

ISSN 2313-4763

Міністерство освіти і науки України

Херсонська державна морська академія

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1 (24)

Херсон
2021

Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2021. № 1 (24). 128 с.

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії (протокол № 12 від 24.06.2021 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Букетов А. В., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, головний редактор.

Тематична спрямованість – Транспортні технології:

Гнатов А. В., д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Аргун Щ. В., к.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, член редколегії;

Ляшук О. Л., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

Patlins Antons, Doctor of Engineering Science, Riga Technical University, Латвія, член редколегії;

Шарко В. О., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії.

Тематична спрямованість – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології:

Рожков С. О., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Жук Д. О., к.т.н., Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Україна, член редколегії;

Zhiravetska Anastasia, Dr. Sc. Ing., Professor, Riga Technical University, Латвія, член редколегії;

Полівода О. В., к.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, член редколегії;

Степенко С. А., к.т.н., Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна, член редколегії;

Хлопенко М. Я., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії.

Тематична спрямованість – Матеріалознавство:

Сапронов О. О., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Акімов О. В., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Брайло М. В., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Dulebová Eudmila, PhD., assoc. Prof., Technical University of Kosice, Словаччина, член редколегії;

Сизоненко О. М., д.т.н., Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Україна, член редколегії;

Стухляк П. Д., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

Фесенко І. П., д.т.н., Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Україна, член редколегії.

Адреса редакційної колегії: 73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20, тел. (0552) 22-35-69

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ № 18987-7776ПР від 11.05.2012 р.

Журнал унесено до Переліку наукових фахових видань України категорії «Б» (Наказ МОН України № 886 від 02.07.2020 р.)

Журнал індексується українською загальнодержавною реферативною базою даних «Україніка наукова» міжнародною реферативною базою даних **Google Scholar**, міжнародною наукометричною базою **Researchbib**, представлений у **Науковій електронній бібліотеці Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського**, міжнародній реферативній базі даних **Crossref**.

ISSN 2313-4763

© Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 2021

ISSN 2313-4763

Ministry of Education and Science of Ukraine

Kherson State Maritime Academy

SCIENTIFIC BULLETIN

KHERSON STATE MARITIME ACADEMY

Science journal

Published twice a year

№ 1 (24)

Kherson
2021

Scientific bulletin Kherson State Maritime Academy: science journal. Kherson : Kherson State Maritime Academy, 2021. № 1 (24). 144 p.

Founder and publisher – Kherson State Maritime Academy

Recommended to the publishing in a panel session of Kherson State Maritime Academy Academic Board (minutes of the panel session № 12 from 24.06.2021)

EDITORIAL STAFF:

Buketov A.V., Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, chief editor.

Thematic scope – Transport technologies:

Hnatov A.V., Doctor of Engineering Science, Kharkiv National Highway University, Ukraine, publishing editor of the section;

Arhun Sch.V., PhD in engineering Science, Kharkiv National Highway University, Ukraine, member of the editorial board;

Liashuk O.L., Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine, member of the editorial board;

Patlins Antons, Doctor of Engineering Science, Riga Technical University, Latvia, member of the editorial board;

Sharko V.O., Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of the editorial board.

Thematic scope – Automation and computer-integrated technologies:

Rozhkov S.O., Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, publishing editor of the section;

Zhuk D.O., PhD in engineering Science, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine, member of the editorial board;

Zhiravetska Anastasia, Dr. Sc. Ing., Professor, Riga Technical University, Latvia, member of the editorial board;

Polivoda O.V., PhD in engineering Science, Kherson National Technical University, Ukraine, member of the editorial board;

Stepenko S.M., PhD in engineering Science, Chernihiv National University of Technology, Ukraine, member of the editorial board;

Khlopenko M.Ya., Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of the editorial board.

Thematic scope – Materials sciences:

Sapronov O.O., Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, publishing editor of the section;

Akimov O.V., PhD in engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of the editorial board;

Brailo M. V., PhD in engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of the editorial board;

Dulebová Ľudmila, PhD., assoc. Prof., Technical University of Kosice, Slovakia, member of the editorial board;

Syzonenko O.M., Doctor of Engineering Science, Institute of Pulse Processes and Technologies, NAS of Ukraine, member of the editorial board;

Stukhliak P.D., Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine, member of the editorial board;

Fesenko I.P., Doctor of Engineering Science, V. Bakul Institute of Superhard Materials, NAS of Ukraine, member of the editorial board.

Address of the editorial board: 20, Ushakova av., Kherson, Ukraine, 73000,
phone +38 (0552) 22-35-69

Certificate of registration of the published media outlet by Resolution № 18987-7776ПП from 11.05.2012.

The journal has been brought into the list of scientific professional editions of Ukraine of category “B” (the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 886 from 02.07.2020).

The journal is being indexed by Ukrainian national abstract database «**Ukrainika Scientific**», international scientometric database «**Scientific Electronic Library E-Library.Ru**» (the Russian Science Citation Index – RCSI), international abstract database **Google Scholar**, international scientometric database **Researchbib**, presented at the **Scientific E-library of Vernadsky National Library of Ukraine**, international fulltext scientific database **Crossref**.

ISSN 2313-4763

© Scientific bulletin Kherson State
Maritime Academy, 2021

ВИКОРИСТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ПОЛІМЕРКОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СУДНОВОДІННЯ

Безбах О. М., к.т.н., старший викладач кафедри інноваційних технологій та технічних засобів судноводіння Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0002-8086-328, e-mail: ombezba@gmail.com

Показано, що серед численних полімерних матеріалів найбільше практичне застосування в галузі суднобудування знаходять реактопласти на основі епоксидних зв'язувачів, такий вибір зумовлений цілим комплексом експлуатаційних та функціональних характеристик останніх. Одним з основних та найсучасніших засобів регулювання структури та властивостей епоксидних композитних матеріалів є їх фізична модифікаційного нанонаповнювачами різної природи. На основі експериментальних досліджень вивчено вплив фізико-хімічної модифікаційної добавки у вигляді пігментної газової сажі, розмір часток якої становить 24 ± 2 нм, на теплофізичні властивості епоксидного діанового олігомера марки ЕД - 20. У результаті аналізу отриманих даних встановлено, що введення пігментної газової сажі в кількості $q = 1,00$ мас.ч. призводить до значного зниження усадки КМ від $\delta = 0,032$ % (для вихідної матриці) до $0,019$ % відповідно. Доведено, що з подальшим збільшенням концентрації добавки в епоксидну матрицю ($q = 25,00$ мас.ч.) відповідні показники δ КМ зменшуються несуттєво. Це опосередковано свідчить про те, що введення нанодисперсних часток газової сажі за оптимального вмісту забезпечує максимальне зшивання композиції та зумовлює підвищення як механічних, так і теплофізичних властивостей сформованих композитів. Розроблено нові НКМ та покриття на їх основі для відновлення і підвищення експлуатаційних характеристик технічних засобів судноводіння, конструкцій та механізмів морського та річкового транспорту.

Ключові слова: епоксидний композит, фізична модифікація, нанонаповнювач, теплофізичні властивості, концентрація, усадка, надійність, експлуатація, морські транспортні засоби.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.072–081

Постановка проблеми. Інтенсивна глобалізація торгівлі призводить до безперервного збільшення кількості морських суден, їх розмірів, швидкості руху, завдяки чому постійно нарощуються обсяги вантажоперевезень у світі. Це зокрема активно впливає на підвищення старих та створення нових вимог безпеки мореплавства, яка значною мірою залежить від справної роботи морських транспортних засобів. У цьому полягають як технічні, так і економічні передумови виникнення проблеми надійності [1]. Так як недостатній рівень надійності – це додаткові витрати, викликані аваріями і простоями суден, зниженням їх швидкості і збільшенням часу вантажних операцій, а також додаткові витрати на ремонт і ТО обладнання. Вирішення цієї проблеми полягає у забезпеченні справної роботи всіх складових судна під час рейсу та збільшення його міжремонтного періоду роботи. Відомо, що до технічної експлуатації морських суден відноситься низка технологічних процесів [2–4]: технічне використання (забезпечення роботи судна), технічне обслуговування (підтримання судна в належному (робочому) стані), ремонтні роботи (відновлення справного технічного стану). Кожен із зазначених технологічних процесів забезпечує надійність експлуатації судна і вимагає безперервного розвитку і вдосконалення.

Нині, для ремонтних заходів та підтримки суднових пристроїв у робочому стані активно використовують інноваційні полімер-композитні матеріали (ПКМ) [5], які дозволяють захистити робочі поверхні суднового устаткування від впливу різноманітних експлуатаційних факторів, таких як: сонячна радіація, морська вода, атмосферні опади, а також механічні навантаження, викликані штормами. Це також дає можливість підвищити експлуатаційні характеристики технічних засобів судна, зокрема і особливо важливі, що відповідають за його управління [6–8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальновідомо [9–11], що одним з найбільших споживачів синтетичних полімерних матеріалів є сучасна суднобудівна промисловість, де перспективи їх використання практично необмежені. Також, серед

численних полімерних матеріалів найбільше практичне застосування в цій галузі знаходять реактопласти на основі епоксидних зв'язувачів, що зумовлено цілим комплексом експлуатаційних та функціональних характеристик останніх. Що підтверджується постійним зростанням кількості публікацій цієї тематики, як у закордонних, так і вітчизняних журналах [9–16]. Аналіз наведених вище праць дозволяє стверджувати, що одним із найперспективніших засобів регулювання структури та властивостей полімерних композитів залишається фізична модифікація епоксидної матриці, яка дозволяє значно покращувати основні адгезійні, термодформаційні та експлуатаційні характеристики розроблених матеріалів. У цьому аспекті одним з найбільш дієвих і ефективних способів модифікації епоксикомпозитів вважається цілеспрямоване введення в їх структуру нанонаповнювачів різної природи. Тому, актуальним є проведення досліджень впливу концентрації нанодисперсної сажі на теплофізичні властивості епоксидної матриці.

Мета роботи. Дослідити вплив нанодисперсної сажі на теплофізичні властивості епоксидної матриці для формування захисних покриттів із підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД–20 (ГОСТ 10587-84).

Для зшивання епоксидних композицій використано низькомолекулярний твердник поліетиленполіамін $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Зшивали КМ, вводячи твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20: ПЕПА – 100: 10.

У вигляді фізико-хімічної модифікаційної добавки застосовували нанодисперсну пігментну газову сажу марки PowCarbon 2419G (CAS NO.: 1333-86-4, EINECS NO.: 215-609-9). Розмір часток порошку визначено за допомогою методу електронної мікроскопії і становить 24 ± 2 нм.

Епоксидні КМ формували за технологією, наведеною у праці [17].

У роботі досліджували теплофізичні властивості КМ, а саме: термічний коефіцієнт лінійного розширення та розраховані на його основі температура склування й усадка.

Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) матеріалів розраховували за кривою залежності відносної деформації від температури, апроксимуючи цю залежність експоненціальною функцією. Відносну деформацію визначали за зміною довжини зразка при підвищенні температури у стаціонарних умовах (ГОСТ 15173-70). Розміри зразків для дослідження: $65 \times 7 \times 7$ мм, непаралельність шліфованих торців складала не більше 0,02 мм. Перед дослідженням вимірювали довжину зразка з точністю $\pm 0,01$ мм. Швидкість підвищення температури становила $v = 2$ К/хв.

Відхилення значень при дослідженнях показників теплофізичних властивостей КМ (ТКЛР) становило 4...6 % від номінального.

Обговорення результатів експерименту. Захисні покриття, що наносяться на відновлювані поверхні, повинні володіти безліччю властивостей, що забезпечують надійну роботу деталей і суттєво підвищують їх довговічність. До таких властивостей ПКМ відносяться: міцність з'єднання з основою (адгезія), фізико-механічні властивості, зносостійкість, втомна міцність і не менш важливі теплофізичні характеристики. Внаслідок того, що полімерні покриття застосовуються в основному для захисту металевих деталей, найважливішою умовою їх спільного використання є досить близьке співвідношення коефіцієнтів термічного розширення вище зазначених матеріалів. Крім того, відомо [18], що підвищені значення ТКЛР полімерів є джерелом значних внутрішніх напружень, які виникають у структурі захисних покриттів при зміні температури. Саме тому дослідження теплового коефіцієнта лінійного розширення (α) має важливе значення як метод вивчення властивостей розроблених ПКМ.

Отже, на початковому етапі за допомогою аналізу дилатометричних кривих (рис. 1) досліджували тепловий коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) розроблених епоксидних

нанокомпозитів. Як видно з рисунку 2 величина ТКЛР вищезазначених матеріалів зі збільшенням температури зростає. В той же час розрахунки заздалегідь заданих температурних діапазонів (рис. 2) ($T = (303...473) \pm 2 \text{ K}$) показують, що найменшим значенням ТКЛР серед усього спектра досліджуваних композитів характеризуються ПКМ з концентрацією нанодисперсної газової сажі (в подальшому НДГС), яка становить $q = 5,00...15,00$ мас.ч. Значення ТКЛР відповідних матеріалів у температурному діапазоні $T = (303...373) \pm 2 \text{ K}$ коливається в межах $\alpha = (2,24...3,47) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Підкреслимо, що при зростанні температури до $\Delta T = (423...473) \pm 2 \text{ K}$ в області лінійного розширення зразки з вищеописаним вмістом наповнювача ($q = 15,00 \dots 25,00$ мас.ч.) також характеризуються найменшими показниками ТКЛР – $\alpha = (5,29...5,83) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ й $\alpha = (10,02...10,04) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ відповідно.

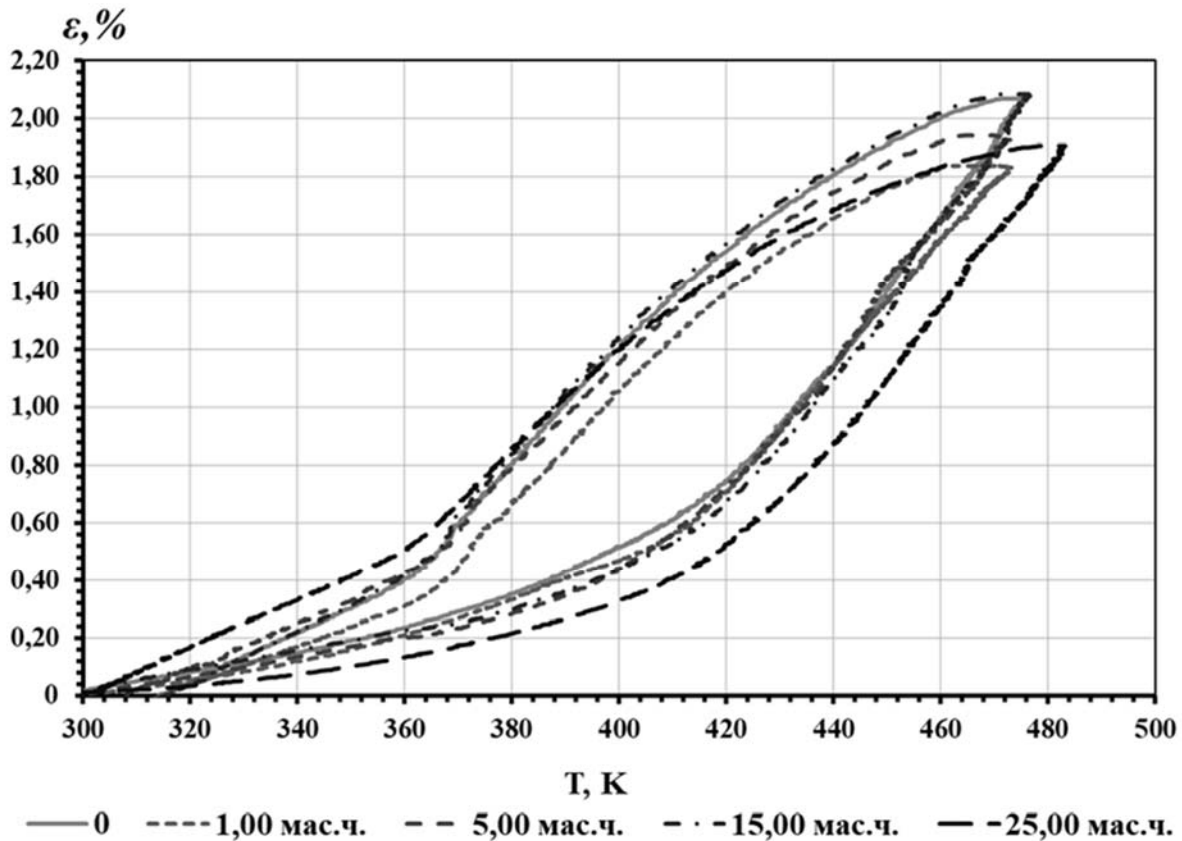


Рисунок 1 – Дилатометричні криві ПКМ із різним умістом нанодисперсного наповнювача НДГС, q , мас.ч.

