

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКАТОРА ТРИМЕТИЛХЛОРСИЛАНУ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ

Стухляк П. Д., д.т.н., професор, професор кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих технологій», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: stukhlyakpetro@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9067-5543;
Яцюк В. М., к.х.н., заступник завідувача відділу досліджень матеріалів, речовин і виробів, Тернопільський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, м. Тернопіль, Україна, e-mail: yatsuk-@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0103-1250;
Золотий Р. З., к.т.н., доцент, доцент кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих технологій», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: zolotyuy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9435-2642;
Тотосько О. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих технологій», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: totosko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6002-1477;
Стухляк Д. П., к.т.н., доцент, доцент кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих технологій», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: itaniumua@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9404-4359;
Дідуник О. А., аспірант, аспірант кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих технологій», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: astevgan@gmail.com, ORCID: 0009-0007-4385-7644.

Дослідження взаємодії на межі поділу фаз «олігомер-модифікатор» за рахунок структурної взаємодії в процесі формування епоксидної матриці для підвищення фізико-механічних характеристик композитних матеріалів є важливим на даний час. У даному напрямку досліджень для науково-прогнозованого впливу на експлуатаційні характеристики матеріалів є використання модифікатора на основі триметилхлорсилану для зв'язувачів ЕД-20 (Україна) та ЕРОХУ 520 (Чехія). Для впливу на процес структуроутворення використано запропонований науково-дослідним експертно-криміналістичним центром при УМВС України Тернопільської області модифікатор триметилхлорсилану (ТМХС-1). Встановлено, що для епоксидного олігомеру ЕД-20 введення модифікатора ТМХС-1 у кількості 0,25 г на 100 г ЕД-20 покращує міцність адгезійних з'єднань на 30%. Для епоксидного олігомеру ЕРОХУ 520 введення модифікатора в кількості 0,25 г забезпечує зростання модуля Юнга на 70% і покращення ударної в'язкості на 12% з незначним підвищенням залишкових напружень. Доведено, що вміст модифікатора в кількості 0,75 г приводить до підвищення міцності адгезійних з'єднань на 100%, модуля юнга на 15%. Встановлено, що введення модифікатора в кількості 0,25 г на 100 г олігомеру для обох зв'язувачів та 0,75 г для епоксидної смоли ЕРОХУ 520 приводить до покращення фізико-механічних та теплофізичних характеристик епоксидних зв'язувачів за рахунок взаємодії реакційно здатних груп модифікатора з макромолекулами зв'язувачів.

Ключові слова: зв'язувач; триметилхлорсилан; адгезія; теплостійкість; залишкові напруження; композитний матеріал; матриця.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.111-122

Вступ. На сучасному етапі розвитку науки і техніки створення нових матеріалів, які забезпечують комплекс необхідних функціональних властивостей для покращення ефективності використання обладнання, підвищити довговічність його роботи, що забезпечує збільшення міжремонтного періоду експлуатації і зменшення енерго- та металоємності. Однією з важливих проблем розробки композитних матеріалів з високими експлуатаційними характеристиками є забезпечення адгезійної взаємодії на межі поділу фаз при використанні модифікаторів та пластифікаторів у системі «модифікований епоксидний зв'язувач – наповнювач». Введення вказаних добавок суттєво впливає на величину залишкових напружень після формування матеріалу і їх можливу релаксацію у процесі

експлуатації виробів при використанні композитів. Встановлено, що залишкові напруження виникають внаслідок міжфазної взаємодії при формуванні матеріалу за рахунок утворення фізичних і хімічних зв'язків між компонентами системи, а також – внаслідок зменшення об'єму композитів під час усадки [1, 2]. Важливе значення також має різниця між термічним коефіцієнтом лінійного розширення твердої фази – наповнювача і полімерної матриці. Залишкові напруження можуть змінюватись за рахунок рекомбінації та зміни конфірмаційного набору макромолекул у епоксикомпозитному матеріалі, що використані як покриття робочих поверхонь деталей виробів. Тому, важливою є розробка нових методів регулювання швидкості проходження фізико-хімічних процесів при структуроутворенні матеріалу, що дозволяє науково-прогнозовано впливати на властивості композитних матеріалах при їхній експлуатації надалі.

До теперішнього часу відомо ряд традиційних методів регулювання як залишкових напружень, так і когезійної міцності системи в цілому [3, 4]. Це зокрема, прогнозована зміна температурно-часових параметрів формування епоксикомпозитів, тиску і вологості навколишнього середовища, співвідношення між компонентами у гетерогенних системах. Такий підхід дозволяє у комплексі покращити експлуатаційні характеристики композитних матеріалів, внаслідок покращення міжфазної взаємодії і прогнозованого регулювання проходження структурних процесів при формуванні матеріалу. Зазначимо, що такі методи модифікації є екологічно чистими і відносно дешевими порівняно з традиційними [5–7].

На даний час важливим є дослідження взаємодії, що відбуваються на межі поділу фаз «олігомер-модифікатор», за рахунок структуроутворення в процесі формування епоксикомпозитів. Суттєво на такі процеси можна впливати за рахунок введення в олігомерну матрицю додаткових модифікаторів до початку процесу тверднення. Введення модифікуючих добавок у процесі формування композиту дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики матеріалів. У зв'язку з викладеним вище дослідження впливу модифікаторів на основні характеристики епоксикомпозитів є на сьогоднішній час актуальною задачею сучасного матеріалознавства [8, 9].

