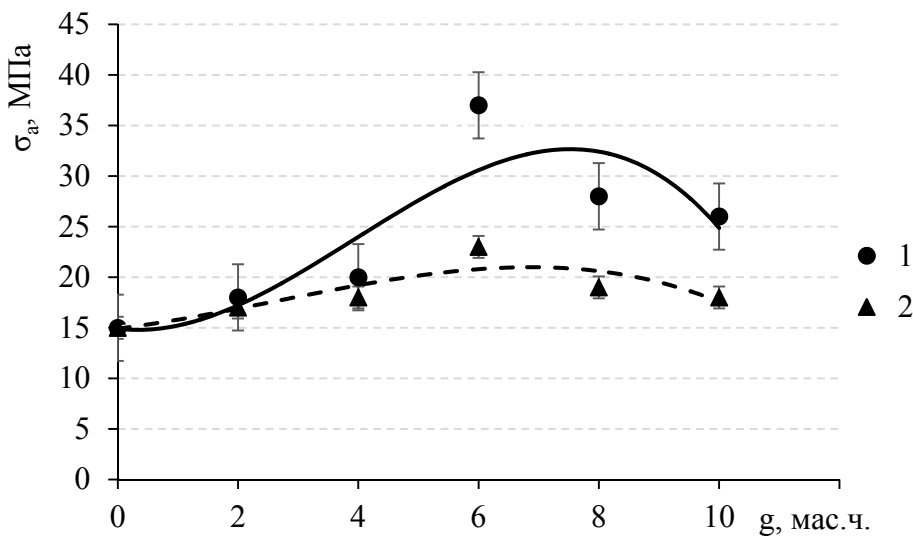


Рис. 4. Вплив вмісту апретованого порошку титан (IV) оксиду на адгезійну міцність епоксикомпозитів:
1 – ПВХ + TiO₂;
2 – ПВС + TiO₂

Експериментально встановлено, що ультразвукова обробка композицій тривалістю 5 хв підвищує адгезійну міцність епоксикомпозитних матеріалів (рис. 5), наповнених порошком оксиду титану. Найвищі значення адгезійної міцності 14,8 МПа отримано для епоксикомпозитного матеріалу, наповненого в кількості 8 мас. ч. порошку титан (IV) оксиду. Зростання даної характеристики пояснюється отриманням однорідної системи внаслідок інтенсивного перемішування компонентів, що сприяє їх рівномірному розподілу в об'ємі композиту. При цьому відбувається краще змочування частинок наповнювача внаслідок руйнування агломератів та проникнення макромолекул епоксиолімерної матриці в заглибини, пори або тріщини на поверхні частинок. Також ультразвукова обробка інтенсифікує процеси дегазації в епоксидній матриці, що сприяє формуванню бездефектних виробів, особливо при отриманні високонаповнених систем з великим вмістом газових включень і високою в'язкістю композиції. Видаленню газових включень

сприяє підвищенню температури системи внаслідок її розігріву поглинутою енергією фізичного поля.

Ультразвукове випромінювання не активно впливає на ненаповнену епоксиполімерну систему, що підтверджується низькими значеннями адгезійної міцності (11,3 МПа) для епоксиполімеру. Це пов'язано з тим, що руйнування клейового шва відбувається в об'ємі епоксиполімеру. Когезійна міцність епоксиполімеру є нижчою, порівняно з міцністю наповненої системи, композицію якої оброблено ультразвуком, що забезпечило кращу взаємодію між компонентами системи. Із ростом вмісту наповнювача зростає адгезійна міцність, оскільки зростає кількість включень твердої фази, яка забезпечує утворення додаткових хімічних зв'язків в об'ємі матриці.

Досліджено, що збільшення тривалості обробки до 10 хв призводить до зниження адгезійної міцності епоксикомпозитів на 11-15 %. Це пояснюється тим, що в результаті тривалого ультразвукового впливу інтенсифікуються процеси структурування епоксикомпозитної системи, а тому зростають залишкові напруження за рахунок нерівномірного розподілу хімічних зв'язків в об'ємі полімерної матриці.

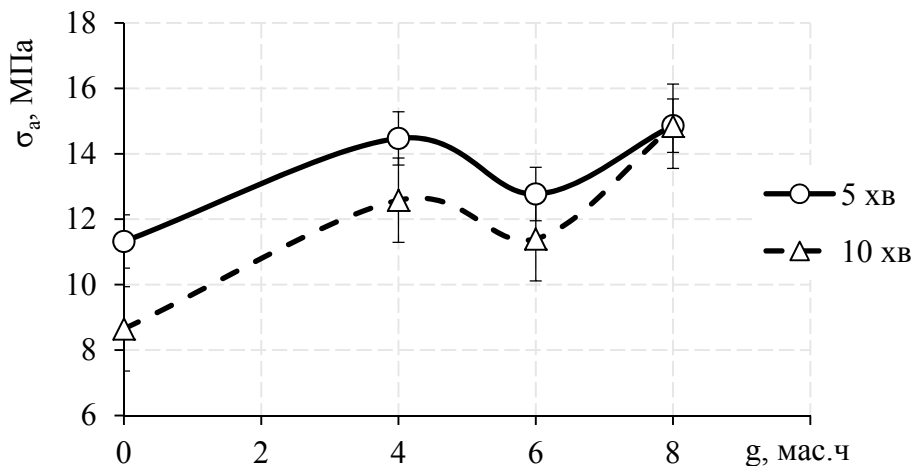


Рис. 5. Залежність адгезійної міцності епоксидних композитів, наповнених порошком титан (IV) оксиду, від тривалості обробки

У випадку введення порошку оксиду титану в кількості 4 мас. ч. відбувається підвищення на 22-25 % ударної в'язкості епоксикомпозитів, композиції яких оброблено протягом 5 хв ультразвуком, порівняно з ненаповненими епоксиполімерами (рис. 6). Максимальне значення даної характеристики складає 8,6 кДж/м², що вказує на оптимальний вміст наповнювача в епоксиполімерній матриці. Відповідно, після ультразвукової обробки відбувається руйнування агломератів частинок наповнювача з наступним однорідним їх розподілом в епоксиполімерній матриці та формування структури епоксикомпозиту з низьким напруженим станом. При вмісті наповнювача 6 мас. ч. ударна в'язкість різко знижується у 2 рази, порівняно з епоксикомпозитами, що містять 4 мас. ч. порошку титан (IV) оксиду. Найнижчі значення мають епоксикомпозити з вмістом наповнювача 8 мас. ч., що вказує на надлишковий вміст наповнювача в епоксиполімерній матриці. При цьому ультразвукова обробка протягом 5 хв не забезпечує ефективного розділення агломератів частинок наповнювача, що

підвищує дефектність структури епоксикомпозиту. Результати дослідження ударної в'язкості епоксикомпозитів з низьким ступенем наповнення (2-4 мас. ч.) симбатно корелюють із попередніми результатами досліджень адгезійної міцності та міцності при стисканні, що підтверджує позитивний вплив ультразвукової обробки за оптимальної тривалості обробки 5 хв.