Окремо треба звернути увагу на ПКМ з концентрацією НДГС у кількості $q = 5,00$ мас.ч. Зазначимо, що ці композити мають характеристики ТКЛР, які суттєво відрізняються від найменших показників, отриманих за вищезазначеного вмісту наповнювача. Експериментально доведено, що при введенні НДГС у кількості $q = 5,00$ мас.ч. (рис. 2) розроблені композити в наступному температурному діапазоні – $T = (303...373) \pm 2 \text{ K}$ характеризуються такими значеннями ТКЛР – $\alpha = (3,27...3,78) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у той же час при підвищеннях температур в області лінійного розширення $T = (423...473) \pm 2 \text{ K}$ їх показники коливаються в межах $\alpha = (5,68...10,12) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

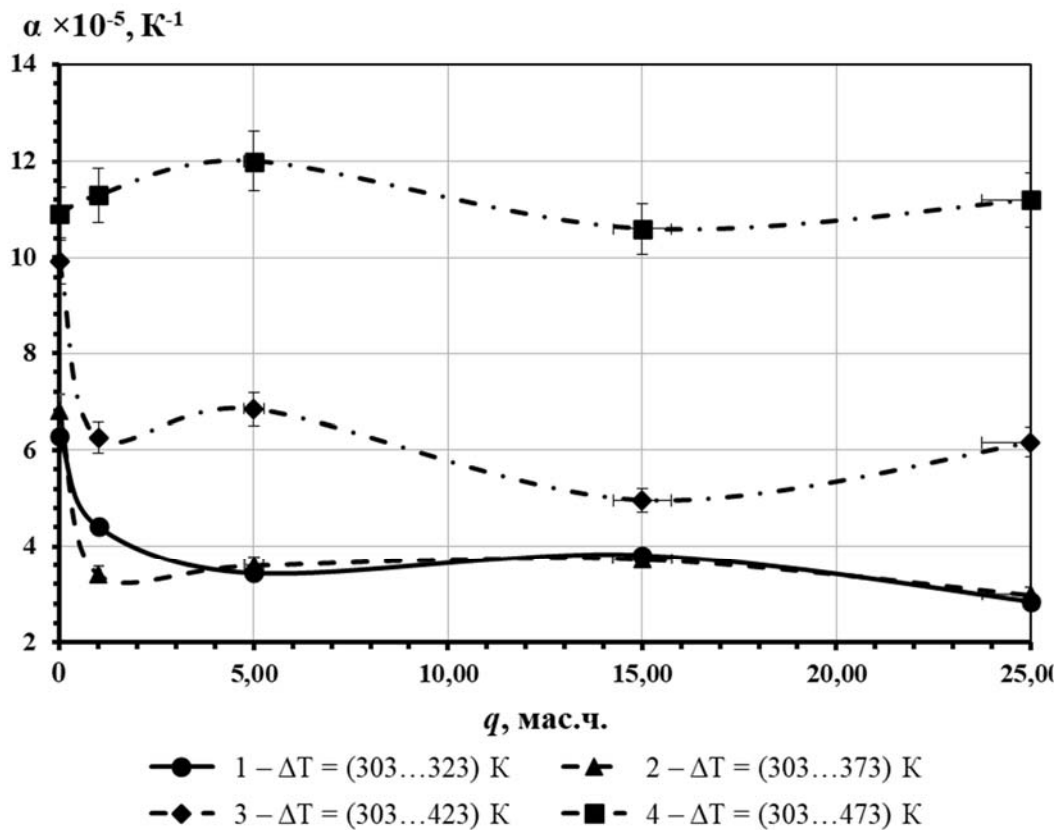


Рисунок 2 – Залежність теплового коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) від вмісту наповнювача НДГС за різних температурних діапазонів

Підсумовуючи з отримані результати експериментальних досліджень, треба зазначити, що введення часток НДГС в епоксидний олігомер за вмісту $q = 5,00 \dots 25,00$ мас.ч. призводить до значного зменшення ТКЛР у наступному температурному діапазоні – $T = 303 \dots 423$ К, на $\Delta\alpha = 48 \dots 68\%$ та $\Delta\alpha = 41 \dots 46\%$ відповідно, порівнюючи з матричними даними. Також зазначимо, що такі матеріали демонструють незначні зміни ТКЛР ($\Delta\alpha = 0,86 \dots 0,98\%$) під дією максимально заданого теплового поля ($T = 473$ К). Це, також свідчить про те, що модифікація епоксидної матриці добавкою НДГС за умови вищезазначеного діапазону концентрацій ($q = 5,00 \dots 25,00$ мас.ч.) суттєво впливає на формування сітчастої будови полімеру, де завдяки рівномірно розподіленим у його об'ємі наночасткам значно ущільнюється та зміцнюється просторова структура створених матеріалів. Завдяки цьому відбувається обмеження рухливості ланцюгів епоксидного зв'язувача, що приводить до зменшення ТКЛР, і як наслідок, забезпечує стійкість отриманих ПКМ або захисних покриттів до лінійних деформацій у наступному діапазоні температур – $T = 303 \dots T = 423$ К. Водночас, варто зазначити, що експериментально отримані результати дослідження композитів, наповнених за різного вмісту НДГС добре корелюють з нижче наведеними розрахунковими даними температури склування й усадки.

На наступному етапі роботи досліджували температуру склування (T_c) розроблених КМ, модифікованих НДГС. Установлено (рис. 3), що при введенні у епоксидний зв'язувач наповнювача в кількості $q = 1,00 \dots 5,00$ мас.ч. T_c КМ істотно зменшується ($T_c = 318 \dots 320$ К.). Треба зазначити, що це на 2...3 % менше, ніж у контрольних зразків ($T_c = 327$ К.). Максимальним значенням температури склування ($T_c = 328$ К) серед усіх випробуваних матеріалів характеризується КМ із вмістом НДГС $q = 15,00$ мас.ч. Як видно на рис. 3, з урахуванням похибки експерименту, максимум температури склування майже не збільшується щодо епоксидної основи ($T_c = 327$ К), що свідчить про незначний вплив добавки на цей показник.

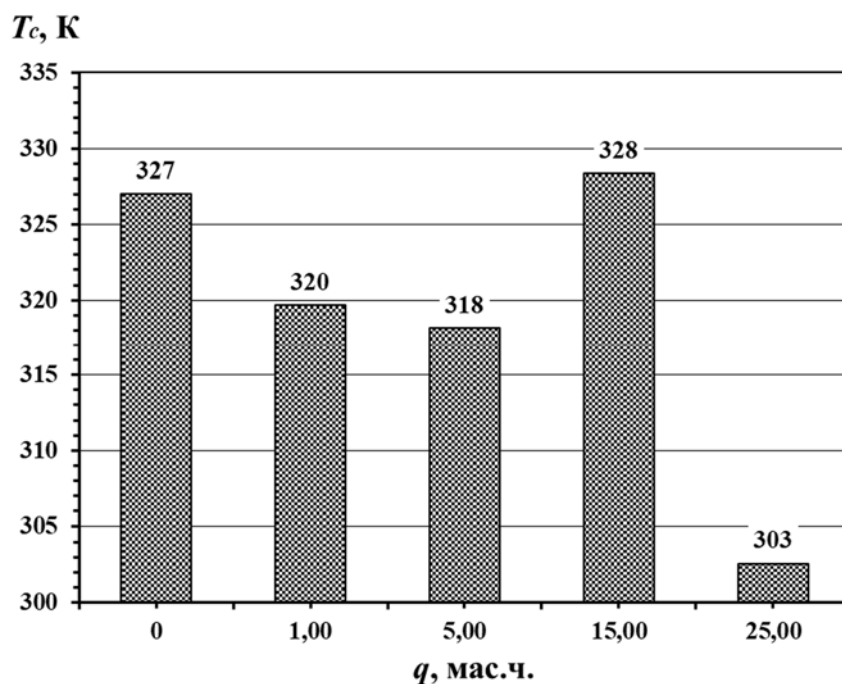


Рисунок 3 – Температура склування (T_c , К) розроблених композитів, наповнених частками НДГС

У процесі подальшого збільшення концентрації НДГС у полімерній композиції до $q = 25,00$ мас.ч. спостерігали значне зменшення величин T_c до 302,7 К, що на $\Delta T_c = 7,6$ % менше значення матриці, наведеного вище. Підсумовуючи, з аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що збільшення вмісту добавки, яка перевищує допустиму її концентрацію ($q = 15,00$ мас.ч.) призводить до значного зменшення T_c розроблених епоксидних нанокompозитів.

Одночасно досліджували усадку КМ залежно від уведеної кількості добавки НДГС. Аналізуючи рис. 4, можна помітити, що цей показник для КМ істотно знижується зі збільшенням вмісту вуглецевого нанонаповнювача. Доведено, що при введенні в епоксидний

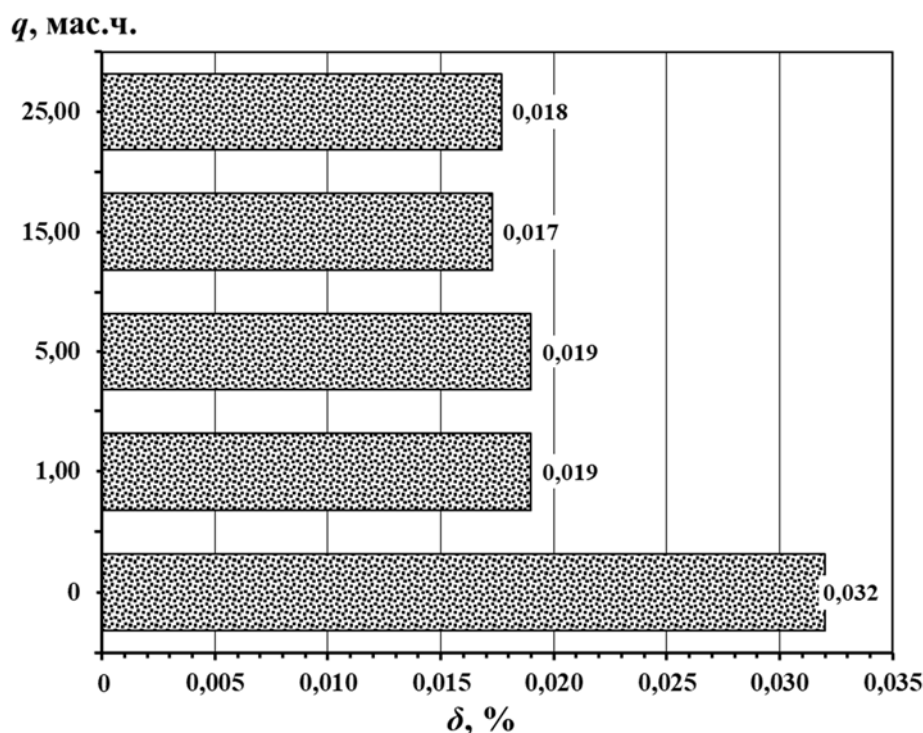


Рисунок 4 – Залежність лінійної усадки (δ , %) КМ від вмісту наповнювача НДГС

зв'язувач частинок НДГС у мінімальному концентраційному діапазоні ($q = 1,00 \dots 5,00$ мас.ч.), усадка КМ знижується від $\delta = 0,0323$ % (для вихідної матриці) до $0,019$ % відповідно. Наступне збільшення концентрації наповнювача ($q = 15,00 \dots 25,00$ мас.ч.) в епоксидних композиціях демонструє подальше, але в межах похибки експерименту, незначне зменшення δ КМ до $0,018 \dots 0,017$ %. Треба зазначити, що найменшими показниками усадки КМ характеризуються матеріали із вмістом НДГС $q = 15,00$ мас.ч. (рис. 4). Також зауважимо, що ці результати узгоджуються з описаними вище показниками температури склування, де нанокompозити з аналогічним умістом наповнювача характеризуються максимальним значенням T_c (рис. 2, $q = 15,00$ мас.ч.). Це також опосередковано свідчить про те, що введення нанодисперсних часток пігментної газової сажі за оптимального вмісту забезпечує максимальне зшивання композиції, та зумовлює підвищення як механічних, так і теплофізичних властивостей сформованих ПКМ.

На основі раніше отриманих експериментальних результатів дослідження композитних матеріалів, а саме в'язкості [14], фізико-механічних властивостей [19] та з урахуванням наведених у цій роботі їх теплофізичних характеристик, є передумови розробки інженерних методів їх нанесення на зовнішню поверхню казанка (котелка) суднового магнітного компаса, майданчика для кріплення, а також на сам тримач датчика (вібратора) ехолота, кронштейни й тримачі суднових антен (рис. 5) з метою попередження корозійного руйнування вищезазначених деталей. Це також зменшить періодичність відновлення дефектних ділянок деталей приблизно у $1,3 \dots 1,9$ рази відповідно.



Рисунок 5 – Види пошкоджень поверхонь кронштейнів, кріплень суднових антен

Висновки. На основі експериментальних досліджень теплового коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) розроблених епоксидних нанокompозитів встановлено, що зі збільшенням температури цей параметр зростає. Розрахунки заздалегідь заданих температурних діапазонів ($T = (303 \dots 473) \pm 2$ К) показують, що найменшим значенням ТКЛР серед усього спектра досліджуваних композитів характеризуються ПКМ з концентрацією нанодисперсної газової сажі, яка становить $q = 5,00 \dots 15,00$ мас.ч. Це також, свідчить про те, що модифікація епоксидної матриці відповідною добавкою за умови вищезазначеного діапазону концентрацій ($q = 5,00 \dots 25,00$ мас.ч.) суттєво впливає на формування сітчастої будови полімеру, де завдяки рівномірно розподіленим у його об'ємі вуглецевим наночасткам значно ущільнюється та зміцнюється просторова структура створених матеріалів, забезпечуючи стійкість отриманих ПКМ або захисних покриттів до лінійних деформацій у наступному діапазоні температур – $T = 303 \dots T = 423$ К.

Доведено, що при введенні у епоксидний зв'язувач наповнювача у кількості $q = 1,00 \dots 5,00$ мас.ч. температура склування розроблених КМ зменшується порівняно з матричними значеннями ($T_c = 327$ К) на $2 \dots 3$ %. Максимальним значенням T_c серед усіх випробуваних зразків, яке становить 328 К, характеризується КМ із вмістом нанодобавки

$q = 15,00$ мас.ч. Подальше збільшення вмісту відповідного модифікаційного інгредієнта призводить до значного зменшення температури склування розроблених епоксидних нанокompозитів.

Установлено, що при введенні в епоксидний зв'язувач наночастинок газової сажі в мінімальному концентраційному діапазоні ($q = 1,00 \dots 5,00$ мас.ч.), усадка КМ знижується від $\delta = 0,0323$ % (для вихідної матриці) до $0,019$ % відповідно. Наступне збільшення концентрації наповнювача ($q = 15,00 \dots 25,00$ мас.ч.) в епоксидних композиціях демонструє подальше, але в межах похибки експерименту, незначне зменшення δ КМ до $0,018 \dots 0,017$ %.

Узгодженість експериментально отриманих теплофізичних характеристик розроблених нанокompозитів опосередковано вказує на те, що введення часток пігментної газової сажі за оптимального вмісту забезпечує максимальне зшивання композиції та зумовлює підвищення як механічних, так і теплофізичних властивостей сформованих ПКМ.