Мета роботи. Дослідити вплив модифікатора на основі триметилхлорсилану на фізико-механічні властивості епоксикомпозитних олігомерів для отримання матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Матеріали та методи. Як об'єкт дослідження вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 з вмістом епоксидних груп 19,9–22,0% і молекулярною масою 390–430 г/моль, який характеризується незначною усадкою, високою адгезійною та когезійною міцністю, технологічністю при нанесенні на довговимірні поверхні складного профілю, розвинутою сировинною базою [10, 11]. Враховуючи те, що більшість матеріалів на основі епоксидного зв'язувача використовують у вигляді покриттів, за умови їх формування на робочих поверхнях деталей машин, для зшивання епоксидного зв'язувача використано твердник поліетиленполіамін, який забезпечує формування композитних матеріалів (КМ) при кімнатних температурах [12, 13]. У дослідженнях використано два види зв'язувача: епоксидіановий олігомер ЕД-20 вітчизняного виробництва та закордонний аналог ЕРОХУ-520 виробництва Чехії. Як твердник використано поліетиленполіамін (ПЕПА) при стехіометричному співвідношенні компонентів ЕД-20 : ПЕПА=100 мас.ч. : 10 мас.ч. Для впливу на процес структуроутворення використано запропонований науково-дослідним експертно-криміналістичним центром при УМВС України Тернопільської області модифікатор на основі триметилхлорсилану (ТМХС-1).

Триметилхлорсилан широко використовується в органічному синтезі, як джерело триметилсилільної групи, так як і безводне джерело хлориду. Функціональні групи спиртів та амінів легко піддаються реакції з триметилхлорсиланом, утворюючи триметилсилільні ефіри або триметилсилільні аміни [14, 15]. Отримані групи можуть бути використані як захисні групи. Даний модифікатор є рідиною, структурна формула якого приведена на рис. 1.

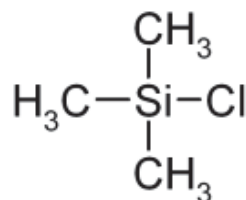


Рисунок 1 – Структурна формула триметилхлорсилану (ТМХС-1)

Фізико-хімічні властивості

- Молекулярна формула: $(\text{CH}_3)_3\text{SiCl}$.
- Молекулярна маса: 108,7 г/моль.
- Температура кипіння: 57°C.
- Температура плавлення: - 58°C.
- Температура спалаху: - 28°C (закрита чашка).
- Тиск пари: 26,7 кПа (при 20°C).
- Розчинність у воді: Реагує (гідроліз) з утворенням соляної кислоти.
- Зовнішній вигляд: Безбарвна або злегка жовтувата прозора рідина.

При дослідженні епоксидних композитних матеріалів використовували відомі методи дослідження фізико-механічних властивостей епоксикомпозитних матеріалів [16–19], а саме: залишкові напруження, ударна в'язкість, міцність адгезійних з'єднань, миттєвий модуль пружності та теплостійкість.

Залишкові напруження в епоксидних композитах оцінювали дифракційним методом, який ґрунтується на вимірюванні деформації кристалічної ґратки за зміщенням максимумів дифракційних піків. Узагальнену процедуру визначення залишкових напружень дифракційними методами використовуючи стандарт ISO 20104 «Residual stress measurement by diffraction methods», із врахуванням вимог до підготовки зразків, калібрування обладнання, знімання та оброблення дифрактограм.

Ударну в'язкість епоксикомпозитів зазвичай визначають за результатами маятникових випробувань за методом Шарпі. Відповідно до ISO 179-1:2023 «Plastics — Determination of Charpy impact properties — Part 1: Non-instrumented impact test» випробування проводили на брусках, встановлених на опори як однопролітну балку; маятниковим копером наносять одиничний удар, а поглинуту енергію руйнування ділять на площу перерізу в зоні руйнування, отримуючи величину ударної в'язкості в кДж/м².

Міцність клейових (адгезійних) з'єднань епоксидних композитів доцільно оцінювати за схемою випробування на розтяг з перекриттям (lap-shear). Стандарт ISO 4587:2003 «Adhesives — Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies» регламентує виготовлення зразків із двох жорстких пластин із заданими розмірами зони перекриття, умови витримки до випробувань та швидкість навантаження. Під час випробування зразок розтягують до руйнування адгезійного шару, а міцність зчеплення визначають як відношення максимальної руйнівної сили до площі перекриття клеєного шва.

Миттєвий (початковий) модуль пружності епоксикомпозиту визначають із діаграми «напруження–деформація», отриманої під час статичного розтягувального випробування. Загальні принципи таких випробувань наведено в ISO 527-1:2019 «Plastics — Determination of tensile properties — Part 1: General principles», а умови для литих/пресованих пластмас і композитів – у відповідних частинах ISO 527-2.

Теплостійкість епоксидних композитів часто характеризують температурою прогину під навантаженням (HDT). Відповідно до ISO 75-1:2020 «Plastics — Determination of temperature of deflection under load — Part 1: General test method» зразок у вигляді балки навантажують у схемі триточкового згину заданим навантаженням, після чого температуру середовища підвищують із фіксованою швидкістю; температурою теплостійкості вважають температуру, за якої прогин досягає заданого значення рівного 6 мм, при довжині зразка 100 мм.

Композитні матеріали формували методом гідродинамічного суміщення компонентів. З метою визначення оптимального співвідношення компонентів у системі проведено дослідження властивостей КМ під впливом динамічних навантажень та підвищених температурах залежно від вмісту модифікатора.

Обговорення результатів досліджень. Випробування проводили у кілька послідовних етапів: дослідження фізико-механічних характеристик та теплопровідності епоксидного матеріалу від вмісту модифікатора.

Одним з факторів, що визначають поведінку матеріалу у процесі експлуатації є співвідношення величини міцності адгезійних з'єднань і залишкових напружень. При введенні модифікаторів у епоксидну матрицю зміна вказаних характеристик свідчить про зміну механізму взаємодії при зшиванні епоксидної матриці. Проте високі значення залишкових напружень є негативним фактором, що призводять до погіршення експлуатаційних характеристик матеріалу – появи мікротріщин, часткових деформацій, відшарування покриттів тощо. [20, 21].