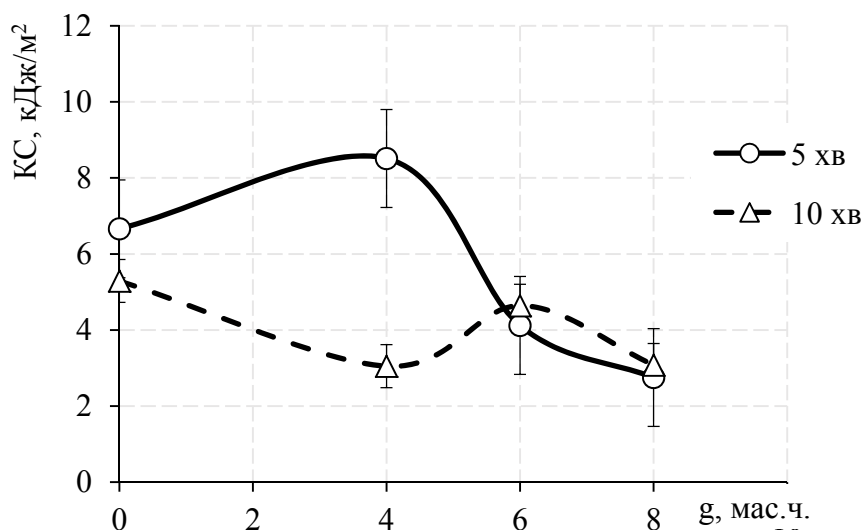


Рис. 6. Залежність ударної в'язкості епоксидних композитів, наповнених порошком титан (IV) оксиду, від режиму ультразвукової обробки композиції

Найвищі значення ударної в'язкості ($5,3 \text{ кДж/м}^2$) мають ненаповнені епоксиолімери, порівняно з наповненими епоксикомпозитами, композиції яких оброблено ультразвуком протягом 10 хв. При дослідженні епоксикомпозитів, що містять наповнювач порошок оксиду титану в кількості 4-8 мас. ч. відбувається зниження ударної в'язкості, оскільки відбувається локальне структурування, що призводить до підвищення ступеня напруженого стану системи. Вміст порошку оксиду титану в кількості 6 мас. ч. забезпечує незначне підвищення ударної в'язкості за рахунок оптимізації структури, коли відбувається домінування вмісту дискретних частинок, кількість яких зросла за рахунок обробки ультразвуком, над величиною напруженого стану епоксисистеми. Підвищена тривалість ультразвукової обробки (10 хв) дає позитивний результат для епоксикомпозитів, які сприймають стискаючі навантаження, що призводить до руйнування агломератів частинок. Однак для епоксикомпозитів, які піддаються впливу динамічних навантажень, підвищена тривалість ультразвукової обробки призводить до швидкого руйнування матеріалу через зростання величини залишкових напружень в системі.

В четвертому розділі “Вплив складу на характер структурування епоксикомпозитів” подано оптимізацію складу епоксикомпозитного матеріалу методом математичного планування експерименту, в результаті чого отримано рівняння регресії, що дозволило визначити зону оптимуму для стехіометричного співвідношення інгредієнтів даної системи. Методом градієнтного спуску по поверхні відгуку визначено оптимальний вміст компонентів (полівінілхлорид – 3 мас.ч., циклогексанон – 15 мас.ч., порошок титан (IV) оксид – 6 мас.ч.,

поліетиленполіамін – 12 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли), які забезпечують отримання високих значень адгезійної міцності (35-37 МПа).

Кількісний та якісний аналіз процесу структурування проведено за наявності активних груп та сегментів в структурі епоксикомпозитних матеріалів за допомогою ІЧ-спектроскопії. Проаналізувавши ІЧ-спектри поглинання досліджуваних епоксиполімерних та епоксикомпозитних матеріалів виявлено наявність в них деформаційних та валентних коливань певних груп атомів. В інтервалі частот $400-1500\text{ см}^{-1}$ система характеризується наявністю деформаційних коливань $-N-H-$, $-O-H-$, $-C-H-$ та валентних коливань $-C-C-$, $-C-O-$, $-C-N-$ груп. Групові коливання з'єднань з подвійними зв'язками ($C=C$, $C=O$, $C=N$) присутні в інтервалі частот $1500\dots 1800\text{ см}^{-1}$. Ці коливання не є чисто валентними, оскільки в них велику участь приймають прилеглі кути і зв'язки. Інтервал частот $2000-2300\text{ см}^{-1}$ відповідає області існування потрійних зв'язків ($C\equiv C$, $C\equiv N$). В області високих частот $2700\dots 4000\text{ см}^{-1}$ смуги поглинання відповідають валентним коливанням груп, що містять легкий атом водню ($C-H$, $N-H$, $O-H$).

Для епоксикомпозитного матеріалу складу ((ЕД-20 + ПЕПА) + ((ПВХ + циклогесанон) 1 год + TiO_2)10 хв)) в області деформаційних коливань виявлено смуги поглинання, зміщені в область вищих значень (рис. 7). Отримані нижчі значення оптичної густини та більшої площі піків свідчать про вищий ступінь структурування епоксикомпозитного матеріалу оптимізованого складу, порівняно з аналогічним складом матеріалу, який відрізняється від попереднього відсутністю стадії витримки на апретування.