Розроблено нові нанокompозити та покриття на їх основі для відновлення і підвищення експлуатаційних характеристик технічних засобів судноводіння, конструкцій та механізмів морського та річкового транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- a. Парасюк В. І., Кондратьєв А. В. Основи надійності технічних систем: навчальний посібник до лабораторного практикуму. Харків : Харківський авіаційний інститут, 2010. 72 с.
- b. Emi H., Yuasa M., Kumano A., Yamamoto N., Arima T. and Umino M. A. Study on life assessment of ships and offshore structures. 3rd report: corrosion control and condition evaluation for a long life service of the ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*. 1993. Vol. 174. P. 735–747.
- c. Soares C. G., Garbatov Y., Zayed A., Wang G. Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere. *Corrosion Science* 51. 2009. P. 2014–2026. DOI:10.1016/j.corsci.2009.05.028
- d. Abbas M., Shafiee M. An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments. *Marine Structures*. 2020. Vol. 71. 102718. DOI:https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102718
- e. Колосов О. Є., Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Івіцький І. І., Куриленко В. М. Матеріали та технології для одержання функціональних полімерних композиційних матеріалів. *Наукові нотатки*. 2017. № 58. С. 184–192.
- f. Донцов С. В. Магнитные компасы : учебное пособие. Одесса : ОНМА, 2014. 70 с.
- g. Appleyard S. F., Linford R. S., Yarwood P. J. *Marine Electronic Navigation*. Abingdon : Routledge, 2005. 616 p.
- h. Смирнов Е. Л., Яловенко А. В., Перфильев В. К., Воронов В. В., Сизов В. В. Технические средства судовождения. Конструкция и эксплуатация: учебник для вузов. Санкт-Петербург : Элмор, 2000. 656 с.
- i. Красильникова О. А., Кольчурин А. И. Применение полимерных конструкционных материалов в судостроении. *European research*. 2016. Вып. 5(16). С. 22–24.
- j. Баженов С. Л., Берлин А. А., Кульков А. А., Ошмян В. Г. Полимерные композиционные материалы. Долгопрудный : Издательский дом «Интеллект», 2010. 352 с.
- k. Курников А. С., Орехов В. А., Ефремов С. Ю. Технология судоремонта : монография. Нижний Новгород : ВГАВТ, 2008. 237 с.
- l. Sapronov O., Buketov A., Sapronova A., Sotsenko V., Brailo M., Yakushchenko S., Maruschak P., Smetankin S., Kulinich A., Kulinich V., Poberezhna L. The Influence of the Content and Nature of the Dispersive Filler at the Formation of Coatings for Protection of the

Equipment of River and Sea Transport. SAE International *Journal of Materials and Manufacturing*. 2020, Vol. 13 (1). P. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.4271/05-13-01-0006>.

m. Buketov A. V., Brailo M. V., Yakushchenko S. V., Sapronov O. O., Smetankin S. O. The formulation of epoxy-polyester matrix with improved physical and mechanical properties for restoration of means of sea and river transport. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2020, Vol. 19. № 3. P. 109–114. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1530171>.

n. Buketov A., Smetankin S., Maruschak P., Yurenin K., Sapronov O., Matvyeyev V., Menou A. New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. *Transport*. 2020. Vol. 35,(6). P. 679–690. DOI: doi.org/10.3846/transport.2020.14286.

o. Rubino F., Nisticò A., Tucci F. & Carlone P. Marine Application of Fiber Reinforced Composites, A Review. *Journal of Marine Science and Engineering & Technolog*. 2020. Vol 8(1), P. 26. DOI: [10.3390/jmse8010026](https://doi.org/10.3390/jmse8010026)

p. Mouritz A. P., Gellert E., Burchill P. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Compos Struct*. 2001, Vol. 53, P. 21-41.

q. Букетов А. В., Сапронов А. А., Яцюк В. Н., Скирденко В. О. Исследование влияния модификатора 4,4-метиленбис (4,1-фенилен)бис(N,N-диэтилдитиокарбамату) на структуру и свойства эпоксидной матрицы. *Пластические массы*. 2014. № 7–8. С. 9–16.

г. Санжаровский А. Т. Физико-механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий. Москва : Химия, 1975. 264 с.

s. Buketov A., Smetankin S., Yakushchenko S., Yurenin K., Sotsenko V., Brailo M., Kulinich V., Sapronov O., Kulinich A., Vrublevskiy R. & Bezbakh O. Physical-mechanical properties of epoxy composites filled with carbon black nano-dispersed powder for protection of transport vehicles. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*. 2021. Vol. 12 (2). P. 1–12. DOI: [10.1615/CompMechComputApplIntJ.2021037544](https://doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.2021037544).

REFERENCES

1. Parasiuk V.I., Kondratiev A. V. (2010). *Osnovy nadiinosti tekhnichnykh system: navchalnyi posibnyk do laboratornoho praktykumu*. Kharkiv: Kharkivskiy aviatsiyniy. instytut.
2. Emi H., Yuasa M., Kumano A., Yamamoto N., Arima T. & Umino M. A. (1993). Study on life assessment of ships and offshore structures. 3rd report: corrosion control and condition evaluation for a long life service of the ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*. Vol. 174, 735–747.
3. Soares C. G., Garbatov Y., Zayed A. & Wang G. (2009). Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere. *Corrosien Scien* 51. DOI [10.1016/j.corsci.2009.05.028](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.028)
4. Abbas M., Shafiee M. (2020). An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments. *Marine Structures*, Vol. 71, 102718, <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102718>
5. Kolosov O. Ye., Sivetskyi V. I., Sokolskyi O. L., Ivitskyi I. I. & Kurylenko V. M. (2017). Materialy ta tekhnolohii dlia oderzhannia funktsionalnykh polimernykh kompozytsiinykh materialiv. *Naukovi notatky*, 58. 184–192.
6. Doncov S. V. (2014). *Magnitnihe kompasih : uchebnoe posobie*. Odessa : ONMA.
7. Appleyard S. F., Linford R. S., Yarwood P. J. (2005). *Marine Electronic Navigation*. Abingdon : Routledge.
8. Smirnov E. L., Yalovenko A. V., Perfiljev V. K., Voronov V. V. & Sizov V. V. (2020). *Tekhnicheskie sredstva sudovozhdeniya. Konstrukciya i ehkspluatatsiya: uchebnyk dlya vuzov*. Sankt-Peterburg : Ehlmor.
9. Kurnikov A. S., Orekhvo V. A., Efremov S. Yu. (2008). *Tekhnologiya sudoremonta : monografiya*. Nizhniy Novgorod : VGAVT.
10. Bazhenov S. L., Berlin A. A., Kuljkov A. A. & Oshmyan V. G. (2010). *Polimernihe kompozicionnihe materialih*. Dolgoprudniy : Izdateljskiy dom Intellekt.

11. Kurnikov A. S., Orekhvo V. A., Efremov S. Yu. (2008). *Tekhnologiya sudoremonta : monografiya*. Nizhnij Novgorod : VGAVT.
12. Saprionov O., Buketov A., Saprionova A., Sotsenko V., Brailo M., Yakushchenko S., Maruschak P., Smetankin S., Kulinich A., Kulinich V. & Poberezhna L. (2020). The Influence of the Content and Nature of the Dispersive Filler at the Formation of Coatings for Protection of the Equipment of River and Sea Transport. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing, Vol. 13(1)*, 81–91. DOI: <https://doi.org/10.4271/05-13-01-0006>.
13. Buketov A. V., Brailo M. V., Yakushchenko S. V., Saprionov O. O. & Smetankin S. O. (2020). The formulation of epoxy-polyester matrix with improved physical and mechanical properties for restoration of means of sea and river transport. *Journal of Marine Engineering & Technology., Vol. 19. 3*, 109–114. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1530171>.
14. Buketov A., Smetankin S., Maruschak P., Yurenin K., Saprionov O., Matvyeyev V. & Menou A. (2020). New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. *Transport, Vol. 35 (6)*, 679–690. DOI: doi.org/10.3846/transport.2020.14286.
15. Rubino F., Nisticò A., Tucci F. & Carlone P. (2020). Marine Application of Fiber Reinforced Composites, A Review. *Journal of Marine Science and Engineering & Technolog. Vol. 8 (1)*, 26. DOI:10.3390/jmse8010026.
16. Mouritz A. P., Gellert E., Burchill P. (2001). Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Compos Struct, Vol. 53*, 21–41.
17. Buketov A. V., Saprionov A. A., Yacyuk V. N. & Skirdenko V. O. (2014). Issledovanie vliyaniya modifikatora 4,4'-metilenbis (4,1-fenilen)bis (N,N-dietilditiokarbamatu) na strukturu i svoystva ehpoksidnoy matricih. *Plasticheskie massih, 7–8*, 9–16.
18. Sanzharovskiy A. T. (1975). *Fiziko-mekhanicheskie svoystva polimernikh i lakokrasochnik pokritiy*. Moskva : Khimiya.
19. Buketov A., Smetankin S., Yakushchenko S., Yurenin K., Sotsenko V., Brailo M., Kulinich V., Saprionov O., Kulinich A., Vrublevskiy R. & Bezbakh O. (2021). Physical-mechanical properties of epoxy composites filled with carbon black nano-dispersed powder for protection of transport vehicles. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal, Vol. 12 (2)*, 1–12. DOI 10.1615/CompMechComputApplIntJ.2021037544.

Безбах О. М. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ПОЛИМЕРКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СУДОВОЖДЕНИЯ

Показано, что среди многочисленных полимерных материалов наибольшее практическое применение в области судостроения находят реактопласты на основе эпоксидных связующих, такой выбор обусловлен целым комплексом эксплуатационных и функциональных характеристик последних. Одним из основных и современных средств регулирования структуры и свойств эпоксидных композитных материалов является их физическая модификация нанонаполнителей различной природы. На основе экспериментальных исследований изучено влияние физико-химической модифицирующей добавки в виде пигментной газовой сажи, размер частиц которой составляет 24 ± 2 нм, на теплофизические свойства эпоксидного дианового олигомера марки ЭД - 20. В результате анализа полученных данных установлено, что введение пигментной газовой сажи в количестве $q = 1,00$ мас.ч. приводит к значительному снижению усадки КМ от $\delta = 0,032\%$ (для исходной матрицы) к $0,019\%$ соответственно. Доказано, что с дальнейшим увеличением концентрации добавки в эпоксидную матрицу ($q = 25,00$ мас.ч.) соответствующие показатели δ КМ уменьшаются не существенно. Это косвенно свидетельствует о том, что введение нанодисперсных частиц газовой сажи при оптимальном содержании обеспечивает максимальное сшивания композиции и приводит к повышению как механических, так и теплофизических свойств сформированных композитов. Разработаны новые НКМ и покрытия на их основе для восстановления и повышения эксплуатационных характеристик технических средств судовождения, конструкций и механизмов морского и речного транспорта.

Ключевые слова: эпоксидный композит, физическая модификация, нанонаполнитель, теплофизические свойства, концентрация, усадка, надежность, эксплуатация, морские транспортные средства.

Bezbakh O. M. THE USE OF INNOVATIVE POLYMER COMPOSITE COATINGS TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF TECHNICAL MEANS OF NAVIGATION

It has been testified that among numerous polymer materials, the most practical applications in the field of shipbuilding are reactoplasts based on epoxy binders, due to a range of operational and functional characteristics of the latter. One of the main and most modern means of regulating the structure and properties of epoxy composite materials is their physical modification by nanofillers of different nature. Based on experimental studies, the effect of physicochemical modifying additive in the form of pigment gas soot, the particle size of which is 24 ± 2 nm, on the thermophysical properties of epoxy diene oligomer brand ED-20 has been studied. As a result of the analysis of the obtained data, it has been discovered that the introduction of pigment gas soot in the amount of $q = 1.00$ wt.h. leads to a significant reduction in KM shrinkage from $\delta = 0.032\%$ (for the original matrix) to 0.019% , respectively. It has been proved that with a further increase in the concentration of the additive in the epoxy matrix ($q = 25.00$ parts by weight), the corresponding values of δ KM do not decrease significantly. This indirectly indicates that the introduction of nanodispersed particles of carbon black at the optimal content provides maximum crosslinking of the composition, and leads to an increase in both mechanical and thermophysical properties of the formed composites. New NCMs and coatings based on them have been developed to restore and improve the performance of technical means of navigation, structures and mechanisms of sea and river transport.

Keywords: epoxy composite, physical modification, nanofiller, thermophysical properties, concentration, shrinkage, reliability, operation, marine vehicles.

© Безбах О. М.

Статтю прийнято
до редакції 26.04.21

ВПЛИВ МАЛЕЇНОВОГО АНГІДРИДУ НА АДГЕЗІЙНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНОЇ МАТРИЦІ ДЛЯ ЗАХИСТУ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Житник Д. В., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: danylzhynuk@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6579-3599;

Гусєв В. М., к.т.н., начальник Морського фахового коледжу Херсонської державної морської академії, e-mail: v.n.gusev73@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6801-7616;

Букетов А. В., д.т.н., завідувач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9836-3296;

Кулініч В. Г., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: kulnich2000@yahoo.com, ORCID: 0000-0003-0323-8236;

Яцюк В. М., к.х.н., заступник завідувача відділу дослідження матеріалів, речовин і виробів Тернопільського науково-дослідного експертно-криміналістичного центру МВС України, e-mail: yatsuk-@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0103-1250

Показано перспективність використання епоксидних матеріалів, які характеризуються поліпшеними експлуатаційними характеристиками. Однак поліпшення зазначених вище властивостей у комплексі забезпечують введенням хімічно активних до епоксидного олігомера модифікаторів, пластифікаторів, наповнювачів. Це забезпечує покращення міжфазової взаємодії, що також поліпшує властивості полімерних композитів.

У вигляді основи для матриці вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20. Для полімеризації епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін. У вигляді модифікатора для поліпшення властивостей епоксидних композитів використано малеїновий ангідрид. Молекулярна формула модифікатора: $C_4H_2O_3$. Молярна маса – 98,057 г/моль. Зовнішній вигляд – біла речовина. Густина – $\rho = 1,314$ г/см³ (за температури 60 °С) і $\rho = 1,480$ г/см³ (за температури 20 °С).

Установлено оптимальний уміст модифікатора малеїнового ангідриду для формування модифікованої епоксидної матриці з покращеними адгезійними і механічними властивостями. Доведено, що при формуванні композитів з поліпшеними адгезійними і фізико-механічними властивостями необхідно формувати композицію наступного складу: епоксидний олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА ($q = 10$ мас.ч.), модифікатор малеїновий ангідрид ($q = 0,25$ мас.ч.).

Формування такого матеріалу забезпечує порівняно з вихідною епоксидною матрицею підвищення наступних показників властивостей композитів: адгезійної міцності при відриві у 1,3 рази (від $\sigma_a = 24,8$ МПа до $\sigma_a = 31,1$ МПа); руйнівних напружень при згинанні у 2,4 рази (від $\sigma_{z2} = 48,0$ МПа до $\sigma_{z2} = 117,3$ МПа); ударної в'язкості у 1,9 рази (від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 13,7$ кДж/м²).

Зазначимо, що модуль пружності і залишкові напруження такого матеріалу зменшуються порівняно з вихідною епоксидною матрицею у 1,2 рази (від $E = 2,8$ ГПа до $E = 2,4$ ГПа та від $\sigma_3 = 1,4$ МПа до $\sigma_3 = 1,2$ МПа відповідно). Отриманий композит доцільно використовувати у вигляді матриці при формуванні одно- чи багатошарових захисних покриттів різного функціонального призначення.

Ключові слова: матриця, епоксидний композит, модифікатор, адгезійні властивості, когезійна міцність, залишкові напруження.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.082–092

Постановка проблеми. Науково-технічний прогрес вимагає створення нових матеріалів, які необхідно застосовувати для збільшення ресурсу деталей транспортних засобів. Водночас новітні матеріали повинні характеризуватися у комплексі поліпшеними адгезійними та фізико-механічними властивостями. Це забезпечить не лише нівелювання передчасного старіння матеріалів, що позначиться на їхніх властивостях, але й передбачає збільшення їх надійності [1–5].

Підсумовуючи з наведеного вище необхідно зазначити перспективність використання епоксидних матеріалів, які характеризуються поліпшеними експлуатаційними властивостями. Однак поліпшення зазначених вище властивостей у комплексі забезпечують введенням хімічно активних до епоксидного олігомера

модифікаторів, пластифікаторів, наповнювачів. Це забезпечує покращення міжфазової взаємодії, що, також поліпшує властивості полімерних композитів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами [6–9] доведено, що для покращення адгезійних і механічних властивостей полімерних композитів у епоксидний зв'язувач доцільно вводити модифікатори, які є активними до міжфазової взаємодії при зшиванні гетерогенних систем. Однак, на нашу думку, доцільним було б для активації процесів фізичної та хімічної полімеризації у епоксидний зв'язувач вводити як модифікатор малеїновий ангідрид. Останній характеризується карбонільними та карбоксильними групами, що, на нашу думку, дозволить збільшити ступінь гелеутворення і, як наслідок, підвищити показники необхідних властивостей матеріалів.