Досліджено зміну залишкових напружень ($\sigma_{\text{зал}}$) при використанні ЕД-20 залежно від вмісту модифікатора (рис 2). Найвищі показники зареєстровані при введенні 0,1 г модифікатора на 100 г вказаного зв'язувача ($\sigma_{\text{зал}}=0,463$ МПа для ЕД-20 та $\sigma_{\text{зал}}=0,337$ МПа для ЕРОХУ-520) і при 1 г модифікатора на 100 г зв'язувача ($\sigma_{\text{зал}}=0,499$ МПа для ЕД-20 та $\sigma_{\text{зал}}=0,354$ МПа для ЕРОХУ-520). Найменші значення залишкових напружень виявлено при додаванні 0,25 г модифікатора на 100 г епоксидного матеріалу для ЕД-20 ($\sigma_{\text{зал}}=0,264$ МПа) та при вмісті модифікатора 0,75 г на 100 г ЕРОХУ-520 ($\sigma_{\text{зал}}=0,085$ МПа).

Залишкові напруження при введенні модифікатора в епоксидний зв'язувач ТМХС-1 з основою смоли ЕРОХУ-520, змінюються від вмісту модифікатора. Максимальні значення залишкових напружень зареєстровані при введенні 0,1 г і при 1 г модифікатора на 100 г зв'язувача (тут і надалі по тексту концентрацію модифікатора приведена на 100 г епоксидного зв'язувача). Такі ж значення вказаного показника характерні для матеріалу без модифікатора.



Рисунок 2 – Залежність залишкових напружень епоксидної матриці (ЕД-20 та ЕРОХУ 520) від вмісту модифікатора ТМХС-1

Експериментальними дослідженнями встановлено неоднозначний вплив концентрації модифікатора в епоксидному матеріалі на величину залишкових напружень. На нашу думку, модифікування впливає на структурну організацію в матеріалі, тому слід очікувати зміну й інших характеристик КМ. Вважаємо, що в матеріалі проходять одночасно процеси зшивання і пластифікації в епоксидному зв'язувачі. У процесі формування покриттів виникнення залишкових напружень створює проблему для покриття в цілому. Підвищення залишкових

напружень негативно впливає на механічні та функціональні характеристики, оскільки вони часто призводять до передчасного виходу з ладу через відшарування покриття та, в окремих випадках до деформації епоксикомпозиту. Відшарування часто починається з кутів та заглиблень, які характерні концентраторами напружень при формуванні виробу. Вирішити вказану проблему можуть модифікатори за рахунок зміни механізму структуроутворення в композиті, що впливає на механічні та теплофізичні властивості. Модифікатор, у цьому випадку, взаємодіє з макромолекулами зв'язувача, що впливає на процеси утворення полімерної сітки. У цьому випадку модифікатор, що використовують, може діяти як пластифікатор, збільшуючи вільний об'єм та забезпечуючи суттєву зміну конфірмаційного набору макромолекул. Слід очікувати релаксацію напружень навіть за нижчих температур, що покращує міжфазну взаємодію [21–23].

Міцність адгезійних з'єднань в епоксидних композитах залежить від таких факторів, як тип зв'язувача, конструкція з'єднання, підготовка та топологія поверхні робочих поверхонь деталей обладнання. Ця характеристика відображає міцність, з якою епоксикомпозит взаємодіє з основою і зумовлює його адгезійні характеристики [24, 25].

Експериментально встановлено утворення кількох екстремумів при дослідженні міцності адгезійних з'єднань (рис. 3) при використанні епоксидної смоли ЕД-20 з модифікатором. Найвищий результат зафіксований при вмісті 0,25 г модифікатора на 100 г зв'язувача ($\sigma_a=161,0$ МПа). При введенні 0,1 г та 0,5 г модифікатора міцність адгезійних з'єднань нижча ніж у чистій смоли ($\sigma_a=86,8$ МПа та $\sigma_a=93,0$ МПа відповідно), а при вмісті модифікатора 1 г на 100 г зв'язувача $\sigma_a=119,2$ МПа.

Доведено, що результати досліджень міцності адгезійних з'єднань, при використанні ЕРОХУ 520, також спостерігали два екстремуми від концентрації модифікатора. Встановлено, що при додаванні 0,75 г модифікатора $\sigma_a=146,3$ МПа. При вмісті 0,1 г і 0,25 г модифікатора на 100 г зв'язувача значення параметра становить $\sigma_a=87,8$ МПа та 124,4 МПа відповідно, а при додаванні 1 г модифікатора на 100 г зв'язувача $\sigma_a=61,7$ МПа (тут і далі по тексту концентрацію модифікатора приведена на 100 г епоксидного зв'язувача).