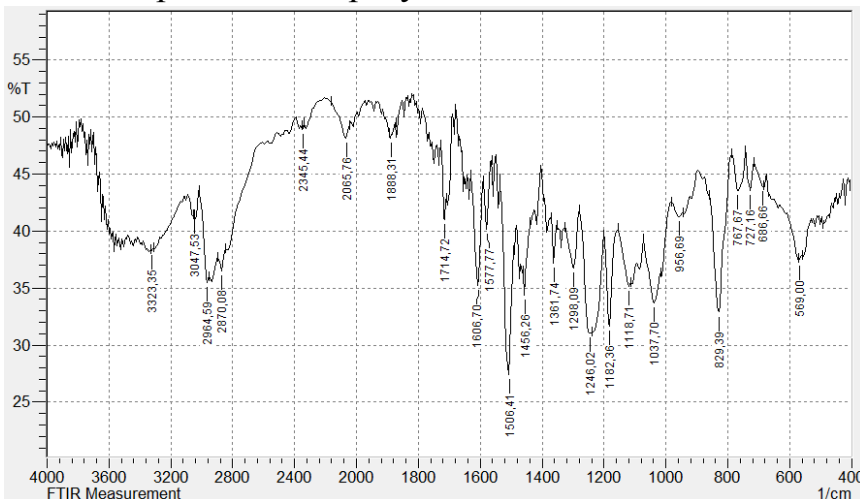


Рис. 7. Спектрограма епоксикомпозиту складу ((ЕД-20 + ПЕПА) + (ПВХ + Ц) + TiO_2) з апретуванням наповнювача протягом 10 хв

Аналіз бічної поверхні епоксикомпозитних зразків після руйнування на маятниковому копрі шляхом нанесення динамічного навантаження, в напрямку перпендикулярному до осі зразків з квадратним перерізом, дозволяє визначити однорідність структури матеріалу за характером поширення магістральної тріщини. В епоксикомпозитах з невисоким вмістом (2-4 мас. ч.) порошку титан (IV) оксиду відбувається відхилення на кут до 45° (рис. 8, а, б) напрямку переміщення тріщини від напрямку вектора прикладеного динамічного навантаження. При цьому поширення тріщини відбувається за криволінійною траєкторією, що свідчить про формування неоднорідної структури через підвищену здатність частинок порошку

до агрегації згідно теорії стійкості ліофобних колоїдів, яка пояснює здатність до коагуляції високодисперсних частинок у в'язкому середовищі. Відповідно це призводить до утворення дефектів структури, по об'єму або границях яких відбувається самовільне переміщення тріщини. У випадку оптимального ступеня наповнення система забезпечує умови для формування однорідної структури, в результаті чого переміщення тріщини відбувається в прямолінійному напрямку з незначними відхиленнями (рис. 8, в, г), поява яких зумовлена наявністю ділянок з підвищеною щільністю хімічних зв'язків епоксиполімерної матриці з поверхнею дрібнодисперсних частинок наповнювача.

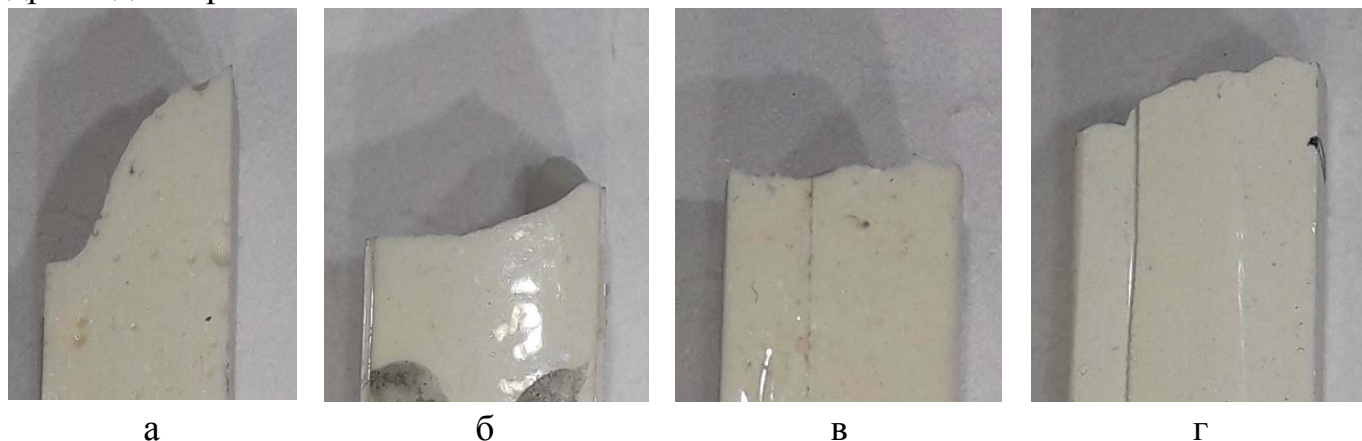


Рис. 8. Загальний вигляд бічної поверхні епоксикомпозитів з вмістом порошку титан (IV) оксиду: а – 2 мас. ч., б – 4 мас. ч., в - 6 мас. ч., г – 10 мас. ч.

Вміст розчинника в кількості 15 мас. ч. забезпечує формування однорідної структури епоксидної матриці (рис. 9, а). Вміст циклогексанону (9 мас. ч.) є недостатнім, оскільки відбувається локалізація гелевої структури у вигляді пористої неоднорідності (рис. 9, б).