Мета роботи – дослідити вплив модифікатора малеїнового ангідриду на адгезійні і фізико-механічні властивості епоксикомпозитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі для транспортної галузі.

Матеріали та методика дослідження. При формуванні полімерного зв'язувача у вигляді основи використано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). При полімеризації розроблених матеріалів на основі епоксидної смоли застосовували твердник холодного тверднення поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78).

У вигляді модифікатора для поліпшення властивостей епоксидних КМ використано малеїновий ангідрид (МА). Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20.

Молекулярна формула модифікатора: $C_4H_2O_3$. Молярна маса МА – 98,057 г/моль. Зовнішній вигляд – біла речовина. Густина – $\rho = 1,314$ г/см.³

Загальний вигляд хімічних зв'язків модифікатора малеїнового ангідриду наведено на рис. 1 [10].

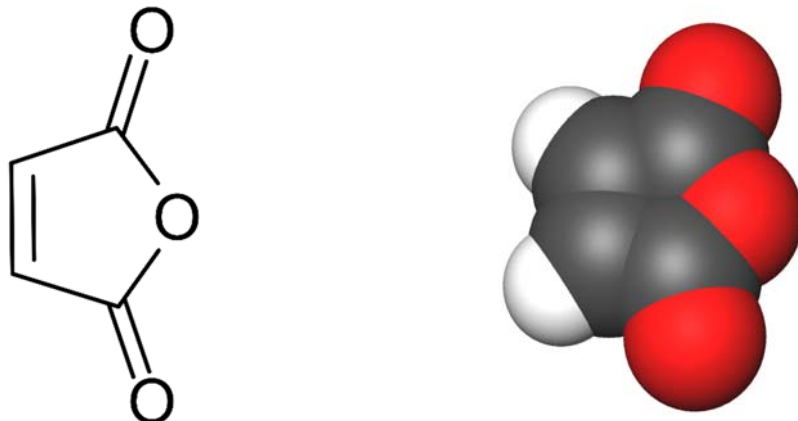


Рисунок 1 – Загальний вигляд хімічних зв'язків модифікатора малеїнового ангідриду [10]

У роботі досліджено адгезійну міцність матеріалів згідно з ГОСТом 14760 – 69, залишкові напруження – стосовно методики [5], руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні – згідно з ГОСТом 4648-71 і 9550-81 відповідно, ударну в'язкість – відповідно до ГОСТу 4647-80.

Результати досліджень та їх обговорення. Попередньо нами було проведено дослідження щодо аналізу структури та хімічних характеристик синтезованого нами модифікатора. Для цього використано метод газової хроматографії. Водночас мас-селективним детектуванням аналізували молярну масу синтезованого малеїнового ангідриду.

Згідно з цим методом використовували модифікатор у кількості 0,0124 г, який розчиняли в метанолі. Надалі застосовували хроматографування за такої технології [11]: постійний потік газу-носія – 1,5 мл/хв; інжектор – автоінжектор 7683, Split 20:1; температура випаровувача – $T = 250$ °С; технологічні режими нагрівання: $T_{\text{поч}} = 100$ °С, утримання – 2 хв, швидкість нагрівання – 15 С/хв, $T_{\text{кін}} = 280$ °С; проба – 1,0 мкл.

Експериментальні результати випробувнь наведено на рис. 2. Спочатку проводили хроматографування проб малеїнового ангїдриду, знаходячи розташування сигналів на шкалі часу утримання. Надалі аналізували параметри сигналів. Водночас експериментально отримали сигнал за час $t = 2,277$ хв (рис. 2, 3). У результаті знаходили значення характеристичних сигналів. Експериментально встановлено 10 найбільших піків при $m/z = 25,6; 26,4; 28,3; 41,3; 44,6; 52,3; 53,1; 54,9; 55,3; 98,1$.

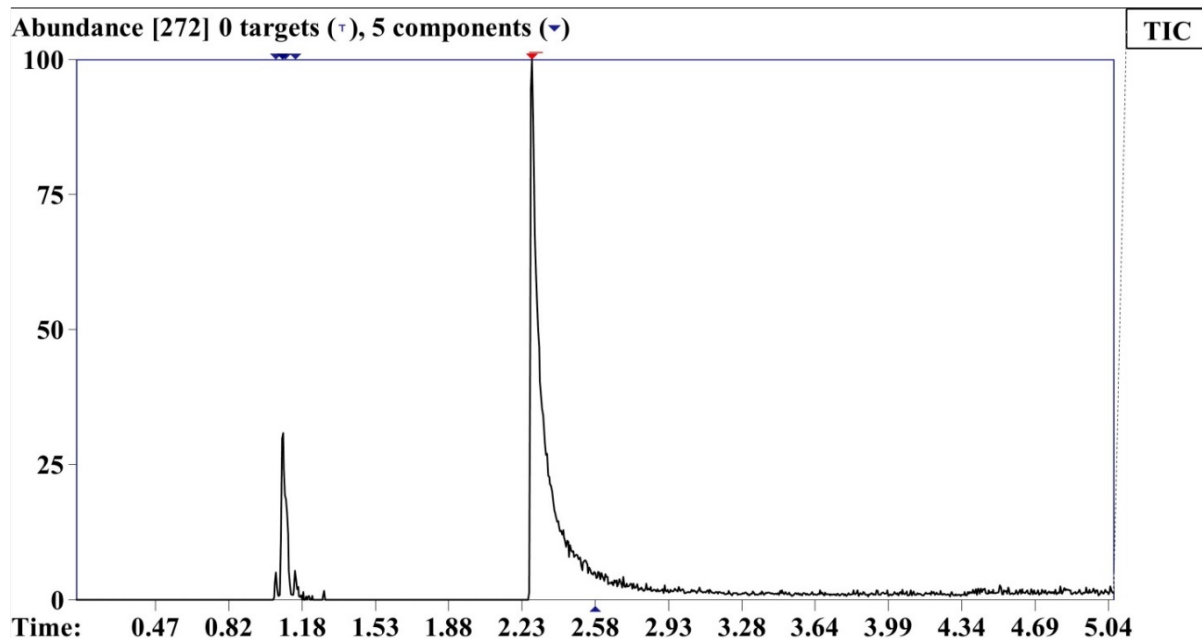


Рисунок 2, а – Значення сигналу від часу утримання проби модифікатора

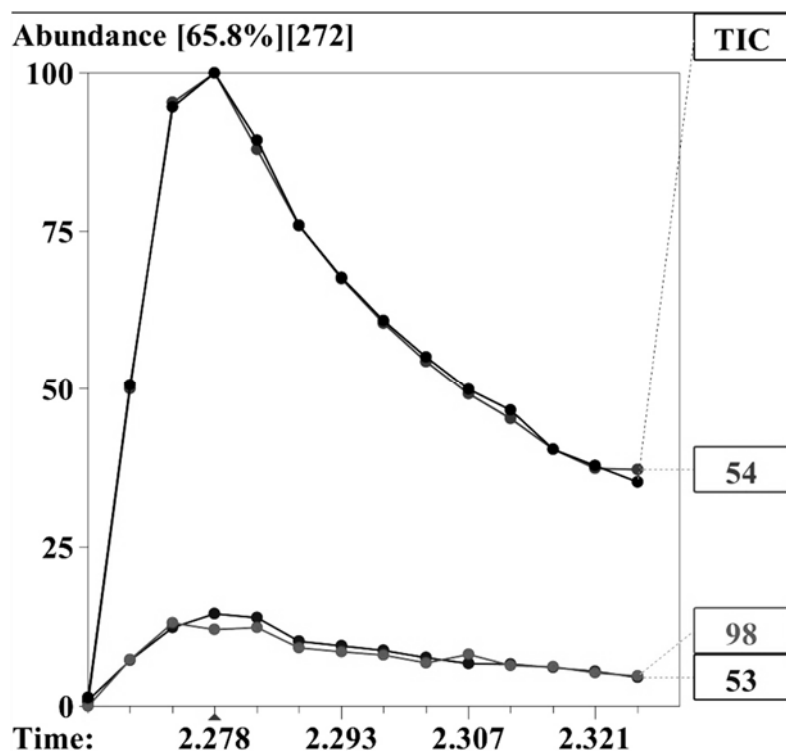
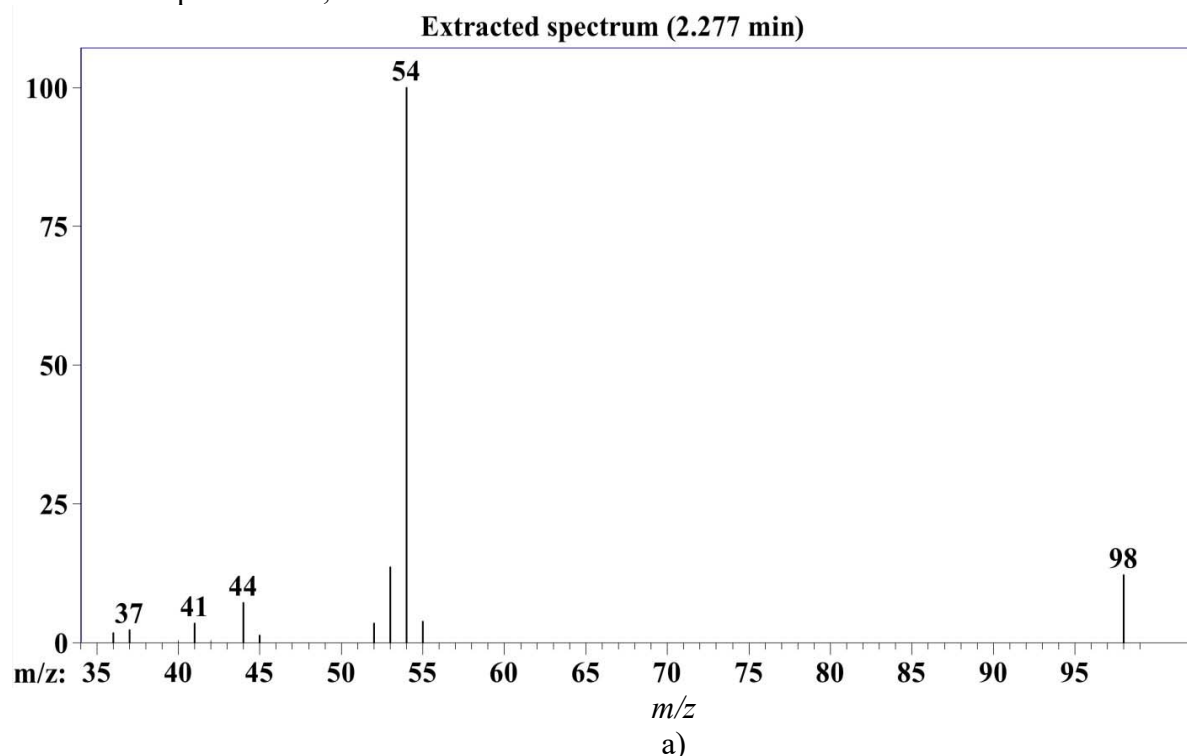


Рисунок 2, б – Значення сигналу від часу утримання проби модифікатора (у часовому проміжку $t = 2,20 \dots 2,34$ с)

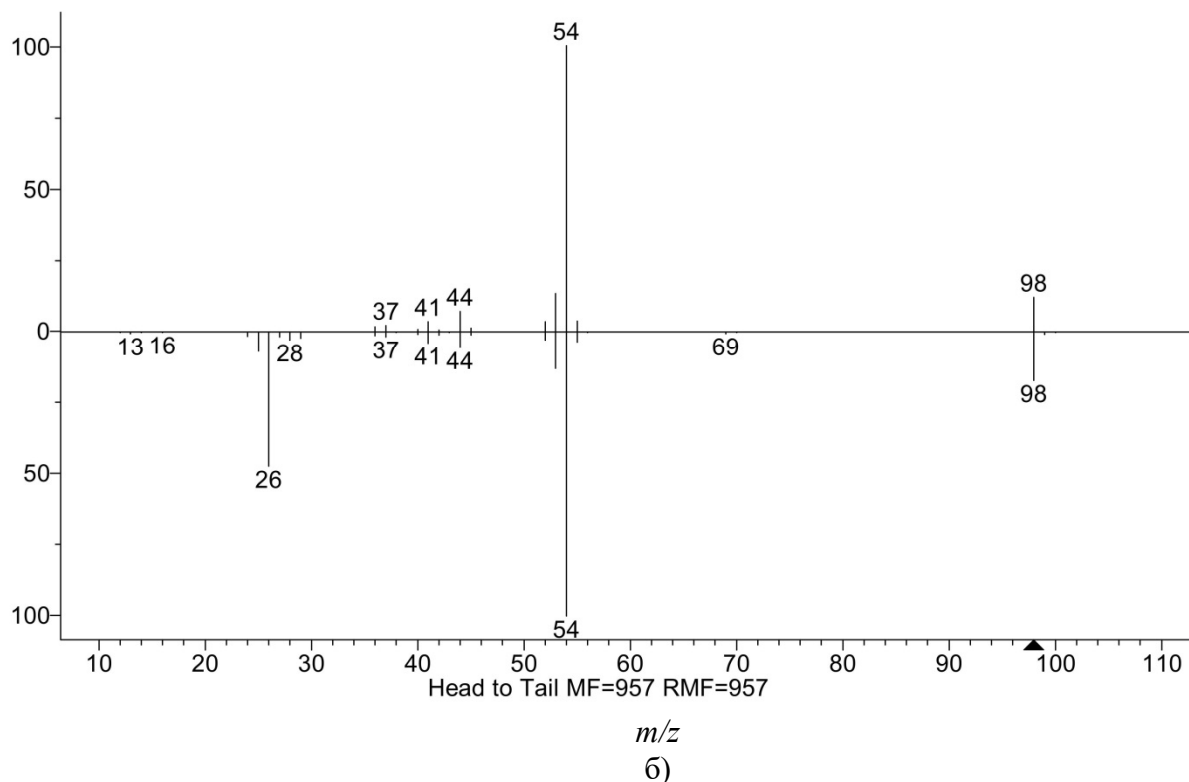
Отримані експериментальні результати порівнювали із бібліотечними табличними даними. У результаті отримали формулу хімічної структури і величину молекулярної маси синтезованого модифікатора. Підтверджено, що формула модифікатора має наступний вигляд: $C_4H_2O_3$. Молярна маса малеїнового ангїдриду – 98,057 г/моль.

Зазначимо, що дані дослідження є суттєвими для оцінювання сумісності модифікатора із компонентами епоксидної матриці. Показано, що модифікатор містить, окрім бензольного кільця, активні гідроксильні та оксидні центри. Це, на нашу думку, дозволить активувати процеси хімічної взаємодії молекул добавки й активними групами епоксидного олігомера, що дозволить поліпшити адгезійні та когезійні властивості полімерного компаунду.