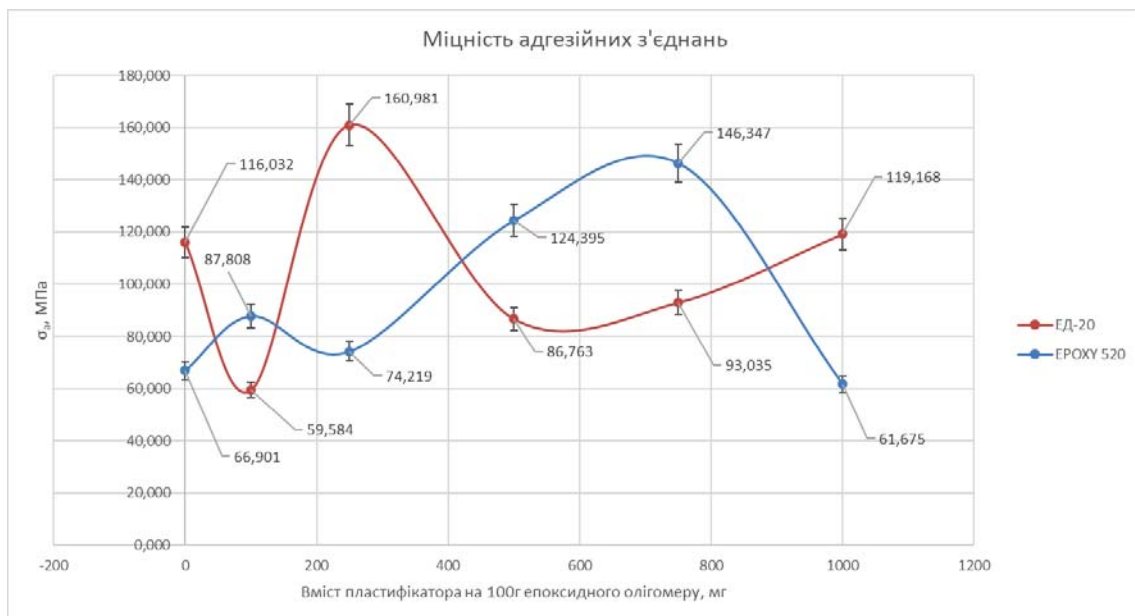


Рисунок 3 – Залежність міцності адгезійних з'єднань епоксидної матриці (ЕД-20 та ЕРОХУ 520) від вмісту модифікатора ТМХС-1

Залежність миттєвого модуля пружності епоксидної матриці від вмісту модифікатора приведено на рис. 4. Модуль Юнга (E) для епоксидної смоли є важливою механічною характеристикою, яка визначає його здатність чинити опір під дією зовнішніх навантажень. За допомогою вказаної характеристики можна оцінити деформацію покриттів при розтягуванні або стисненні епоксидного матеріалу [26, 27].

Показники модуля Юнга при додаванні модифікатора до матриці ЕД-20, при 0,1, 0,5 і 0,75 г дещо нижчі від чистої смоли, досягаючи свого мінімуму при 0,5 г модифікатора на 100 г зв'язувача ($E=0,686$ ГПа). При концентраціях у 0,25 і 1 г модифікатора E вищі від E чистої смоли. Максимальне значення спостерігали при концентрації 0,25 г модифікатора $E=1,192$ ГПа.

Результати досліджень миттєвого модуля Юнга при додаванні модифікатора до смоли ЕРОХУ 520 при вмісті в 0,1 г дещо нижчі від чистої смоли. При вмісті 0,5, 0,75 і 1 г модифікатора на 100 г зв'язувача результати досліджень модуля Юнга підвищуються. Найвищий показник модуля Юнга експериментально встановлений при вмісті в 0,25 г модифікатора $E=1,981$ ГПа.

Результати досліджень ударної в'язкості з'єднань епоксидної матриці від вмісту модифікатора приведено на рис. 5. Ударна в'язкість епоксикомпозитів – це основний показник при динамічних навантаженнях та характеризує можливість виробу витримувати ударні знакозмінні циклічні навантаження [28, 29].

Показники ударної в'язкості при дослідженні зв'язувача ЕД-20, практично не змінюються залежно від вмісту модифікатора, за винятком 0,1 г ТМХС-1, де вони найнижчі ($a=7,70$ кДж/м²).



Рисунок 4 – Залежність миттєвого модуля пружності епоксидної матриці (ЕД-20 та ЕРОХУ 520) від вмісту модифікатора ТМХС-1



Рисунок 5 – Залежність ударної в'язкості з'єднань епоксидної матриці (ЕД-20 та ЕРОХУ 520) від вмісту модифікатора ТМХС-1

Дослідженнями впливу модифікатора на олігомер ЕРОХУ 520 встановлено підвищення ударної в'язкості при збільшенні вмісту модифікатора 0,5 г, яка становить $a = 9,13 \text{ кДж/м}^2$. Надалі даний показник зменшується і при 0,75 і 1 г а досягає нижчих показників ніж у немодифікованому зв'язувачі.

Залежність показника теплостійкості епоксидної матриці від вмісту модифікатора приведено на рис. 6.

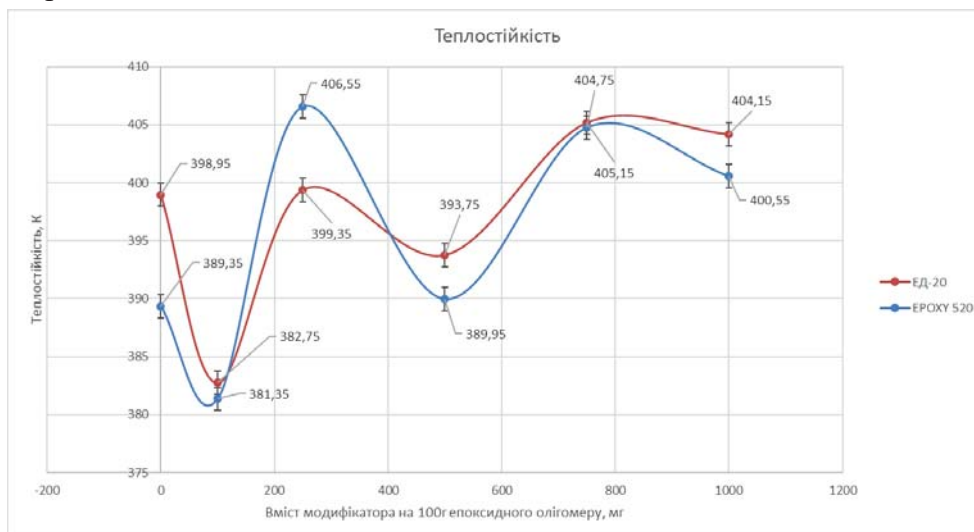


Рисунок 6 – Залежність теплостійкості епоксидної матриці (ЕД-20 та ЕРОХУ 520) від вмісту модифікатора ТМХС-1

Важливими теплофізичними властивостями, що впливають на експлуатаційні характеристики полімеркомпозиційних покриттів є теплостійкість [30]. У роботі було проведено дослідження теплостійкості за Мартенсом.