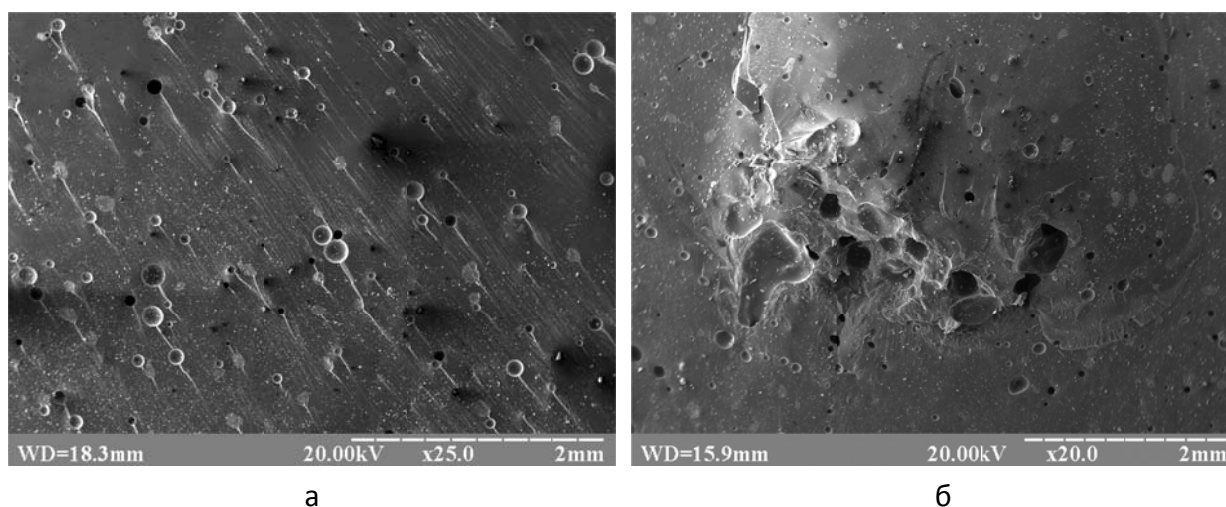


Рис. 9. Фрактограми зламу поверхні епоксикомпозитних матеріалів, $\times 20$:
а – ЕД-20 + ПЕПА + циклогексанон (15 мас.ч.) + ПВХ;
б – ЕД-20 + ПЕПА + циклогексанон (9 мас.ч.) + ПВХ

Витримка порошку полівінілхлориду в циклогексаноні протягом 5 хв є недостатньою, оскільки не відбувається повне розчинення добавки, в результаті чого на поверхні зламу присутні дрібні включення даного порошку (рис. 10, а). Витримка протягом 20 хв за температури 30 °С забезпечує повне розчинення порошку полівінілхлориду, оскільки на поверхні не зафіксовано частинок модифікуючої добавки (рис. 10, б), макромoleкули якої рівномірно розподіляється в епоксидному в'язучому.

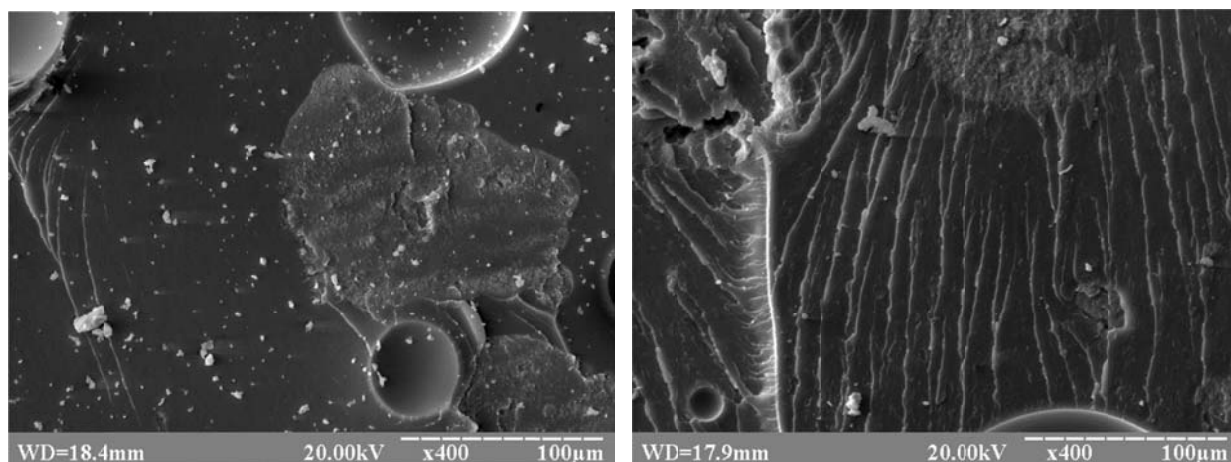


Рис. 10. Фрактограми зламу поверхні епоксиполімерів, модифікованих полівінілхлоридом з витримкою добавки в циклогексаноні, $\times 400$: а – 5 хв; б – 20 хв

На поверхні зламу зафіксовано велика кількість дрібних ліній сколювання на границях поверхонь, вздовж яких відбувається переміщення вершини тріщини. Виникнення та поширення магістральної макротріщини відбувається під впливом динамічного навантаження у випадку формування системи з високим напруженим станом. Якщо залишкові напруження є низькими, тоді відбувається поширення пружних хвиль в епоксиполімері, які спричиняють одночасну появу великої кількості мікротріщин в об'ємі матеріалу. Це вказує на локалізацію залишкових напружень в місцях високої щільності хімічних зв'язків між макромoleкулами полівінілхлориду з епоксидним в'язучим. Рівномірне розташування ліній сколювання свідчить про однорідність структури епоксиполімеру та відсутність напруженого стану.

В п'ятому розділі “Вплив технології формування на експлуатаційні властивості епоксикомпозитів” визначено, що на адгезійну міцність значно впливає технологія приготування композиції (рис. 11). Найкращі значення отримано у випадку попереднього розчинення полівінілхлориду у циклогексаноні протягом 1 год з наступним введенням порошку титан (IV) оксиду та витримкою 30 хв, що дозволяє макромoleкулам полівінілхлориду повністю розчинитись та проникнути в частинки порошку. Також найкращі результати отримано у випадку окремого приготування композиції епоксидної смоли і твердника з наступним

введенням до композиції (ПВХ + титан (IV) оксид). Позитивні результати отримано для двохшарових покриттів, в яких нижній шар має кращу адгезію, а верхній забезпечує вищу пластичність.