Значення характ. сигн., mAU



Значення характ. сигн., mAU



Значення характ. сигн., mAU

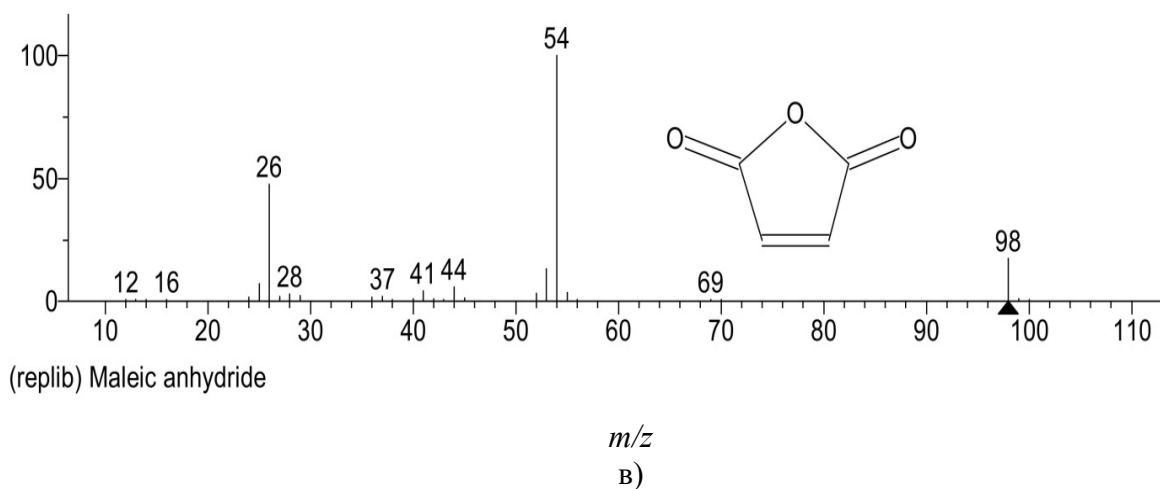


Рисунок 3 – Залежність значення характеристичних сигналів від m/z при часі утримання сигналу $RT = 2.277$ mAU; m – маса проби; z – заряд:

а) значення характеристичних сигналів; б) значення характеристичних сигналів у розгорнутих координатах; в) структура молекули модифікатора згідно зі значенням характеристичних сигналів і бібліотечних даних

Після аналізу структури і хімічних властивостей синтезованого нами модифікатора досліджували вплив вмісту малеїнового ангідриду на адгезійні і фізико-механічні властивості епоксидної матриці. Попередньо експериментально встановлено (рис. 4), що адгезійна міцність немодифікованої епоксидної матриці становить $\sigma_a = 24,8$ МПа. Доведено, що формування компаунду у вигляді епоксидного олігомера і модифікатора призводить до створення КМ з поліпшеними адгезійними властивостями. Зокрема, встановлено (рис. 4), що оптимальним з усього спектра досліджуваних матеріалів є введення у епоксидний олігомер (на 100 мас.ч.) модифікатора МА за вмісту $q = 0,25$ мас.ч. Такий композит характеризується наступними показниками адгезійної міцності – $\sigma_a = 31,1$ МПа, що у 1,3 рази перевищує аналогічні показники, характерні для вихідної епоксидної матриці. Надалі збільшення вмісту добавки призводить до монотонного погіршення адгезійних властивостей матриці. Зокрема, за вмісту модифікатора у кількості $q = 0,50$ мас.ч. формується матеріал із значеннями адгезійної міцності при відриві – $\sigma_a = 28,4$ МПа, а найменші показники міцності адгезійних з'єднань ($\sigma_a = 25,0$ МПа) спостерігали для КМ, який містить модифікатор у кількості $q = 2,00$ мас.ч. Такі значення адгезійної міцності аналогічні з показниками, характерними для вихідної матриці, тому подальше введення МА за підвищеного вмісту не є доцільним.

Покращення адгезійних властивостей модифікованих КМ можна пояснити наступним. Уведення модифікатора за оптимального вмісту ($q = 0,25$ мас.ч.) забезпечує інтенсивну взаємодію добавки як з макромолекулами епоксидного олігомера, так і з активними центрами на поверхні металевої основи (у нашому випадку – сталь марки Ст 3). Це також збільшує ступінь зшивання матриці на межі поділу фаз «металева основа – адгезив», з одного боку, та безпосередньо у самому матеріалі матриці, з іншого боку. У цьому випадку суттєво збільшуються показники адгезійної міцності матеріалу.

Навпаки, збільшення вмісту модифікатора (понад $q = 0,30$ мас.ч.) зумовлює погіршення адгезійних властивостей КМ. На нашу думку, це насамперед зумовлено надлишком добавки у матриці. Це передбачає збільшення золь-фракції у матеріалі що, безперечно, призводить до погіршення взаємодії на межі поділу фаз.

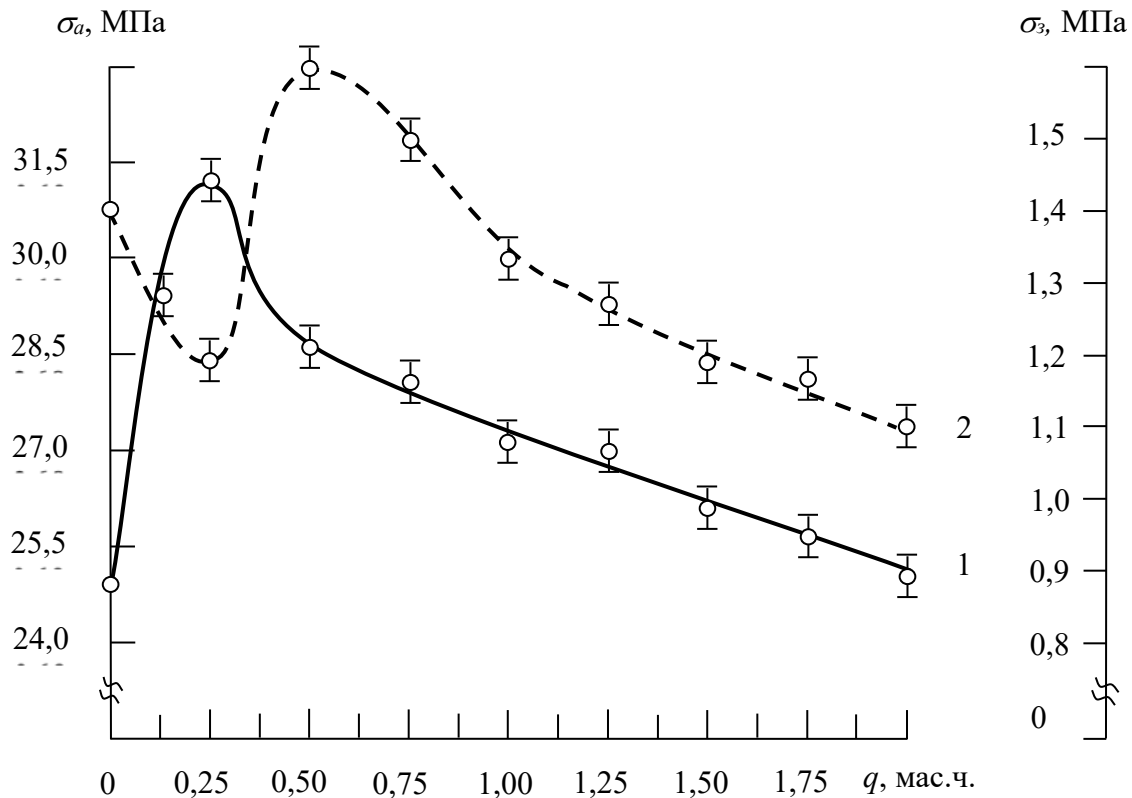


Рисунок 4 – Залежність адгезійної міцності і залишкових напружень у КМ від вмісту модифікатора малеїнового ангідриду: 1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – залишкові напруження (σ_z). Матеріал основи – сталь марки Ст 3

Підтвердженням наведеного вище є результати дослідження залишкових напружень КМ з різним вмістом модифікатора. Показано (рис. 4), що залишкові напруження у вихідній епоксидній матриці становлять $\sigma_z = 1,4$ МПа. Уведення добавки у кількості $q = 0,25$ мас.ч. сприяє зменшенню показників цієї властивості до $\sigma_z = 1,2$ МПа, що у 1,2 рази є меншим порівняно з аналогічними показниками для вихідної матриці. Цікавим є те, що введення МА за вмісту $q = 0,50$ мас.ч. призводить до збільшення залишкових напружень до $\sigma_z = 1,6$ МПа. Це перевищує показники, характерні для вихідної матриці. Надалі збільшення вмісту добавки сприяє монотонному зменшенню напружень до $\sigma_z = 1,1$ МПа (за вмісту модифікатора у кількості $q = 2,00$ мас.ч.).

Отримані результати добре узгоджуються з аналогічними концентраційними залежностями адгезійної міцності при відриві, адже найменшими залишковими напруженнями ($\sigma_z = 1,2$ МПа) характеризується композит з найбільшою адгезійною міцністю ($\sigma_a = 31,1$ МПа), який містить модифікатор – малеїновий ангідрид у кількості $q = 0,25$ мас.ч. Крім того, зазначимо, що максимальними залишковими напруженнями ($\sigma_z = 1,6$ МПа) з усього спектра досліджуваних матеріалів характеризується КМ із вмістом МА у кількості $q = 0,50$ мас.ч., який також відрізняється достатньо високими показниками адгезійної міцності ($\sigma_a = 28,4$ МПа). Це зумовлено надлишком модифікатора у полімерній системі, що зумовлює хоч і підвищення показників адгезійних властивостей, однак залишкові напруження водночас суттєво зростають.

Як було показано вище, окрім адгезійних властивостей, важливим при експлуатації захисних покриттів є показники їх когезійних характеристик. Тому наступним етапом випробувань було дослідження механічних властивостей модифікованої малеїновим ангідридом епоксидної матриці.

Експериментально встановлено (рис. 5), що модуль пружності для епоксидної матриці становить $E = 2,8$ ГПа. Водночас уведення модифікатора призводить до

монотонного зниження модуля пружності КМ незалежно від вмісту добавки. У такому випадку формуються матеріали, які характеризуються наступними показниками модуля пружності при згинанні 2,3...2,5 ГПа, що в середньому у 1,2 рази й меншим порівняно з аналогічними даними, характерними для вихідної матриці. Отже, можна констатувати про погіршення пружних властивостей матеріалів, що передбачає покращення їх пластичних характеристик.

Водночас треба виокремити результати дослідження руйнівних напружень при згинанні модифікованих КМ. Експериментально встановлено (рис. 5), що руйнівні напруження для вихідної епоксидної матриці становлять $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа. Однак, уведення добавки за незначного вмісту ($q = 0,25$ мас.ч.) забезпечує скачкоподібне збільшення (у 2,4 рази) показників руйнівних напружень розробленого композиту. У такому випадку руйнівні напруження зростають від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа до $\sigma_{3z} = 117,3$ МПа. Надалі збільшення вмісту добавки призводить до монотонного погіршення досліджуваної властивості матеріалів. Водночас, за вмісту МА у кількості $q = 0,50$ мас.ч. формується матеріал із руйнівними напруженнями – $\sigma_{3z} = 108,5$ МПа, а за вмісту добавки $q = 2,00$ мас.ч. – $\sigma_{3z} = 85,7$ МПа.

Можна стверджувати про високу міцність, а, отже, і пластичність модифікованих матеріалів, які працюють в умовах згинаючих навантажень. Такі результати пояснюють поліпшенням когезійної міцності матеріалів, з одного боку, а також зменшенням їх жорсткості, про що свідчать показники модуля пружності при згинанні, з іншого боку. Крім того, методом ІЧ-спектроскопії доведено, що покращення властивостей, модифікованої матриці, порівняно з вихідною, зумовлено наявністю у добавці С-С зв'язків, а також карбонільних (C=O) та карбоксильних (C-H) груп, які активно взаємодіють під час полімеризації з гідроксильними, епоксидними, карбонільними і карбоксильними групами епоксидного олігомера. Це дозволяє суттєво підвищити показники механічних характеристик епоксидної матриці за наявності незначного вмісту синтезованого модифікатора.

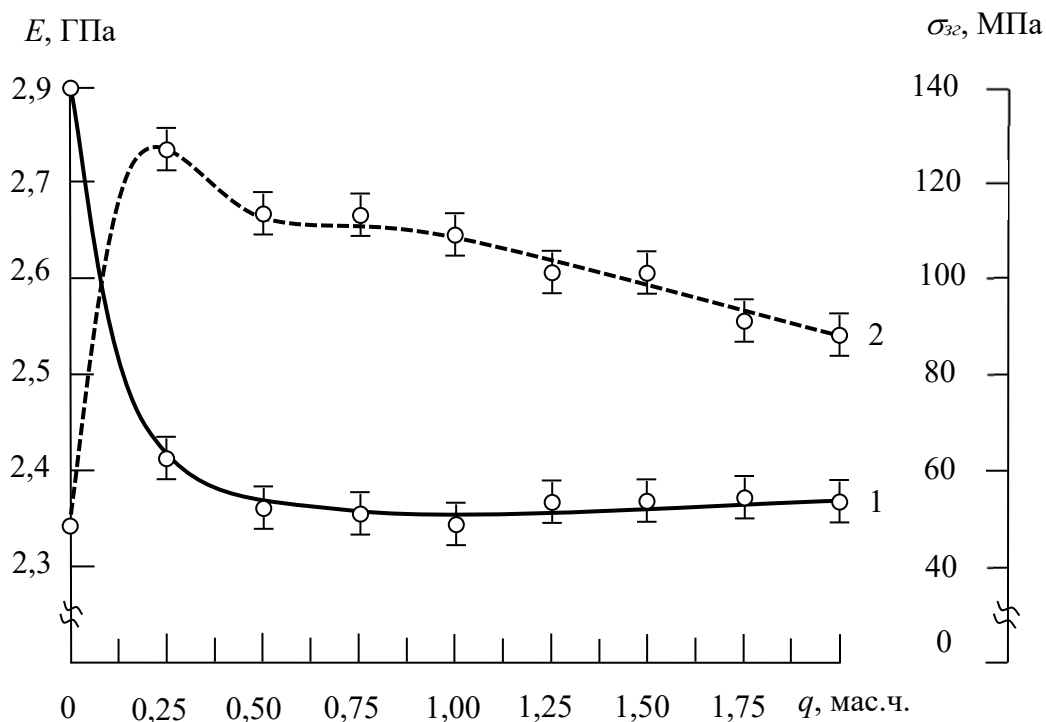


Рисунок 5 – Залежність фізико-механічних властивостей епоксидної матриці від вмісту модифікатора малеїнового ангідриду: 1) модуль пружності при згинанні (E); 2) руйнівні напруження при згинанні (σ_{3z})

Додатково нами проведено дослідження поведінки розроблених матеріалів при ударних навантаженнях. Експериментально встановлено (рис. 6), що показники ударної в'язкості вихідної епоксидної матриці становлять $W = 7,4$ кДж/м². Уведення у епоксидний зв'язувач модифікатора малеїнового ангідриду за гомеопатичного вмісту ($q = 0,25$ мас.ч.) забезпечує стосовно вихідної матриці збільшення показників ударної в'язкості у 1,9 рази (від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 13,7$ кДж/м²). Надалі збільшення вмісту добавки призводить до погіршення опору КМ до впливу ударних навантажень. Показано (рис. 3.5), що за вмісту МА у кількості $q = 0,50$ мас.ч. формується КМ, ударна в'язкість якого становить $W = 10,1$ кДж/м², а композит, наповнений ангідридом за вмісту $q = 2,00$ мас.ч. характеризується найменшими значеннями ударної в'язкості – $W = 7,5$ кДж/м² серед вибраного діапазону досліджуваних матеріалів.

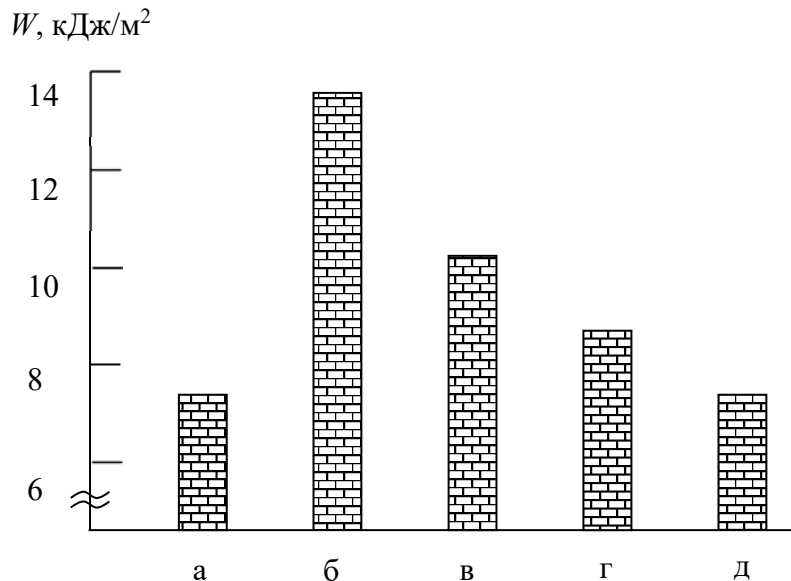


Рисунок 6 – Залежність ударної в'язкості (W) від вмісту (q) модифікатора малеїнового ангідриду у компаунді: а) вихідна матриця (контрольний зразок); б) $q = 0,25$ мас.ч.; в) $q = 0,50$ мас.ч.; г) $q = 1,00$ мас.ч.; д) $q = 2,00$ мас.ч.

Аналіз у комплексі проведених досліджень адгезійних та фізико-механічних властивостей розроблених КМ дозволяє констатувати наступне. Модифікатор малеїновий ангідрид доцільно застосовувати при формуванні полімерної матриці з поліпшеними властивостями, позаяк він містить у структурі активні до фізико-хімічної взаємодії з епоксидним олігомером С-С зв'язки, а також карбонільні (С=О) та карбоксильні (С-Н) групи. При зшиванні компаунду останні взаємодіють з макромолекулами епоксидного зв'язувача, що забезпечує підвищення гель-фракції у матриці, а, отже, і поліпшення її властивостей.