Досліджено вплив модифікатора на теплостійкість смоли ЕД-20. Виявлено зниження даного показника при вмісті 0,1 г та 0,5 г модифікатора – теплостійкість нижча ніж у немодифікованому зв'язувачі. Встановлено, що при вмісті в 0,25 г різниця теплостійкості порівняно з чистою смолою мінімальна. При додаванні 0,75 і 1 г модифікатора теплостійкість вища ніж у немодифікованого зв'язувача і досягала максимального значення $T = 404,75 \text{ К}$ при концентрації 0,75 г модифікатора (тут і надалі по тексту концентрацію модифікатора приведена на 100 г епоксидного зв'язувача).

Вивчаючи вплив модифікатора на теплостійкість смоли ЕРОХУ 520 спостерігали зниження даного показника при вмісті 0,1 г і 0,5 г, при яких теплостійкість нижча (при 0,1 г) або рівна (при 0,5 г) відносно чистої смоли. Водночас при вмісті в 0,25 г модифікатора теплостійкість покращилась до $T=406,55 \text{ К}$. При додаванні 0,75 г і 1 г модифікатора теплостійкість вища ніж у чистої смоли $T=405,15 \text{ К}$ та $T=400,55 \text{ К}$ відповідно).

Аналізуючи результати експериментальних досліджень для епоксидного олігомеру ЕД-20 можна стверджувати, що додавання 1 г модифікатора не рекомендують для використання. Значно знижується теплостійкість, миттєвий модуль пружності та міцності адгезійних з'єднань епоксидного олігомера. З іншого боку введення модифікатора у кількості 0,25 г знижує залишкові напруження та покращує досліджувані характеристики. Аналізуючи експериментальні дані можна стверджувати, що введення модифікатора ТМХС-1 у кількості 0,25 г на 100г ЕД-20 доцільно для покращення адгезії. Са зростає на 30%. Незначне підвищення всіх досліджуваних характеристик (на 1–3%) супроводжується підвищенням залишкових напружень на 70%. Введення модифікатора ТМХС-1 у кількості 0,75 г забезпечує підвищення теплостійкості на 1,5%, змінює фізико-механічні характеристики у межах похибки експерименту. Тому введення модифікатора в інших концентраціях не рекомендовано для використання.

Для епоксидного олігомеру ЕРОХУ 520 введення олігомеру в кількості 0,25 мг забезпечує зростання теплостійкості, модуля Юнга на 70% та покращує ударну в'язкість на

12% при незначному підвищенні залишкових напружень. Також введення модифікатора в кількості 0,75 г приводить до підвищення міцності адгезійних з'єднань на 100%, модуля пружності на 15%. Теплостійкість і залишкові напруження змінюються в межах похибки експерименту. Введення модифікатора при інших концентраціях не призводить до комплексного покращення властивостей матеріалів.

Висновки. Проведено дослідження впливу розробленого модифікатора – триметилхлорсилану на фізико-механічні характеристики епоксидних олігомерів ЕД-20 (Україна) та ЕРОХУ 520 (Чехія). Встановлено, що введення модифікатора в кількості 0,25 г на 100 г олігомеру для обох матриць та 0,75 г для епоксидної смоли ЕРОХУ 520 приводить до покращення фізико-механічних та теплофізичних характеристик епоксидних матеріалів за рахунок впливу реакційноздатних зв'язків модифікатора на процеси структуроутворення. Інші концентрації модифікатора не рекомендовані для застосування і потребують подальшого дослідження.

Перспективи подальших досліджень. Планується вдосконалити структуру модифікатора та провести більш детальне вивчення впливу інших концентрацій на більш широкий спектр характеристик при наповненні епоксикомпозитів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Korzhyk V., Kushnarova O., Berdnikova O., Stukhliak P., Kolisnichenko O. & Totosko O. Influence of Structure on the Properties of Coatings During Multi-Chamber Detonation Spraying of Al₂O₃ Powder on Steel. 2024 IEEE 14th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), 1–4. <https://doi.org/10.1109/NAP62956.2024.107397072>.
2. Korzhyk V. M., Stukhliak P. D., Berdnikova O. M., Totosko O. V., Stukhliak D. P., Demyanov O. I. & Lepilina K. M. Protection Against Ultrahigh-Frequency Electromagnetic Radiation Using Multilayer Polymer-Composite Coatings. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 23(1), 2025. 149–165. Scopus. <https://doi.org/10.15407/nnn.23.01.01494>.
3. Eom Y. S., Boogh Louis, Michaud Véronique, Manson J.-A. E. Internal Stress Control in Epoxy Resins and their Composites by Material and Process Tailoring. *Polymer Composites*. 2002. 23. <https://doi.org/10.1002/pc.10500>.
4. Miturska Izabela, RudawskaAnna, Miroslav Müller, Hromasová Monika. The Influence of Mixing Methods of Epoxy Composition Ingredients on Selected Mechanical Properties of Modified Epoxy Construction Materials. *Materials* 2021, 14(2), 411. <https://doi.org/10.3390/ma14020411>.
5. Kashytskyi V. P., Sadova O. L., Melnychuk M. D., Golodyuk G. I., Klymovets O. B. Structuring of modified epoxy composite materials by infrared spectroscopy. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10(1), 2023. C9–C16, [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(1\).c2](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).c2).
6. Stukhlyak P. D., Holotenko O. S., Zoloty R. Z., Mykytyshyn A. G. Investigation of superhigh-frequency treatment influence on structuring of epoxy composites by infrared- and electron paramagnetic resonance spectroscopy analyses. *Functional Materials*, 28(2), 2021. 394–402. Scopus. <https://doi.org/10.15407/FM28.02.394>.
7. Kartashov V., Stukhlyak D., Holotenko O., Dobrotvor I., Mikitishin A., Mytnyk M., Marukha V. & Skorokhod O. Research into parameters of magnetic treatment to modify the disperse-filled epoxy composite materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(12 (94)), 2018. 23–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140876>.
8. Monte S. J. Diluents and viscosity modifiers for epoxy resins. In: Pritchard, G. (eds) *Plastics Additives. Polymer Science and Technology Series*, vol 1. Springer, Dordrecht. 1998. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5862-6_24.
9. Jyotish J., Mahapatra B. K., Moharana S., Mahaling R.N. Chemistry and Types of Epoxy Resins. In: Pradhan, S., Moharana, S., Mohanty, S. (eds) *Recent Advances on Waterborne Epoxy Coatings. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials*. Springer, Singapore. 2025. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3260-2_2.