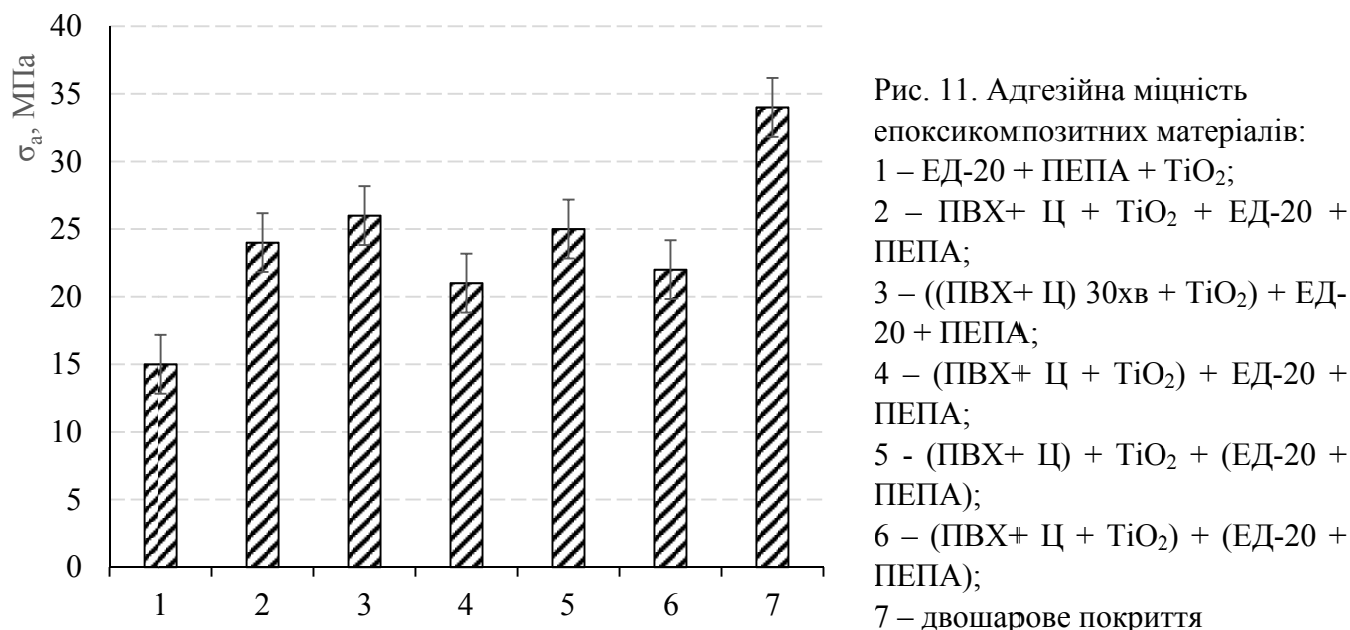


Рис. 11. Адгезійна міцність епоксикомпозитних матеріалів:
 1 – ЕД-20 + ПЕПА + TiO₂;
 2 – ПВХ+ Ц + TiO₂ + ЕД-20 + ПЕПА;
 3 – ((ПВХ+ Ц) 30хв + TiO₂) + ЕД-20 + ПЕПА;
 4 – (ПВХ+ Ц + TiO₂) + ЕД-20 + ПЕПА;
 5 – (ПВХ+ Ц) + TiO₂ + (ЕД-20 + ПЕПА);
 6 – (ПВХ+ Ц + TiO₂) + (ЕД-20 + ПЕПА);
 7 – двошарове покриття

Практичне застосування розроблених епоксикомпозитних покриттів полягає у захисті робочої алюмінієвої поверхні лопаток вхідного направляючого апарату реактивних двигунів від руйнування (рис. 12), яке виникає під впливом турбулентних абразивних потоків під час зльоту або посадки літака та навколишнього середовища, що являє собою комплексний вплив агресивного кисню, кислотних оксидів, води та температури.



Рис. 12. Загальний вигляд фрагментів лопатки вхідного направляючого апарату реактивного авіадвигуна з ділянками руйнування поверхні корпусу, виготовленого з алюмінієвого сплаву марки ВД-17

Використання адезійного шару на основі модифікованих епоксикомпозитів, наповнених порошком хром (III) оксиду, обумовлено формуванням проміжного шару (рис. 13, а), який має високу адгезію до субстрату та прийнятні демпфуючі властивості, а також забезпечує технологічну функцію для формування контрасту кольору, оскільки під час нанесення експлуатаційного шару покриття білого кольору складно виявити ділянки з неоднаковою товщиною.

Експлуатаційний шар (рис. 13, б) наноситься поверх адгезійного шару у три етапи із структуруванням кожного шару за температури 70 °С протягом 15 хв та охолодження на повітря за кімнатної температури. Загальна товщина експлуатаційного шару складає 250-280 мкм.



а



б

Рис. 13. Загальний вигляд епоксидно-композитного покриття на лопатці вхідного направляючого апарату реактивного авіадвигуна:
а – адгезійний шар;
б – експлуатаційний шар

Запропоновано наступні технології приготування епоксиднокомпозитних покриттів:

1. Змішування ПВХ з циклогексаном, додавання наповнювача TiO_2 та введення суміші в епоксидне в'язуче (ЕД-20 + ПЕПА). Компоненти вводились послідовно один за одним протягом 1-2 хв.

2. Змішування ПВХ з циклогексаном з подальшою витримкою для набухання полімеру протягом 1 години, додавання наповнювача TiO_2 та введення суміші в епоксидне в'язуче (ЕД-20 + ПЕПА).

3. Змішування ПВХ з циклогексаном та наповнювачем TiO_2 з подальшою витримкою протягом 1 години та введенням епоксидного в'язучого (ЕД-20 + ПЕПА).

Розроблені двошарові епоксиднокомпозитні покриття мають у 2,5 рази вищу зносостійкість до впливу абразивних частинок, порівняно з базовим полімерним покриттям, оскільки містять апретований порошок титан (IV) оксиду, який має високу твердість та утворює міцні хімічні зв'язки з модифікатором, що відповідно не допускає викришування частинок порошку.

Аналіз проведених досліджень показав, що усі зразки епоксиднокомпозитних покриттів є доволі стійкими у всіх хімічних середовищах, оскільки відповідно до епоксиполімерна матриця здатна зменшувати швидкість протікання електрохімічних реакцій на поверхні наповнювача завдяки утворенню дифузійного бар'єру. Суттєво на протікання корозійних процесів на поверхні зразків впливає час

їх витримки у агресивному середовищі. Для всіх зразків збільшення часу витримки з 24 до 720 годин приводить до накопичення продуктів корозії на їхній поверхні, про що свідчать позитивні значення зміни маси зразків (табл. 1).

Таблиця 1. Корозійна стійкість епоксикомпозитних покриттів

Середовище	Зміна маси зразків епоксикомпозитних покриттів, %			
	Контрольний зразок	Технологія 1	Технологія 2	Технологія 3
H ₂ O дистильована	+1,93	+1,68	+2,19	+2,34
HCl	+2,55	+2,63	+2,05	+2,05
H ₂ SO ₄	+4,04	+2,57	+4,84	+4,91
HNO ₃	+5,12	+2,74	+2,74	+1,99
NaCl	-	+2,16	+8,28	+2,84
NaOH	-	+2,22	+2,25	+2,05

Найменш агресивним середовищем для усіх епоксикомпозитних покриттів, приготованими за різними технологіями, є 10 % розчин натрій гідроксиду та дистильована вода.