Висновки. У роботі встановлено оптимальний уміст модифікатора малеїнового ангідриду для формування модифікованої епоксидної матриці з покращеними адгезійними і механічними властивостями.

Доведено, що при формуванні композитів з поліпшеними адгезійними і фізико-механічними властивостями необхідно формувати композицію наступного складу: епоксидний олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА ($q = 10$ мас.ч.), модифікатор малеїновий ангідрид ($q = 0,25$ мас.ч.).

Формування такого матеріалу забезпечує порівняно з вихідною епоксидною матрицею підвищення наступних показників властивостей композитів:

- адгезійної міцності при відриві у 1,3 рази (від $\sigma_a = 24,8$ МПа до $\sigma_a = 31,1$ МПа);
- руйнівних напружень при згинанні у 2,4 рази (від $\sigma_{32} = 48,0$ МПа до $\sigma_{32} = 117,3$ МПа);

– ударної в'язкості у 1,9 рази (від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 13,7$ кДж/м²).

Зазначимо, що модуль пружності і залишкові напруження такого матеріалу зменшуються порівняно з вихідною епоксидною матрицею у 1,2 рази (від $E = 2,8$ ГПа до $E = 2,4$ ГПа та від $\sigma_3 = 1,4$ МПа до $\sigma_3 = 1,2$ МПа відповідно). Отриманий композит доцільно використовувати у вигляді матриці при формуванні одно- чи багатошарових захисних покриттів різного функціонального призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Саакиян Л. С., Ефремов А. П., Соболева И. А. Повышение коррозионной стойкости нефтегазопромышленного оборудования. Москва : Надра, 1988. 211 с.
2. Родюшкин В. М. Исследования технического состояния материалов и конструкций методами акустического зондирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.06. Нижний Новгород, 2008. 39 с.
3. Родькина А. В. Защита корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений от локальных коррозионно-механических разрушений: дис. к-та техн. наук: 05.08.03. Нижний Новгород. 2019. 177 с.
4. Огнева В. В., Бурмистров Е. Г. Анализ факторов, определяющих скорость изнашивания корпусов судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания. *Конгресс Международного форума «Великие реки»*, 2014, С. 317–321.
5. Komsta H., Vitenko T., Buketov A., Syzonenko O., Bezbakh O., Torpakov A., Kruglyj D., Appazov E., Popovych P., Rybicka I. Study of thermal stability and energy of activation of epoxy composites with particles of synthesised powder mixture for increasing reliability of vehicles. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2021. 110, 73–86. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.110.6>.
6. Buketov A., Yakushchenko S., Abdellah Menou, Bezbakh O., Vrublevskyi R., Kalba Y., Cherniavska T., Zhytnyk D., Danylyuk O. Optimization of ingredients upon development of the protective polymeric composite coatings for the river and sea transport. *Mechanical Engineering in Transport*. 2021. № 2, B89–B96. URL : <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.2.B89-B96>.
7. Brailo M. V., Buketov A. V., Yakushchenko S. V., Sapronov O. O., Dmytriiev D. O., Buketova N. M. Development of Epoxy-polyester Nanocomposite Materials with Improved Physical and Mechanical Properties for Increasing Transport Vehicle Reliability. *Journal of nano- and electronic physics*. 2021. Vol. 13, № 1, 01003-1–01003-5. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(1\).01003](https://doi.org/10.21272/jnep.13(1).01003)
8. Buckton A., Smetankin S., Yakushchenko S., Yurenin K., Sotsenko V., Brailo M., Kulinich V., Sapronov O., Kulinich A., Vrublevskyi R. & Bezbakh O. Physical-mechanical properties of epoxy composites filled with carbon black nano-dispersed powder for protection of transport vehicles. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*. 2021. Vol. 12, no 2, 1–12. DOI:10.1615/CompMechComputApplIntJ.2021037544.
9. Buketov A. V., Sizonenko O. M., Kruglyj D. G., Cherniavska T. V., Appazov E. S., Klevtsov K. M., Lypian Ye. V. Influence of synthesized iron-carbides mixture on properties of epoxy coatings for transport. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2020. Vol. 67, Issue 7, 1633–1648. URL : <https://www.jeasonline.org/paper/1157/preview>.
10. URL : https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D1%97%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%B8%D0%B4
11. Букетов А. В., Сметанкін С. О., Чернявська Т. В., Браїло М. В., Сапронов О. О., Соценко В. В., Юренін К. Ю., Кулініч В. Г., Якущенко С. В., Яцюк В. М. Метод підвищення ресурсу роботи устаткування річкового та морського транспорту за рахунок використання модифікованих захисних антикорозійних покриттів : монографія. Херсон : ХДМА, 2021. 126 с.

REFERENCES

1. Saakiyan L. S., Efremov A. P., Soboleva I. A. (1988). *Povihshenie korrozionnoy stoykosti neftegazopromihslavogo oborudovaniya*. Moskva : Nadra. 211.
2. Rodyushkin V. M. (2008). Issledovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya materialov i konstrukciy metodami akusticheskogo zondirovaniya. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Nizhniy Novgorod. 39.
3. Rodjkina A. V. (2019). Zathita korpusnikh konstrukciy sudov i plavuchikh tekhnicheskikh sooruzheniy ot lokalnikh korrozionno-mekhanicheskikh razrusheniy. *Doctor's thesis*. Nizhniy Novgorod.
4. Ogneva V. V., Burmistrov E. G. (2014). Analiz faktorov, opredelyayutikh skorostj iznashivaniya korpusov sudov vnutrennego i smeshannogo (reka-more) plavaniya. *Kongress Mezhdunarodnogo foruma «Velikie reki»*, 317–321.
5. Komsta H., Vitenko T., Buketov A., Syzonenko O., Bezbakh O., Torpakov A., Kruglyj D., Appazov E., Popovych P., Rybicka I. (2021). Study of thermal stability and energy of activation of epoxy composites with particles of synthesised powder mixture for increasing reliability of vehicles. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 110, 73–86.
6. Buketov A., Yakushchenko S., Abdellah Menou, Bezbakh O., Vrublevskiy R., Kalba Y., Cherniavska T., Zhytnyk D., Danylyuk O. (2021). Optimization of ingredients upon development of the protective polymeric composite coatings for the river and sea transport. *Mechanical Engineering in Transport*. №2, B89–B96. Retrived from <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.2.B89-B96>.
7. Braïlo M. V., Buketov A. V., Yakushchenko S. V., Sapronov O. O., Dmytriiev D. O., Buketova N. M. (2021). Development of Epoxy-polyester Nanocomposite Materials with Improved Physical and Mechanical Properties for Increasing Transport Vehicle Reliability. *Journal of nano- and electronic physics, Vol. 13, 1*, 01003-1–01003-5.
8. Buckton A., Smetankin S., Yakushchenko S., Yurenin K., Sotsenko V., Braïlo M., Kulinich V., Sapronov O., Kulinich A., Vrublevskiy R. & Bezbakh O. (2021). Physical-mechanical properties of epoxy composites filled with carbon black nano-dispersed powder for protection of transport vehicles. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal, Vol. 12, no. 2*, 1–12.
9. Buketov A. V., Sizonenko O. M., Kruglyj D. G., Cherniavska T. V., Appazov E. S., Klevtsov K. M., Lypian Ye. V. (2020). Influence of synthesized iron-carbides mixture on properties of epoxy coatings for transport. *Journal of Engineering and Applied Science, Vol. 67, Issue 7*, 1633–1648. Retrived from <https://www.jeasonline.org/paper/1157/preview>.
10. Retrived from https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D1%97%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%B8%D0%B4
11. Buketov A. V., Smetankin S. O., Chernyavska T. V., Braïlo M. V., Sapronov O. O., Socenko V. V., Yurenin K. Yu., Kulinich V. G., Yakuthenko S. V., Yacyuk V. M. (2021). *Metod pidvithennya resursu roboti ustatkuvannya richkovogo ta morsjkogo transportu za rakhunok vikoristannya modifikovanikh zakhisnikh antikoroziyjnikh pokrittiv* : monografiya. Kherson : KhDMA.

Житник Д. В., Гусев В. Н., Букетов А. В., Кулинич В. Г., Яцюк В. Н. ВЛИЯНИЕ МАЛЕИНОВОГО АНГИДРИДА НА АДГЕЗИОННЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Показана перспективность использования эпоксидных материалов, которые отличаются улучшенными эксплуатационными характеристиками. Однако улучшения указанных выше свойств в комплексе обеспечивают введением химически активных к эпоксидному олигомеру модификаторов, пластификаторов, наполнителей. Это обеспечивает улучшение межфазного взаимодействия, что, в свою очередь, улучшает свойства полимерных композитов.

В качестве основного компонента для связующего при формировании эпоксидных материалов выбран эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20. Для сшивания эпоксидных композиций использован отвердитель полиэтиленполиамин. В виде модификатора для улучшения свойств эпоксидных композитов использован малеиновый ангидрид. Модификатор вводили в связующее при содержании от 0,10 до 2,00 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Молекулярная формула модификатора: $C_4H_2O_3$. Молярная масса - 98,057 г / моль. Внешний вид – белое вещество. Плотность - $\rho = 1,314$ г / см (при температуре 60 °С) и $\rho = 1,480$ г / см (при 20 °С).

Установлено оптимальное содержание модификатора малеинового ангидрида для формирования модифицированной эпоксидной матрицы с улучшенными адгезионными и механическими свойствами. Доказано, что при формировании композитов с улучшенными адгезионными и физико-механическими свойствами необходимо формирование композитов следующего состава: эпоксидный олигомер марки ЭД-20 ($q = 100$ масс.ч.), отвердитель полиэтиленполиамин ПЕПА ($q = 10$ масс.ч.), модификатор малеиновый ангидрид ($q = 0,25$ масс.ч.).

Формирование такого материала обеспечивает по сравнению с исходной эпоксидной матрицей повышение следующих показателей свойств композитов: адгезионной прочности при отрыве в 1,3 раз (от 24,8 МПа до 31,1 МПа); разрушающих напряжений при изгибе в 2,4 раза (от 48,0 МПа до 117,3 МПа); ударной вязкости в 1,9 раз (от 7,4 кДж / м² до 13,7 кДж / м²).

Отметим, что модуль упругости и остаточные напряжения такого материала уменьшаются по сравнению с исходной эпоксидной матрицей в 1,2 раз (от 2,8 ГПа до 2,4 ГПа и от 1,4 МПа до 1,2 МПа соответственно). Полученный композит целесообразно использовать в виде матрицы при формировании одно- или многослойных защитных покрытий различного функционального назначения.

Ключевые слова: матрица, эпоксидный композит, модификатор, адгезионные свойства, когезионная прочность, остаточные напряжения.

Zhytnyk D. V., Husyev V. N., Buketov A. V., Kulinich V. G., Yatsyuk V. N. INFLUENCE OF MALEIC ANHYDRIDE ON ADHESIVE AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY MATRIX FOR PROTECTION OF VEHICLE PARTS

The sustainability of application of epoxy materials, distinguished by improved performance characteristics, has been shown. However, the improvement of the above properties in the complex is provided by the introduction of modifiers, plasticizers, fillers that are reactive to the epoxy oligomer. This ensures an improved interfacial interaction, which, in turn, advances the properties of polymer composites.

As the main component for the binder in the formation of epoxy materials, we have chosen an epoxy diene oligomer of the ED-20 brand. Polyethylene polyamine hardener has been used for epoxy compositions crosslinking. Maleic anhydride has been used as a modifier to improve the properties of epoxy composites. The modifier was introduced into the binder at a content of from 0.10 to 2.00 mass.% per 100 mass.% epoxy oligomer ED-20. Molecular formula of the modifier: $C_4H_2O_3$. The molar mass is 98.057 g/mol. Appearance - white matter. Density - $\rho = 1.314$ g/cm (at 60 °C) and $\rho = 1.480$ g/cm (at 20 °C).

The optimal content of maleic anhydride modifier for the formation of a modified epoxy matrix with improved adhesive and mechanical properties has been established. It has been proved that when forming composites with improved adhesive, physical and mechanical properties, it is necessary to form a composition of the following formulation: epoxy oligomer ED-20 ($q = 100$ mass. %), polyethylene polyamine PEPA hardener ($q = 10$ mass.%), modifier maleic anhydride ($q = 0.25$ mass.% by weight).

The formation of that kind of material provides, in comparison with the original epoxy matrix, an increase in the following indicators of composites properties: adhesion strength at separation by 1.3 times (from 24.8 MPa to 31.1 MPa); breaking stresses in bending 2.4 times (from 48.0 MPa to 117.3 MPa); impact strength 1.9 times (from 7.4 kJ / m² to 13.7 kJ/m²).

Note that the modulus of elasticity and residual stresses of that kind of material decrease in comparison with the original epoxy matrix by a factor of 1.2 (from 2.8 GPa to 2.4 GPa and from 1.4 MPa to 1.2 MPa, respectively). It is advisable to use the obtained composite in the form of a matrix in the formation of single or multilayer protective coatings for various functional purposes.

Keywords: matrix, epoxy composite, modifier, adhesive properties, cohesive strength, residual stresses.

© Житник Д. В., Гусев В. М., Букетов А. В., Кулініч В. Г., Яцюк В. М.

Статтю прийнято
до редакції 07.06.21

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДНА
КУЗОВА НАПІВПРИЧЕПА ВАНТАЖНОГО АВТОМОБІЛЯ**

Ляшук О. Л., д.т.н., професор кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: oleglashuk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4881-8568;

Гевко І. Б., д.т.н., професор кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: gevkoivan1@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5170-0857;

Левкович М. Г., к.т.н., доцент кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: Levkovmin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6793-8736;

Вовк Ю. Я., к.т.н., доцент кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: sepd.tntu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8983-2580;

Сташків М. Я., к.т.н., доцент кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: stam77@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7325-8016;

Капський Д. В., д.т.н., професор, декан автотракторного факультету Білоруського національного технічного університету, м. Мінськ, Білорусь, e-mail: d.kapsky@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9300-3857

У статті наведено нові високоефективні конструкції вантажних автомобілів, що максимально пристосовані для перевезення певних видів вантажів і до конкретних умов експлуатації. Стаття присвячена удосконаленню технології проектування несучих конструкцій кузовів вантажних автомобілів. Виконано огляд і аналіз сучасного стану теорії математичного програмування та оптимального проектування. Запропонована чисельна процедура оптимізації несучих конструкцій кузовів вантажних автомобілів.

Проведено дослідження впливу геометричних параметрів елементів дна кузова на його напружено-деформований стан (НДС) вантажного автомобіля із загальним застосуванням методів комп'ютерного моделювання. Дослідження проводились засобами інженерного аналізу Simulation спеціалізованого програмного комплексу SolidWorks на розробленій CAD-моделі кузова напівпричепи вантажного автомобіля. Проведено аналіз зміни параметрів НДС при зміні геометричних параметрів елементів дна кузова. Досліджено характер зміни статичного напруження та переміщення залежно від зміни пропорцій поперечного перетину швелера при фіксованих геометричних розмірах заготовки й товщини заготовки та матеріалу дна кузова.

За результатами досліджень побудовано графічні залежності зміни статичного напруження, переміщення та коефіцієнта запасу міцності від ширини полки та товщини швелера; залежність статичних напружень у швелері від товщини стінки швелера та товщини листа дна кузова. Отримано рівняння, що описує характер зміни напружень у швелерах дна кузова напівпричепи. Результати проведених досліджень щодо удосконалення конструкції кузова вантажного автомобіля є основою для прийняття інженерних рішень з удосконалення конструкції дна кузова напівпричепи вантажного автомобіля, що дозволяє максимізувати вантажопідйомність та покращити міцність, зменшити вагу та продовжити експлуатаційний ресурс, а також підтримувати технічний ресурс напівпричепи за наявної ремонтної бази.

Ключові слова: дно кузова напівпричепи, швелер, розгортка, статичне напруження, статичне переміщення, CAD-модель.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.093-103

Вступ. Автомобільний транспорт є одним з найефективніших способів перевезення матеріалів, сировини чи готової продукції. На ринку вантажних перевезень України частка автомобільного транспорту, порівнюючи з іншими видами транспорту, постійно зростає – з 69 % у 2015 р. до близько 75 % у 2020 р.