10. Sapronov O., Buketov A., Sapronova L. & Vorobiov P. Development of epoxy composites resistant to impact loads. *Advanced polymer materials and technologies: recent trends and current priorities: multi-authored monograph*. Lviv Polytechnic National University, 2022. pp. 41–47.
11. Buketov A., Smetankin Serhiy, Maruschak Pavlo, Yurenin Kyrylo, Sapronov Oleksandr, Matvyeyev Viktor, Menou Abdellah. New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. *Transport*. 35. 2021. 679–690. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14286>.
12. Buketov A., Stukhlyak P., Maruschak P., Panin S. V. & Menou A. Regularities of Impact Failure of Epoxy Composites with Al₂O₃ Microfiller and their Analysis on the Basis of External Surface Layer Concept. *Key Engineering Materials*, 712, 2016. 149–154. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.149>.
13. Stukhlyak P. D., Holotenko O. S., Dobrotvor I. H. & Mytnyk M. M. Investigation of the Adhesive Strength and Residual Stresses in Epoxy Composites Modified by Microwave Electromagnetic Treatment. *Materials Science*, 51(2), 2015. 208–212. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9830-z>.
14. Bondarchuk D. A., Fedulov B. N., Fedorenko A. N. The effect of residual stress induced by manufacturing on strength on free edge of carbon-epoxy composite with [00/900]_n layup. 25th International Conference on Fracture and Structural Integrity, Volume 18, 2019, pp. 353–367.
15. Sheng-Wen Chen, Yu-Sheng Wang, Shao-Yu Hu, Wen-Hsi Lee, Chieh-Cheng Chi, Ying-Lang Wang. A Study of Trimethylsilane (3MS) and Tetramethylsilane (4MS) Based α -SiCN:H/ α -SiCO:H Diffusion Barrier Films. *Materials (Basel)*, 2012 Mar. 2.5(3), 2012. 377–384. <https://doi.org/10.3390/ma5030377>.
16. Xuewen Li, Jiwei Liu, Hao Wu, Kesong Miao, He Wu, Rengeng Li, Chenglu Liu, Wenbin Fang, Guohua Fan. Research progress of residual stress measurement methods, *Heliyon*, Volume 10, 2024. Issue 7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28348>.
17. Borges, Catarina, Akhavan-Safar Alireza, Tsokanas Panayiotis, Carbas Ricardo, Marques Eduardo, Silva L.F.M. From fundamental concepts to recent developments in the adhesive bonding technology: a general view. *Discover Mechanical Engineering*. 2023. 10.1007/s44245-023-00014-7.
18. Demiral M. Strength in Adhesion: A Multi-Mechanics Review Covering Tensile, Shear, Fracture, Fatigue, Creep, and Impact Behavior of Polymer Bonding in Composites. *Polymers*, 2025. 17(19), 2600. <https://doi.org/10.3390/polym17192600>.
19. Syed Fahad Hassan, Saratchandra Kundurthi, Suhail Hyder Vattathurvalappil, Gary Cloud, Mahmoodul Haq. A hybrid experimental and numerical technique for evaluating residual strains/stresses in bonded lap joints, *Composites Part B: Engineering*, Volume 225, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109216>.
20. Ruikun Wang, Chunyan Qu, Dezhi Wang and other. A study of the residual stress behavior of rigid and flexible epoxy adhesives during thermal cycle aging for electronics packaging. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2023. <https://doi.org/10.1080/01694243.2023.2240550>.
21. Mohammadali Rastak, Mahmood Shokrieh, Laurent Barrallier, Regis Kubler, Danial Salehi. Estimation of residual stresses in polymer-matrix composites using digital image correlation. In book: *Residual Stresses in Composite Materials*. 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818817-0.00001-9>.
22. Man-Lung Sham, Jang-Kyo Kim. Evolution of residual stresses in modified epoxy resins for electronic packaging applications, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 35, Issue 5, Pages 537–546, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.01.002>.
23. Ranjan K. Behera S. K. Parida R. R. Das Effect of using fibre reinforced epoxy adhesive on the strength of the adhesively bonded Single Lap Joints, *Composites*

Part B: Engineering, Volume 248, 110358, 2023. ISSN 1359–8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110358>.

24. Tan Wei, Na Jingxin, Zhou Zhaofeng. Effect of Service Temperature on Mechanical Properties of Adhesive Joints after Hygrothermal Aging. *Polymers*. 13. 3741. 2021. 10.3390/polym13213741.

25. Khun N. W., Dawei Sun, Huang M. X., Yang Jinglei, Yue Chee. Wear resistant epoxy composites with diisocyanate-based self-healing functionality. *Wear*. 313. 2014. 19–28. 10.1016/j.wear.2014.02.011.

26. Kamil Anasiewicz, Józef Kuczmazewski. Apparent Young's Modulus of Epoxy Adhesives. Department of Mechanical Engineering, Lublin University of Technology, 20-618 Lublin, Poland Author to whom correspondence should be addressed. *Materials* 15(22), 2022. 8060. <https://doi.org/10.3390/ma15228060>.

27. Anasiewicz K., Kuczmazewski J. Apparent Young's modulus of epoxy adhesives in metal bonding. *Przegląd Spaw*, 88, 2016. 131–134.

28. Matykiewicz Danuta, Barczewski Mateusz, Mousa Marwan, M R Sanjay, Siengchin Suchart. Impact Strength of Hybrid Epoxy–Basalt Composites Modified with Mineral and Natural Fillers. *ChemEngineering*. 5. 56. 2021. <https://doi.org/10.3390/chemengineering5030056>.