Розроблене епоксикомпозитне покриття може бути використане в машинобудівній галузі для захисту корпусів авіаційної техніки, автомобілів, річкового та морського транспорту та технологічного устаткування, що працює під впливом динамічних навантажень, агресивних середовищ і при перепадах температур. При цьому запропоновані покриття характеризуються на 14-16 % вищою адгезійною міцністю системи при введенні апретованого порошку TiO₂ та зниженими значеннями залишкових напружень у 3 рази, порівняно з матеріалами (патенти України № 50558 та № 69738).

ВИСНОВКИ

Встановлено, що епоксиолімерні зразки з оптимальною товщиною (3-7 мм) мають вищу у 3,1-3,4 ударну в'язкість при їх структуруванні за більш високої температури (60 °С) протягом 25 хв, оскільки за вищої температури відбувається активізація процесу з утворенням оптимальної кількості хімічних зв'язків між активними групами епоксидного в'язучого. Відповідно, структурування покриттів більшої товщини потребує застосування нижчої температури 50°С, а структурування тонких виробів (0,5-1 мм) доцільно здійснювати за температури 70 °С, оскільки в покритті більшої товщини відбувається симбатна інтеграція зовнішньої теплової енергії та генерованої енергії, що виникла внаслідок екзотермічної реакції структурування епоксиолімерної сітки. При цьому надлишок теплової енергії призводить до виникнення напруженого стану, а у тонких

покриттях тепла енергія підводиться в основному ззовні, що дозволяє структурувати систему за вищої температури.

1. Встановлено, що введення порошку титан (IV) оксиду до складу епоксиполімерної матриці забезпечує підвищення на 15-30 % механічних характеристик, порівняно з порошком оксиду хрому, що пов'язано із здатністю частинок порошку титан (IV) оксиду утворювати додаткові міжмолекулярні зв'язки з макромолекулами епоксидної матриці. Оптимальний вміст порошку оксиду титану в епоксиполімерній матриці складає 6 мас.ч., в результаті чого відбувається формування епоксикомпозитного матеріалу з найвищими значеннями адгезійної міцності, міцності при стисканні, ударної в'язкості та ступеня структурування в дослідженому інтервалі наповнення системи. Епоксикомпозити з нижчим вмістом даного порошку не забезпечують утворення достатньої кількості хімічних зв'язків, а за умови вищого вмісту відбувається агломерація частинок, що призводить до формування дефектної структури із збільшенням концентраторів напружень.

2. Ультразвукова обробка композицій забезпечує зростання адгезійної міцності на 13-15 % та границі міцності при стисканні на 7-9 % епоксикомпозитів, що містять дрібнодисперсні наповнювачі, оскільки високочастотні коливання сприяють руйнуванню агломератів частинок з високою поверхневою енергією. В ненаповнених епоксиполімерах під впливом ультразвуку відбувається коливання сегментів макромолекул епоксидної смоли та твердника, що інтенсифікує процес утворення хімічних зв'язків. Однак, у випадку тривалої обробки понад 10 хв відбувається зростання величини залишкових напружень, і відповідно, погіршення механічних характеристик епоксиполімерів.

3. Методом математичного планування експерименту отримано математичну модель, яка дозволяє здійснювати розрахунки із визначення оптимального складу епоксикомпозитного матеріалу для формування експлуатаційного шару захисного покриття, що в зоні оптимуму містить 6 мас. ч. високодисперсного порошку титан (IV) оксиду, 15 мас. ч. порошку полівінілхлориду, розчиненого в 3 мас. ч. циклогексанону.

4. Введення високодисперсного порошку титан (IV) оксиду призводить до утворення більшої кількості вузлів зшивання полімерного матеріалу $-N-N-$, $-O-N-$, $-C-N-$ та валентних коливань $-C-C-$, $-C-O-$, $-C-N-$ групами, що визначено методом інфрачервоної спектроскопії. Зниження оптичної густини епоксиполімерів, що містять розчин полівінілхлориду вказує на повніше утворення кількості зв'язків зшивання епоксиполімерного матеріалу. Частоти епоксикомпозиту модифікованого полівінілхлоридом та наповненого порошком титан (IV) оксиду вказують на наявність значної кількості $-CH_2-$, $-CO-$, $-CN-$ валентних, $-CH-$, $-NH-$ маятникових та $-OH-$, $-CH-$ деформаційних коливань, метилен $-CH_2-$, метил CH_3-C груп в матеріалі, що викликано вмістом модифікуючої добавки (полівінілхлориду) та активного наповнювача з великою кількістю вільних радикалів.

5. Розроблено технологію модифікування епоксидного в'язучого шляхом суміщення композиції епоксидної смоли з модифікуючою добавкою, яка являє собою розчин полівінілхлориду в циклогексаноні, приготовлений за температури 30 °С протягом 20 хв. Дана модифікуюча добавка дозволяє формувати експлуатаційний шар захисного покриття з високою стійкістю до циклічної зміни температури завдяки утворенню взаємопроникаючих полімерних сіток.

6. Застосування порошку титан (IV) оксиду в розчині полівінілхлориду з витримкою за температури 30 °С протягом 5 хв забезпечує апретування поверхні частинок наповнювача, що дозволяє формувати експлуатаційний шар, який характеризується високою кількістю хімічних зв'язків та здатністю поглинати механічні та теплові навантаження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних

1. Influence of physical fields on functional properties of polymeric nanocomposites / Savchuk P., Kashytskyi V., Malets V., **Matrunchyk D.**, Kushniruk A. // International Conference on Actual Problems of Engineering Mechanics, APREM 2019; Odessa; Ukraine; 20 May 2019 до 24 May 2019; Volume 968 MSF, 2019, Pages 176-182. *(Особистий внесок здобувача – постановка задач, проведення експерименту, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків).*

Статті у наукових фахових виданнях України

2. Оптимізація процесу модифікації епоксиполімерів кремнійорганічним лаком / О.М. Люшук, П.П.Савчук, В.П. Кашицький, **Д.М. Матрунчик** // Міжнародне періодичне наукове видання "International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" № 4(20), Vol.2, April 2017., Dubai, UAE – С. 27-32. *(Особистий внесок здобувача – проведення експерименту, аналіз отриманих результатів).*