В Україні протягом 2005–2020 рр. простежується стійка тенденція до зростання обсягів перевезення вантажів автомобільним транспортом у межах 10-13 млрд т

У середньому за добу автомобільним транспортом перевозиться 3,3 млн т вантажів, а середня відстань перевезення однієї тонни вантажів становить близько 60 км [1].

Незважаючи на постійне підвищення інтенсивності експлуатації автомобільного транспорту у сфері вантажних перевезень, оновлення парку рухомого складу автомобільного транспорту відбувається повільними темпами – майже 70 % рухомого складу є технічно та/або морально застарілими, а 50 % одиниць техніки експлуатуються більше як 10 років.

Підвищення надійності, технологічності, вантажопідйомності при одночасному зменшенні металоємності та збільшенні терміну безвідмовної експлуатації транспортних засобів забезпечує необхідну конкурентоспроможність на ринку вантажних перевезень [2].

Кузов напівпричепи вантажного автомобіля – основна частина транспортного засобу, яка містить низку каналів, виготовлених із м'якої сталі або алюмінієвого листового металу. Більшість одиниць технологічного обладнання зосереджуються на конструкції кузова вантажівки з різними модифікаціями, необхідними для мінімізації напруження та підвищення коефіцієнта навантаження. При проектуванні кузова треба враховувати експлуатаційні напруження та властивості матеріалу.

При експлуатації виникають пошкодження кузовів унаслідок зношування та екстремальних впливів, а також певних локальних ділянках рамних конструкцій виникають тріщини та інші пошкодження. У багатьох випадках при аналізі стану кузовів виявляється те, що рама напівпричепи знаходиться в задовільному стані, а кузов містить вм'ятини, тріщини чи інші дефекти [3]. Значні дослідження в цьому напрямку здійснено в наступних працях [4–15].

Ураховуючи складну економічну ситуацію на підприємствах виникає необхідність ремонту або виготовлення нових кузовів для своїх потреб.

Мета статті – дослідження впливу геометричних параметрів елементів дна кузова на його напружено-деформований стан.

Рішення задачі. При дослідженні напружено-деформованого стану металоконструкції автомобільних кузовів використовують аналітичні, чисельні та експериментальні методи.

При проектуванні кузова вантажного автомобіля важливою є мінімізація його ваги, оскільки надлишкова вага призводить до збільшення виробничих витрат, зменшення частки корисного вантажу та знижує ефективність використання палива. Згідно з концепцією зменшення ваги із забезпеченням заданої міцності, моделюється та аналізується модель кузова із змінними параметрами елементів дна. САД-моделі кузова та аналіз напружено і деформованого стану швелерів дна кузовів виконано засобами програмного комплексу SolidWorks.

У більшості кузовів вантажних автомобілів нижню частину дна виконано у вигляді швелерів (рис. 1.).

Отже, існує потреба в оптимізації конструкції кузова, що дозволяє максимізувати вантажопідйомність та покращити міцність, зменшити вагу та продовжити експлуатаційний ресурс.

Тому проведення оптимізації конструкції швелера нижньої частини кузова шляхом розгляду різних моделей є актуальним завданням.

При проектуванні дна кузова важливе значення мають розміри швелера, матеріал, їх розміщення та кількість. При виготовленні швелерів використовують листи металу розміром 2500×1250 мм та товщиною від 3 до 5 мм. Відповідно, оптимальний розкрій листа складатиме 250 мм.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд дна кузова

Розгортка швелера ($t=5$, $b=50$, $h=165,37$) зображена на рис. 2, а отриманий після згинання розгортки швелер – на рис 3.

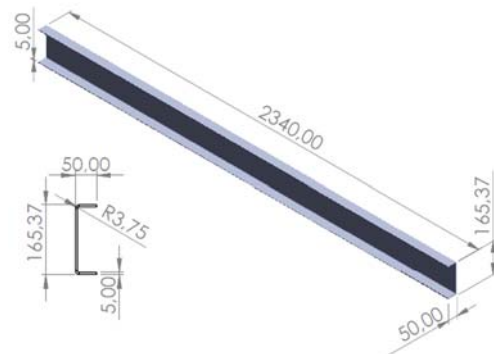

 Рисунок 2 – Розгортка швелера ($t=5$, $b=50$, $h=165,37$)


Рисунок 3 – Розміри швелера, отриманого з розгортки (рис. 2)

Нами прийнято використовувати при дослідженні швелери, які виготовлені з матеріалу товщиною від 3 до 5 мм та шириною полки 50 мм. Так як зміна товщини матеріалу призводить до зміни висоти, відповідно, отримаємо наступні розміри швелерів, які наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Розміри швелера залежно від ширини полки та товщини

Товщина швелера t , мм	Ширина полки b , мм	Висота h , мм	R , мм
3	50	160,0	3,75
4	50	163,0	3,75
5	50	165,4	3,75

Для проведення дослідження напружено-деформованого стану (НДС) було створено модель швелерів згідно з табл. 1. Побудовано сітку оболонки з використанням серединних поверхонь для моделей з глобальним розміром 30,86 мм та допуском 1,54 мм (рис. 4).

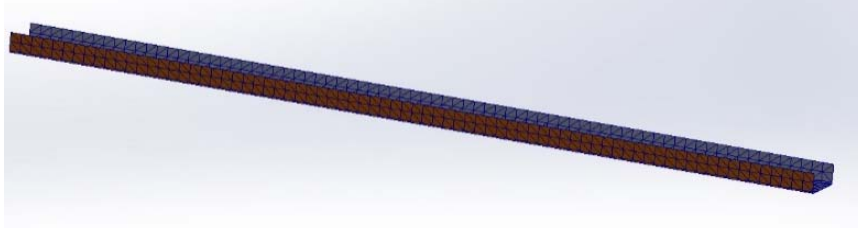


Рисунок 4 – Сітка кінцевих елементів з використанням серединних поверхонь

Умови прикладення навантаження зображено на рис. 5, прикладена сила на об'єкт складала $P=7700$ Н, матеріал – Ст 3 ГОСТ 380-88 (межа текучості $\sigma_T=206,81$ МПа, межа міцності 517,02 МПа).

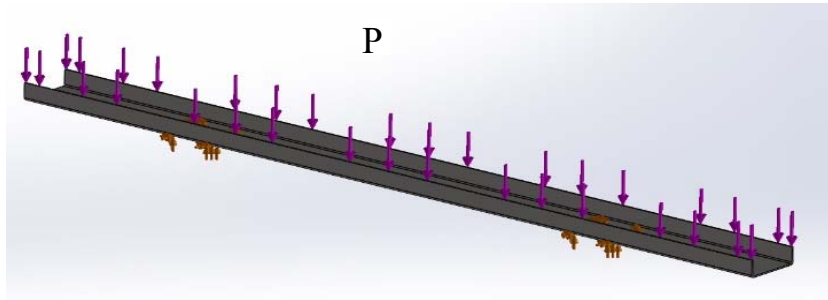
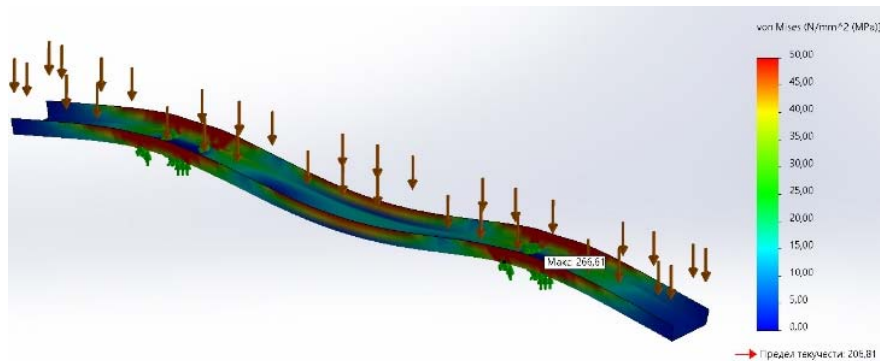


Рисунок 5 – Умови прикладення навантаження ($P=7700$ Н) та закріплення
Результати дослідження НДС швелерів наведено на рис. 6–8 та табл. 2.
Статичне напруження



Статичне переміщення

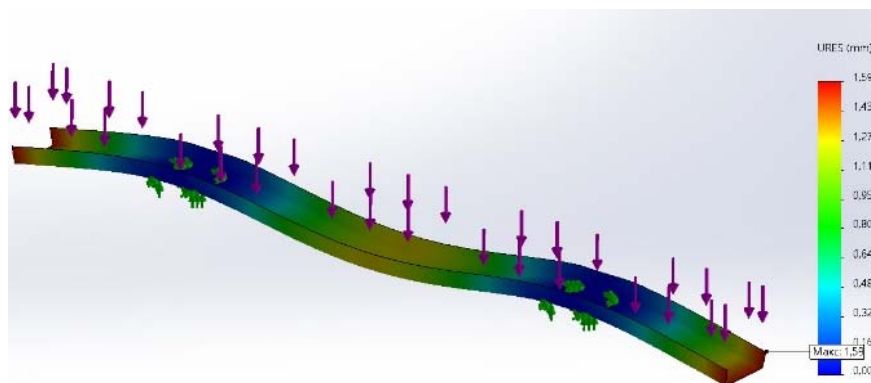
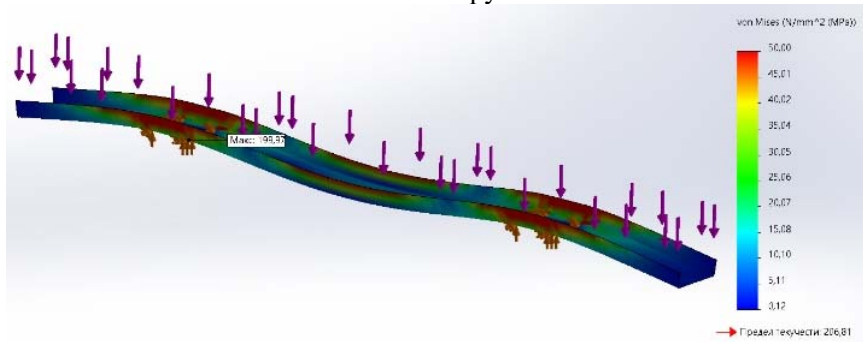


Рисунок 6 – НДС швелера при $b=50$ мм, $t=3$ мм, $\sigma_T=206,8$ МПа

Статичне напруження



Статичне переміщення

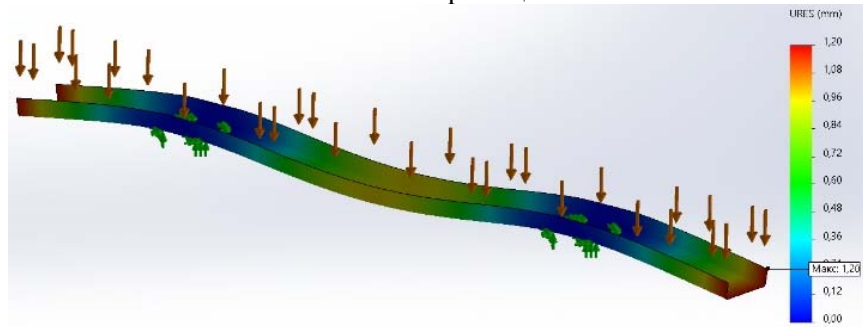
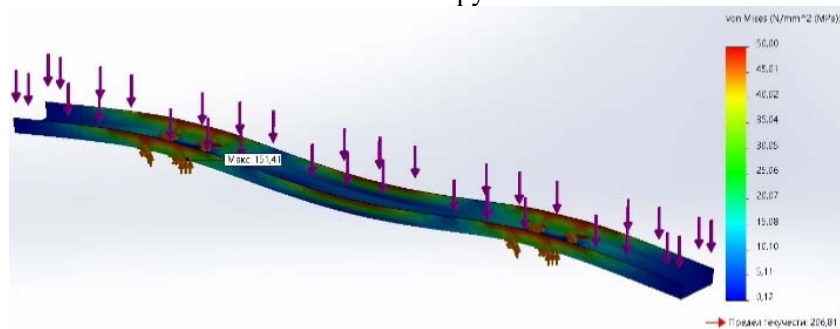


Рисунок 7 – НДС швелера при $b=50$ мм, $t=4$ мм, $\sigma_T=206,8$ МПа

Статичне напруження



Статичне переміщення

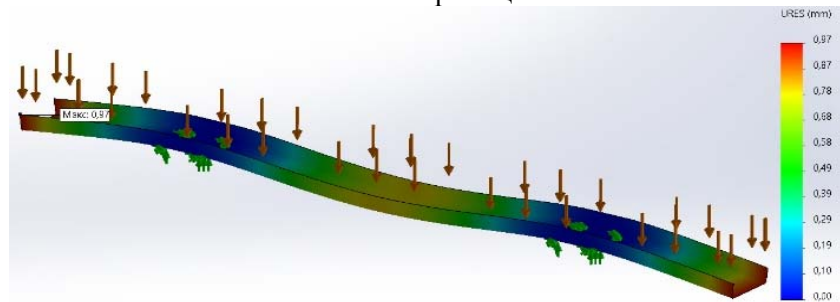


Рисунок 8 – НДС швелера при $b=50$ мм, $t=5$ мм, $\sigma_T=206,8$ МПа

Таблиця 2 – Результати дослідження статичного напруження, переміщення та коефіцієнта запасу міцності

Товщина швелера t , мм	Ширина полки швелера b , мм	Статичне напруження, МПа	Статичне переміщення, мм	Коефіцієнт запасу міцності
3	50	266,61	1,59	0,77
4	50	199,97	1,2	1,03
5	50	151,41	0,97	1,36

На основі результатів дослідження побудовано графічні залежності статичного напруження, переміщення, коефіцієнта запасу міцності від геометричних параметрів рис. 9–11.

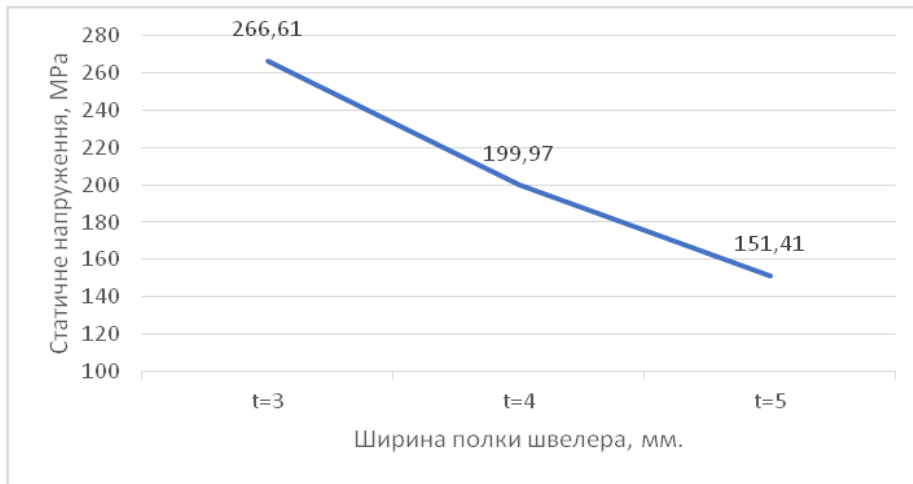


Рисунок 9 – Залежність статичного напруження (МПа) від ширини полки та товщини швелера (b=50, мм; t=3-5 мм; $\sigma_T=206,8$ МПа; прикладена сила на об'єкт 7700 Н)

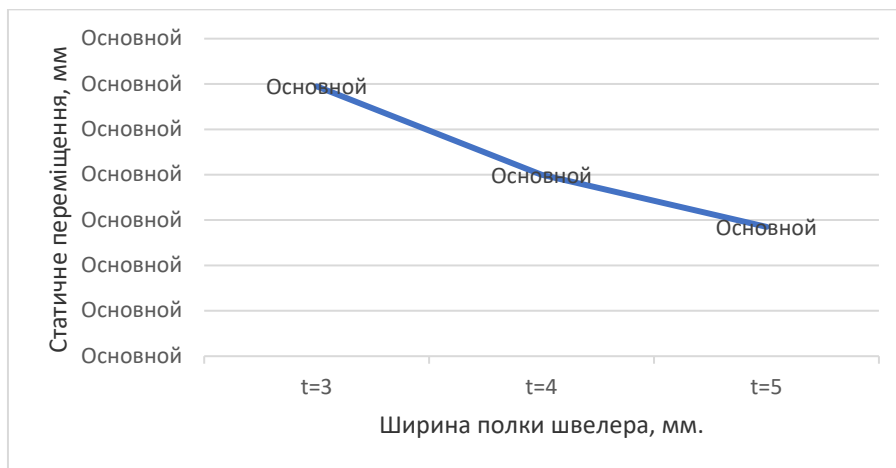


Рисунок 10 – Залежність статичного переміщення в мм від ширини полки та товщини швелера (b=50, мм; t=3-5 мм; $\sigma_T=206,8$ МПа; прикладена сила на об'єкт 7700 Н)

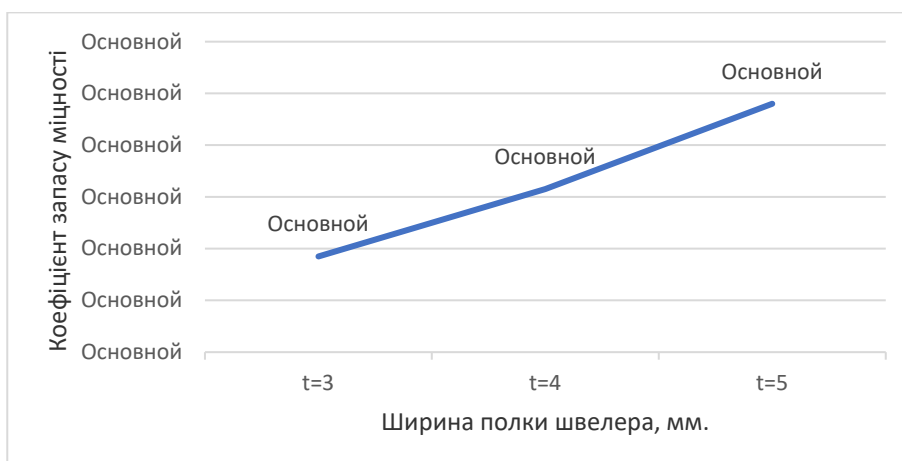


Рисунок 11 – Залежність коефіцієнта запасу міцності від ширини полки та товщини швелера (b=50, мм; t=3-5 мм; $\sigma_T=206,8$ МПа; прикладена сила на об'єкт 7700 Н)

Для проведення дослідження напружено-деформованого стану (НДС) дна кузова було створено CAD-модель кузова, рис. 12. Прикладена сила на об'єкт складала $P=200$ кН, матеріал – сталь звичайної якості Ст3пс ГОСТ 380-88.