29. Yang, Kang, Wu (吴素君), SuJun Shao, Zhengzhong Ritchie, Robert. Enhancing the Mechanical Toughness of Epoxy-Resin Composites Using Natural Silk Reinforcements OPEN. *Scientific Reports*. 2017. 7. 11939. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11919-1>.

30. Sun Yangyang, Zhang Zhuqing, Moon Kyoung-sik, Wong C. P. Glass transition and relaxation behavior of epoxy nanocomposites. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 42. 2004. 3849–3858. <https://doi.org/10.1002/polb.20251>.

REFERENCES

1. Korzhyk, V., Kushnarova, O., Berdnikova, O., Stukhliak, P., Kolisnichenko, O., & Totosko, O. (2024). Influence of Structure on the Properties of Coatings During Multi-Chamber Detonation Spraying of Al₂ O₃ Powder on Steel. 2024 IEEE 14th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), 1–4. <https://doi.org/10.1109/NAP62956.2024.107397072>.

2. Korzhyk, V. M., Stukhliak, P. D., Berdnikova, O. M., Totosko, O. V., Stukhliak, D. P., Demyanov, O. I., & Lepilina, K. M. (2025). Protection Against Ultrahigh-Frequency Electromagnetic Radiation Using Multilayer Polymer-Composite Coatings. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 23(1), 149–165. Scopus. <https://doi.org/10.15407/nnn.23.01.01494>.

3. Eom, Y. S., Boogh, Louis, Michaud, Véronique, Månson, J.-A. E. (2002). Internal Stress Control in Epoxy Resins and their Composites by Material and Process Tailoring. *Polymer Composites*. 23. <https://doi.org/10.1002/pc.10500>.

4. Miturska Izabela, RudawskaAnna, Miroslav Müller, Hromasová Monika (2021). The Influence of Mixing Methods of Epoxy Composition Ingredients on Selected Mechanical Properties of Modified Epoxy Construction Materials. *Materials* 2021, 14(2), 411. <https://doi.org/10.3390/ma14020411>.

5. Kashytskyi, V. P., Sadova, O. L., Melnychuk, M. D., Golodyuk, G. I., Klymovets, O. B. (2023). Structuring of modified epoxy composite materials by infrared spectroscopy. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10(1), C9–C16, [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(1\).c2](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).c2).

6. Stukhlyak, P. D., Holotenko, O. S., Zoloty, R. Z., Mykytyshyn, A. G. (2021). Investigation of superhigh-frequency treatment influence on structuring of epoxy composites by infrared- and electron paramagnetic resonance spectroscopy analyses. *Functional Materials*, 28(2), 394–402. Scopus. <https://doi.org/10.15407/FM28.02.394>.

7. Kartashov, V., Stukhlyak, D., Holotenko, O., Dobrotvor, I., Mikitishin, A., Mytnyk, M., Marukha, V., & Skorokhod, O. (2018). Research into parameters of magnetic treatment to modify

the disperse-filled epoxy composite materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(12 (94)), 23–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140876>.

8. Monte, S. J. (1998). Diluents and viscosity modifiers for epoxy resins. In: Pritchard, G. (eds) *Plastics Additives. Polymer Science and Technology Series*, vol 1. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5862-6_24.

9. Jyotish, J., Mahapatra, B. K., Moharana, S., Mahaling, R. N. (2025). Chemistry and Types of Epoxy Resins. In: Pradhan, S., Moharana, S., Mohanty, S. (eds) *Recent Advances on Waterborne Epoxy Coatings. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3260-2_2.

10. Sapronov, O., Buketov, A., Sapronova, L. & Vorobiov, P. (2022). Development of epoxy composites resistant to impact loads. *Advanced polymer materials and technologies: recent trends and current priorities: multi-authored monograph*. Lviv Polytechnic National University, 41–47.

11. Buketov, A., Smetankin Serhiy, Maruschak Pavlo, Yurenin Kyrylo, Sapronov Oleksandr, Matvyeyev Viktor, Menou Abdellah. (2021). New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. *Transport*. 35. 679–690. [10.3846/transport.2020.14286](https://doi.org/10.3846/transport.2020.14286).

12. Buketov, A., Stukhlyak, P., Maruschak, P., Panin, S. V., & Menou, A. (2016). Regularities of Impact Failure of Epoxy Composites with Al₂O₃ Microfiller and their Analysis on the Basis of External Surface Layer Concept. *Key Engineering Materials*, 712, 149–154. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.149>.

13. Stukhlyak, P. D., Holotenko, O. S., Dobrotvor, I. H., & Mytnyk, M. M. (2015). Investigation of the Adhesive Strength and Residual Stresses in Epoxy Composites Modified by Microwave Electromagnetic Treatment. *Materials Science*, 51(2), 208–212. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9830-z>.

14. Bondarchuk D. A., Fedulov B. N., Fedorenko A. N. (2019). The effect of residual stress induced by manufacturing on strength on free edge of carbon-epoxy composite with [00/900]_n layup. *25th International Conference on Fracture and Structural Integrity*, Volume 18, 353–367.

15. Sheng-Wen Chen, Yu-Sheng Wang, Shao-Yu Hu, Wen-Hsi Lee, Chieh-Cheng Chi, Ying-Lang Wang (2012). A Study of Trimethylsilane (3MS) and Tetramethylsilane (4MS) Based α -SiCN:H/ α -SiCO:H Diffusion Barrier Films. *Materials (Basel)*, 2012 Mar. 2.5(3), 377–384. <https://doi.org/10.3390/ma5030377>.

16. Xuewen, Li, Jiwei, Liu, Hao, Wu, Kesong, Miao, He, Wu, Rengeng, Li, Chenglu, Liu, Wenbin, Fang, Guohua, Fan (2024). Research progress of residual stress measurement methods, *Heliyon*, Volume 10, Issue 7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28348>.