3. Оптимізація складу полінаповненої системи на основі епоксикомпозитів / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, О.М. Люшук, **Д.М. Матрунчик**, Ю.А. Удовицька // Науковий вісник Херсонської державної морської академії ХДМІ: науковий журнал. – №1(18). – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2018. – С. 153-161. *(Особистий внесок здобувача – постановка задач, проведення експерименту, аналіз отриманих результатів).*

4. Савчук П.П. Вплив фізичних полів на структурування епоксиполімерів / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, І.В. Боярська, **Д.М. Матрунчик** // Наукові нотатки. – Випуск 64. – Луцьк, 2018. – С. 196-200. *(Особистий внесок здобувача – проведення експерименту, аналіз отриманих результатів).*

5. Савчук П.П. Особливості формування пористої структури епоксикомпозитних органопластів / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, Д.М. Матрунчик, О.Л. Садова, В.О. Багіла // Наукові нотатки. – Випуск 66. – Луцьк, 2018. – С. 287-292. *(Особистий внесок здобувача – постановка задач, формулювання висновків).*

6. Савчук П.П. Структурування епоксиполімерів під впливом електромагнітного поля / П.П. Савчук, Д.М. Матрунчик, В.П. Кашицький, О.Л. Садова, Г.Ю. Петрук // Наукові нотатки. – Випуск 68. – Луцьк, 2019. – С. 91-95. *(Особистий внесок здобувача – проведення експерименту, аналіз отриманих результатів).*

7. Savchuk P. The influence of ultrasonic treatment on the mechanical properties of epoxy composites modified with fine powder of titanium oxide/ P. Savchuk, D. Matrunchyk, V. Kashytskyi, O. Sadova, I. Moroz// Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology» Vol.1, February 28, 2020, Warsaw, Poland. – С. 13-20. *(Особистий внесок здобувача – постановка задач, формулювання висновків).*

8. P. Savchuk, D. Matrunchyk, V. Kashytskyi, O. Sadova, I. Moroz, "The influence of metal oxide powders on the physical and mechanical properties of epoxy composites for the protection of constructions made of aluminum alloys", Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science, vol. 5, no. 2, pp. 16-24, 2019. *(Особистий внесок здобувача – постановка задач, проведення експерименту, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків).*

Статті у збірниках матеріалів і тез конференцій:

9. П.П. Савчук. До питання про термодинамічну сумісність модифікованих епоксикомпозитів / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, І.В. Боярська, Д.М. Матрунчик // Системи розробки та постановки продукції на виробництво: Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. – Суми: Видавництво Сумського державного університету, 2016. – С. 236-237. *(Особистий внесок здобувача – проведення експерименту, аналіз отриманих результатів).*

10. Умови формування вторинних структур на трибоповерхнях базальтонаповнених епоксикомпозитів / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, О.Л. Садова, М.Д. Матрунчик // Актуальні проблеми конструювання, експлуатації та ремонту обладнання лісового комплексу: Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Луцьк: інф.-вид. відділ Луцького НТУ, 2017. – С. 137-139. *(Особистий внесок здобувача – проведення експерименту, аналіз отриманих результатів).*

11. Дослідження корозійної стійкості епоксикомпозитних захисних покриттів, наповнених вискодисперсними частинками / В.П. Кашицький, В.М. Малець, Д.М. Матрунчик // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT –2018) матеріали X-ї Міжнародної науково-практичної

конференції. – Херсон: Видавництво Херсонської державної морської академії, 2018. – С. 306-307. *(Особистий внесок здобувача – проведення експерименту, аналіз отриманих результатів).*

12. Малець В.М. Стійкість епоксикомпозитних покриттів, модифікованих у фізичних полях, до впливу знакозмінних температур / В.М. Малець, В.П. Кашицький, П.П. Савчук, **Д.М. Матрунчик** // V Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених та студентів “Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи” – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. – С. 91-92. *(Особистий внесок здобувача – постановка задач, проведення експерименту, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків).*

13. Савчук П.П. Дослідження теплофізичних властивостей епоксикомпозитів / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, В.М. Малець, **Д.М. Матрунчик** // Міжнародна науково-технічна конференція «Інженерія та технології: наука, освіта, виробництво» (15-16 листопада 2018 року). – Луцьк: Інф.-вид. відділ Луцького НТУ, 2018. – С. 220-223. *(Особистий внесок здобувача – постановка задач, проведення експерименту, математична обробка та аналіз отриманих результатів).*

14. Savchuk P. Influence of physical fields on functional properties of polymeric nanocomposites / P. Savchuk, V. Kashytskyi, V. Malets, **D. Matrunchyk**, A. Kushniruk // 6th International Conference “Actual problems of Engineering Mechanics” (APEM 2019), May 20-24, 2019, Odessa, Ukraine. 2019. PP. 176-184. *(Особистий внесок здобувача – проведення експерименту, аналіз отриманих результатів).*

15. Савчук П.П. Адгезійна міцність модифікованих захисних епоксикомпозитних покриттів наповнених високодисперсними порошками оксидів металів / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, І.А. Мороз, О.Л. Садова, **Д.М. Матрунчик** // IX Міжнародна науково-технічна конференція “Прогресивні технології в машинобудуванні” (3 - 7 лютого 2020 року). – Львів – Плай, 2020. – С. 151-153. *(Особистий внесок здобувача – постановка задач, проведення експерименту, математична обробка та аналіз отриманих результатів).*

Патенти України на корисну модель:

16. Пат. 137000 Україна, МПК С08L 63/00, С08L 3/00. Спосіб отримання епоксикомпозитного матеріалу / Савчук П.П., Кашицький В.П., Малець В.О., **Матрунчик Д.М.**, Садова О.Л.; заявник і патентовласник Луцький національний технічний ун-т. – № u201902615; заявл. 18.03.19; опубл. 25.09.19, Бюл. № 18. *(Особистий внесок здобувача – здійснено пошук аналогів та прототипу).*

17. Пат. 141805 Україна, МПК С08L 63/00, С08K 3/00. Епоксикомпозитне покриття / Савчук П.П., Кашицький В.П., Мороз І.А., Малець В.М., **Матрунчик Д.М.**, Садова О.Л.; заявник і патентовласник Луцький національний технічний ун-т. – № u201910645; заявл. 28.10.19; опубл. 27.04.20, Бюл. № 8. *(Особистий внесок здобувача – здійснено пошук аналогів та прототипу).*

АНОТАЦІЯ

Матрунчик Д.М. «Розробка захисних епоксикомпозитних покриттів з керованими властивостями для лопаток вхідного направляючого апарату авіадвигунів». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. Дисертацію виконано у Луцькому національному технічному університеті, Луцьк. Подано на захист у Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2020.