17. Borges, Catarina, Akhavan-Safar Alireza, Tsokanas Panayiotis, Carbas Ricardo, Marques Eduardo, Silva L.F.M. (2023). From fundamental concepts to recent developments in the adhesive bonding technology: a general view. *Discover Mechanical Engineering*. [10.1007/s44245-023-00014-7](https://doi.org/10.1007/s44245-023-00014-7).

18. Demiral, M. (2025). Strength in Adhesion: A Multi-Mechanics Review Covering Tensile, Shear, Fracture, Fatigue, Creep, and Impact Behavior of Polymer Bonding in Composites. *Polymers*, 17(19), 2600. <https://doi.org/10.3390/polym17192600>.

19. Syed Fahad Hassan, Saratchandra Kundurthi, Suhail Hyder Vattathurvalappil, Gary Cloud, Mahmoodul Haq (2021). A hybrid experimental and numerical technique for evaluating residual strains/stresses in bonded lap joints, *Composites Part B: Engineering*, Volume 225, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109216>.

20. Ruikun Wang, Chunyan Qu, Dezhi Wang and other (2023). A study of the residual stress behavior of rigid and flexible epoxy adhesives during thermal cycle aging for electronics packaging. *Journal of Adhesion Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/01694243.2023.2240550>.

21. Mohammadali Rastak, Mahmood Shokrieh, Laurent Barrallier, Regis Kubler, Danial Salehi (2021). Estimation of residual stresses in polymer-matrix composites using digital image

correlation. In book: Residual Stresses in Composite Materials. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818817-0.00001-9>.

22. Man-Lung Sham, Jang-Kyo Kim (2004). Evolution of residual stresses in modified epoxy resins for electronic packaging applications, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 35, Issue 5, Pages 537–546, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.01.002>.

23. Ranjan, K., Behera, S. K., Parida, R. R. (2023) The Effect of using fibre reinforced epoxy adhesive on the strength of the adhesively bonded Single Lap Joints, Composites Part B: Engineering, Volume 248, 110358, ISSN 1359–8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110358>.

24. Tan Wei, Na Jingxin, Zhou Zhaofeng (2021). Effect of Service Temperature on Mechanical Properties of Adhesive Joints after Hygrothermal Aging. Polymers. 13. 3741. [10.3390/polym13213741](https://doi.org/10.3390/polym13213741).

25. Khun, N. W., Dawei, Sun, Huang, M. X., Yang, Jinglei, Yue, Chee (2014). Wear resistant epoxy composites with diisocyanate-based self-healing functionality. Wear. 313. 19–28. [10.1016/j.wear.2014.02.011](https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.02.011).

26. Kamil Anasiewicz, Józef Kuczmarszewski (2022). Apparent Young's Modulus of Epoxy Adhesives. Department of Mechanical Engineering, Lublin University of Technology, 20-618 Lublin, Poland Author to whom correspondence should be addressed. Materials 15(22), 8060. <https://doi.org/10.3390/ma15228060>.

27. Anasiewicz, K., Kuczmarszewski, J. (2016). Apparent Young's modulus of epoxy adhesives in metal bonding. Przegląd Spaw, 88, 131–134.

28. Matykiewicz Danuta, Barczewski Mateusz, Mousa Marwan, M R Sanjay, Siengchin Suchart (2021). Impact Strength of Hybrid Epoxy–Basalt Composites Modified with Mineral and Natural Fillers. ChemEngineering. 5. 56. <https://doi.org/10.3390/chemengineering5030056>.

29. Yang, Kang, Wu (吴素君), SuJun Shao, Zhengzhong Ritchie, Robert (2017). Enhancing the Mechanical Toughness of Epoxy-Resin Composites Using Natural Silk Reinforcements OPEN. Scientific Reports. 7. 11939. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11919-1>.

30. Sun Yangyang, Zhang Zhuqing, Moon Kyoung-sik, Wong, C. P. (2004). Glass transition and relaxation behavior of epoxy nanocomposites. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. 42. 3849–3858. <https://doi.org/10.1002/polb.20251>.

Stukhliak P. D., Yatsyuk V. M., Zoloty R. Z., Totosko O. V., Stukhliak D. P., Didunyk O. A. RESEARCH ON THE INFLUENCE OF A TRIMETHYLCHLOROSILANE MODIFIER ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AN EPOXY COMPOSITE

Abstract. The study of the interaction at the interface between the 'oligomer-modifier' components, due to structural interaction in the process of forming an epoxy matrix, is currently important for improving the physical and mechanical characteristics of composite materials. In this area of research, the use of a modifier based on trimethylchlorosilane for the ED-20 (Ukraine) and EPOXY 520 (Czech Republic) binders makes it possible to scientifically and predictably influence the performance characteristics of materials. The trimethylchlorosilane modifier (TMHS-1) proposed at the Research and Forensic Centre of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine in Ternopil Oblast was used to influence the structure-formation process. It was found that for the epoxy oligomer ED-20, the introduction of the TMHS-1 modifier in the amount of 0.25 g per 100 g of ED-20 improves the strength of adhesive joints by 30%. For the epoxy oligomer EPOXY 520, the introduction of the modifier in the amount of 0.25 g provides a 70% increase in Young's modulus and a 12% improvement in impact strength, with a slight increase in residual stress. It has been proven that a modifier content of 0.75 g leads to a 100% increase in the strength of adhesive joints and a 15% increase in Young's modulus. It has been established that the introduction of the modifier in the amount of 0.25 g per 100 g of oligomer for both binders and 0.75 g for the EPOXY 520 epoxy resin leads to an improvement in the physical, mechanical and thermal characteristics of epoxy binders due to the interaction of reactive groups of the modifier with the macromolecules of the binders.

Key words: binder; trimethylchlorosilane; adhesion; heat resistance; residual stresses; composite material; matrix.

© Стухляк П. Д., Яцюк В. М., Золотий Р. З., Тотосько О. В., Стухляк Д. П., Дідуник О. А.

Статтю прийнято до редакції 17.11.2025