Дисертаційна робота присвячена розробці нових модифікованих епоксикомпозитних покриттів наповнених високодисперсними апретованими частинками оксидів металів для захисту корпусів авіаційної техніки від атмосферного впливу та експлуатаційних факторів.

Досліджено характер структурування епоксиолімерів при зміні товщини покриття, в умовах інтенсивного впливу теплового поля. Визначено оптимальний вміст високодисперсних оксидів металів, модифікатора та розчинника для формування композиції на основі хімічно сумісних компонентів, що забезпечує високу технологічність при нанесенні розроблених покриттів. Встановлено позитивний вплив модифікуючих добавок на структуру та фізико-механічні властивості епоксикомпозитів. Зафіксовано підвищення механічних характеристик епоксикомпозитів за рахунок додаткової ультразвукової обробки композиції, яка сприяє підвищенню однорідності структури та усуненню дефектів структури.

Розроблені захисні покриття забезпечують високу адгезійну та когезійну міцність, що обумовлено наявністю порошоків оксидів металів в наповненій системі, а також високу стійкість до впливу циклічної зміни температур та динамічних навантажень завдяки формуванню полімерної сітки матриці, що містить сегменти макромолекул, здатні до релаксації напружень.

Розроблено технологію апретування поверхні високодисперсних наповнювачів термопластичним модифікатором та технологію формування захисних епоксикомпозитних покриттів методом пневматичного розпилення. Отримано акт дослідної перевірки властивостей розроблених двошарових захисних покриттів на основі епоксикомпозитів на підприємстві ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор», де підтверджено їх високі механічні та експлуатаційні характеристики.

Ключові слова: модифікатор, апретування, ультразвукова обробка, адгезійна міцність, високодисперсний наповнювач, авіаційна техніка.

АННОТАЦИЯ

Матрунчик Д.М. «Разработка защитных эпоксикомпозитных покрытий с управляемыми свойствами для лопаток входного направляющего аппарата авиадвигателей». – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. Диссертация выполнена в Луцком национальном техническом университете, Луцк. Представлена на защиту в Луцкий национальный технический университет, Луцк, 2020.

Диссертационная работа посвящена разработке новых модифицированных эпоксикомпозитных покрытий, наполненных высокодисперсными аппретированными частицами оксидов металлов, для защиты деталей и корпусов авиационной техники от атмосферного воздействия и эксплуатационных факторов.

Исследован характер структурирования эпоксиполимеров при изменении толщины покрытия в условиях интенсивного воздействия теплового поля. Определены оптимальное содержание высокодисперсных оксидов металлов, модификатора и растворителя для формирования композиции на основе химически совместимых компонентов, что обеспечивает высокую технологичность при нанесении разработанных покрытий. Установлено положительное влияние модифицирующих добавок на структуру и физико-механические свойства эпоксикомпозитов. Зафиксировано повышение механических характеристик эпоксикомпозитов за счет дополнительной ультразвуковой обработки композиции, которая способствует повышению однородности структуры и устранению дефектов структуры.

Разработанные покрытия обеспечивают высокую адгезионную и когезионную прочность, что обусловлено наличием порошков оксидов металлов в наполненной системе, а также высокую стойкость к воздействию циклического изменения температур и динамических нагрузок благодаря формированию полимерной сетки матрицы, которая содержит сегменты макромолекул, способны к релаксации напряжений.

Разработана технология аппретирования поверхности высокодисперсных наполнителей термопластичным модификатором и технология формирования защитных эпоксикомпозитных покрытий методом пневматического распыления. Получен акт опытной проверки свойств разработанных двухслойных защитных покрытий на основе эпоксикомпозитов на предприятии ДП «Луцкий ремонтный завод «Мотор», где подтверждено их высокие механические и эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова: модификатор, аппретирование, ультразвуковая обработка, адгезионная прочность, высокодисперсный наполнитель, авиационная техника.

ABSTRACT

Matrunchyk D.M. "Development of protective epoxy-composite coatings with controlled properties for the blades of the inlet guide apparatus of aircraft engines". - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences by speciality 05.02.01 – materials science. – Lutsk National Technical University, Lutsk, 2015. The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences by specialty 05.02.01 - materials science. The dissertation was completed at Lutsk National Technical University, Lutsk. The dissertation was submitted for defense at Lutsk National Technical University, Lutsk, 2020.

The dissertation is devoted to the development of new modified epoxy composite coatings filled with highly dispersed finished particles of metal oxides to protect details and aircraft hulls from weathering and operational factors.

The character of structuring of epoxy polymers at change of a thickness of a coating in the conditions of intensive influence of a thermal field is investigated. The optimal content of highly dispersed metal oxides, modifier and solvent for forming a composition based on chemically compatible components is determined. This provides high manufacturability when applying the developed coatings. The positive effect of modifying additives on the structure and physical and mechanical properties of epoxy composites has been established. Improving the mechanical properties of epoxy composites due to additional ultrasonic treatment of the composition, which helps to increase the homogeneity of the structure and eliminate structural defects, was found.

The developed protective coatings provide high adhesion and cohesion strength due to the presence of metal oxide powders in the filled system, as well as high resistance to cyclic temperature changes and dynamic loads due to the formation of a polymer matrix grid containing segments of macromolecules capable of stress relaxation.

The technology of surface finishing of highly dispersed fillers with thermoplastic modifier and the technology of forming of protective epoxy composite coatings by pneumatic spraying have been developed. An act of experimental verification of the properties of the developed two-layer protective coatings based on epoxy composites at the enterprise of SC «Lutsk Repair Plant «Motor» was obtained, where their high mechanical and operational characteristics were confirmed.

Keywords: modifier, finishing, ultrasonic treatment, adhesive strength, highly dispersed filler, aviation equipment.

Підписано до друку 19.05.2020 р.
Формат 60×90/16. Папір офсетний.
Умовн. друк. аркушів 0,75.
Тираж 100 прим. Зам. № 7

Друк – ІВВ Луцького НТУ. 43018, м. Луцьк, Львівська, 75
Свідоцтво держкомінформу України ДК № 4123 від 28.07.2011 р.