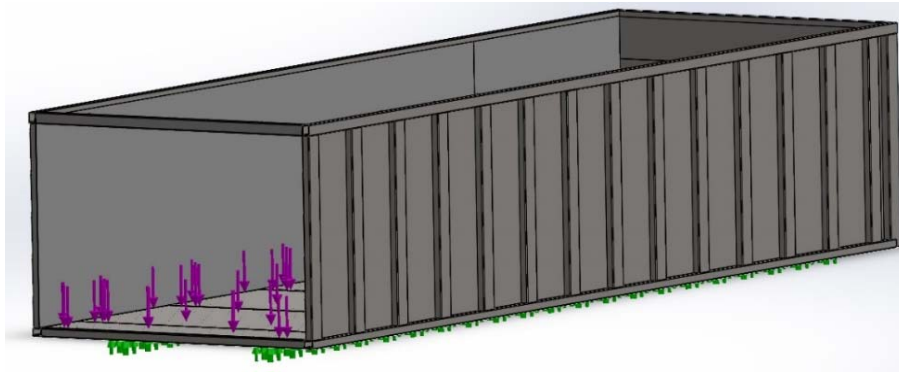


Рисунок 12 – CAD-модель кузова

При дослідженні дна кузова проводилася зміна товщини листів у діапазоні від 3 до 5 мм. На рис. 13 зображено схему розміщення швелерів.

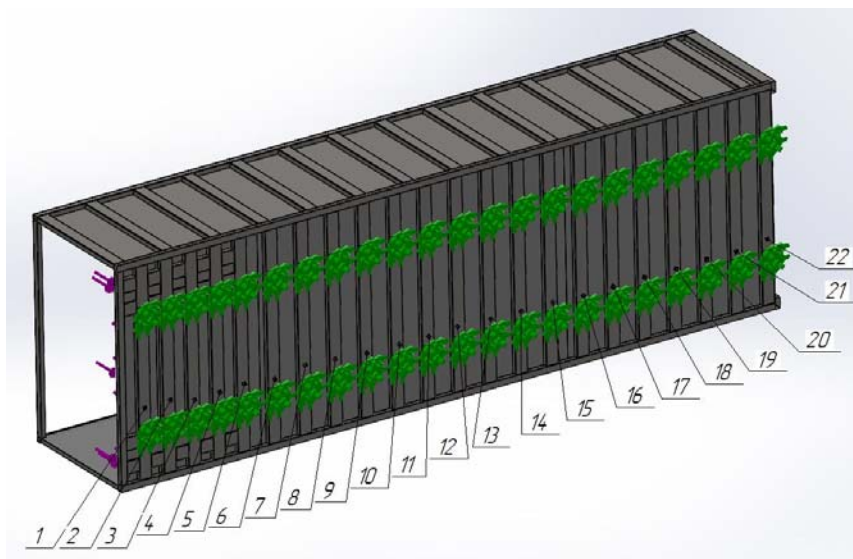


Рисунок 13 – Схема розміщення швелерів

Отримані результати подано на рис. 14–16 та у таблиці 3.

Таблиця 3 – Розрахункові статичні напруження, що діють на швелери, МПа

	Товщина листа дна, мм	Позиція швелера										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Товщина стінки швелера, t=3 мм	t=3	48,7	26,5	23,9	23,0	23,7	24,0	24,2	24,3	25,3	25,1	25,6
	t=4	47,3	25,3	22,9	22,2	22,8	23,5	23,8	24,2	24,6	24,7	25,1
	t=5	45,2	24,7	22,3	21,6	22,4	23,1	23,5	23,9	24,3	24,4	24,8
	Товщина листа дна, мм	Позиція швелера										
		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	t=3	26,1	26,3	26,8	27,5	28,1	28,5	29,4	30,7	31,1	31,3	27,7
	t=4	25,3	25,8	26,3	27,1	27,3	27,6	28,6	29,4	29,8	30,2	26,8
	t=5	24,9	25,4	25,8	26,5	26,7	27,1	27,9	28,7	28,9	29,4	25,8

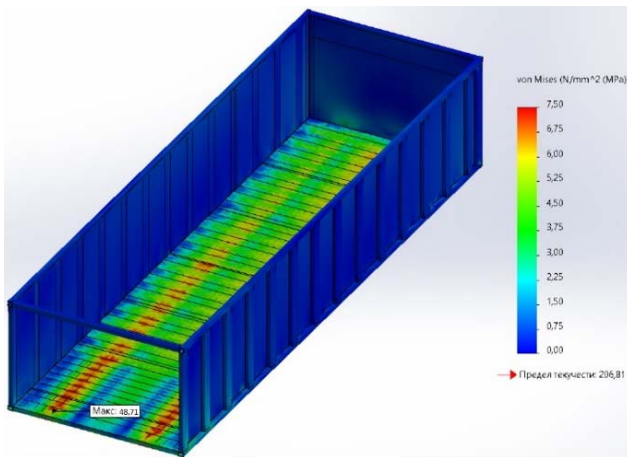


Рисунок 14 – Статичне напруження, що діє на швелер №1 ($t_{шв}=3$ мм, $t_{л,дн\grave{a}}=3$, $\sigma_T=206,8$ МПа)

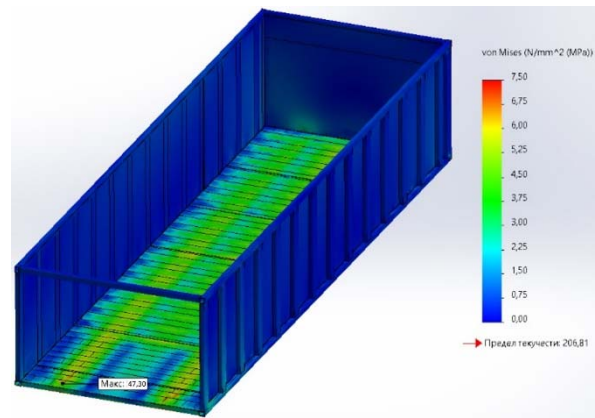


Рисунок 15 – Статичне напруження, що діє на швелер №1 ($t_{шв}=3$ мм, $t_{л,дн\grave{a}}=4$, $\sigma_T=206,8$ МПа)

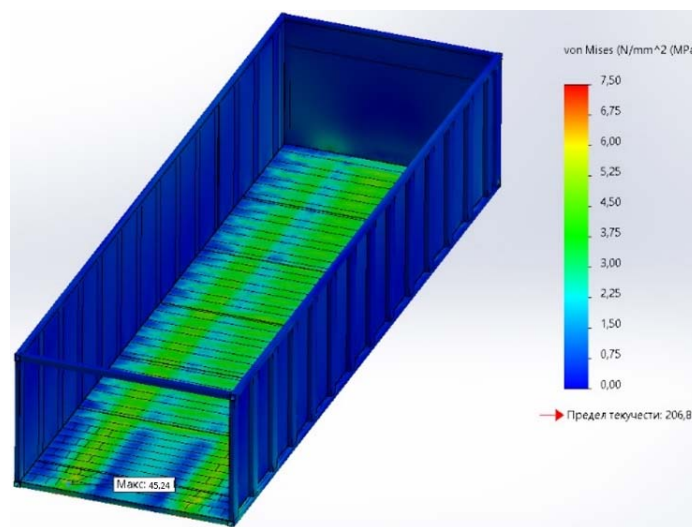


Рисунок 16 – Статичне напруження, що діє на швелер №1 ($t_{шв}=3$ мм, $t_{л,дн\grave{a}}=5$, $\sigma_T=206,8$ МПа)

На основі отриманих результатів побудовано залежність статичного напруження у швелерах дна кузова залежно від товщини стінки швелера та товщини листа дна кузова (рис. 17.).

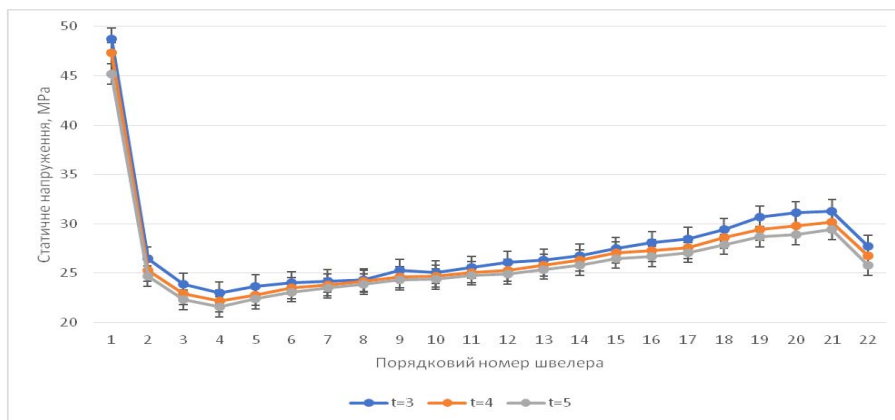


Рисунок 17 – Статичне напруження у швелерах дна кузова залежно від товщини стінки швелера та товщини листа дна кузова ($t_{шв}=3$ мм, $t_{л,дн\grave{a}}=3-5$, $\sigma_T=206,8$ МПа)

Характер зміни напружень у швелерах dna кузова напівпричепа в загальному можна описати рівнянням:

$$\sigma(x) = 3 \cdot 10^{-5}x^6 - 0,0027x^5 + 0,0856x^4 - 1,329x^3 + 10,591x^2 - 39,905x + 77,394.$$

Отримані результати є основою для прийняття інженерних рішень з удосконалення конструкції dna кузова напівпричепа вантажного автомобіля, що дозволяє максимізувати вантажопідйомність та покращити міцність, зменшити вагу та продовжити експлуатаційний ресурс.

Висновки. Аналіз НДС кузова напівпричепа вантажного автомобіля на основі розробленої CAD-моделі кузова дозволяє дослідити характер розподілу напружень в елементах dna кузова, встановити залежності рівня напружень та деформацій елементів dna кузова від їх товщини та товщини dna кузова, виявити найбільш небезпечні в плані несучої здатності елементи dna кузова напівпричепа. Отримані результати є основою для прийняття інженерних рішень з удосконалення конструкції dna кузова напівпричепа вантажного автомобіля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL : <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 18.01.2021)
2. Krishna K. V., Reddy K. Y., Venugopal K., Ravi K. Design and analysis of truck body for increasing the payload capacity. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol : IOP Publishing, 2017. Vol. 263, No. 6. 062065.
3. Vinjavarapu S., Koteswararao U., Narayana V. L. Design Optimization of Tipper Truck Body. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2012. Vol. 4, Issue 9. P. 11–20.
4. Garud R. Y., Pandey A. Structural Analysis of Automotive Chassis, Design Modification and Optimization. *Int. Journal Appl. Eng. Res.* 2018. Vol. 13, No. 11. P. 9887–9892.
5. Nayak B., Sambaiah Ch. Design and Analysis of Dumped Body. *Int. Journal of Mech. Indus. Eng.* 2013. Vol. 2, Issue 3. P. 161–165.
6. Jithendra B., Anil K. M. Optimization of Weight and Stress Reduction of Dump For Automotive Vehicles. *Int. Journal of Engineering of Res. Technol.* 2013. Vol. 2, Issue 3. P. 1886–1893.
7. Ramacharan C., Prashanth A. S. Design and analysis of Dump Truck Floor Bed. *Int. Journal Sci. Res. Dev.*, 2015. Vol. 3, Issue 3. P. 706–710.
8. Техническая эксплуатация автомобилей / за ред. Э. С. Кузнецова. Москва : Транспорт, 1991. 412 с.
9. Павлов В. А., Муханов С. А. Транспортные прицепы и полуприцепы. Москва : Воениздат, 1981. 191 с.
10. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. Москва : ДМК Пресс, 2010. 464 с.
11. Бочаров Н. Ф., Зузов В. Н., Курбатский М. И. Применение ЭВМ в проектировании рам грузовых автомобилей : учебное пособие. Москва : МВТУ, 1982. 36 с.
12. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Москва : Мир, 1975. 541 с.
13. Lyashuk O., Pyndus Y., Lutsiv I., Vovk Y., Poberezhna L., Tretiakov O., Zolotyy R. Fracture cause analysis of the extruder's shaft and geometry optimization of the spline. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2019. Vol. 13, No. 1. P. 4449–4460. DOI:10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378.
14. Tson O. Analytical evaluation of technical and operational indicators impact on the transportation technology by automobile trailers. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2016. Vol. 1, No. 1. P. 23–26. doi:10.14254/jsdtl.2016.1-1.4.

REFERENCES

1. Ofitsiyniyi sait Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy. Rerrived from <http://www.ukrstat.gov.ua/> (data zvernennia 18.01.2021)
2. Krishna K. V., Reddy K. Y., Venugopal K., Ravi K. (2017). Design and analysis of truck body for increasing the payload capacity. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol : IOP Publishing. Vol. 263, Issue 6. P. 062065.
3. Vinjavarapu S., Koteswararao U., Narayana V. L. (2012). Design Optimization of Tipper Truck Body. *International Journal of Enginerring Research and Development*, Vol. 4, Issue 9, 11–20.
4. Garud R. Y., Pandey A. (2018). Structural Analysis of Automotive Chassis, Design Modification and Optimization. *Int. J. Appl. Eng. Res*, Vol. 13, Issue 11, 9887–9892.
5. Nayak B., Sambaiah Ch. (2013). Design and Analysis of Dumped Body. *Int. Journal of Mech. Indus. Eng*, Vol. 2, Issue 3, 161–165.
6. Jithendra B., Anil K. M. (2013). Optimization of Weight and Stress Reduction of Dump For Automotive Vehicles. *Int. Journal of Engineering of Res. Technol.*, Vol. 2, 1886–1893.
7. Ramacharan C., Prashanth A. S. (2015). Design and analysis of Dump Truck Floor Bed. *Int. Journal Sci. Res. Dev.*, Vol. 3, 706–710.
8. Kuznecova Eh. S. (Ed.) (1991). *Tekhnicheskaya ehkspluatatsiya avtomobiley*. Moskva : Transport.
9. Pavlov V. A., Mukhanov S. A. (1981). *Transportnihe pricepiv i polupricepiv*. Moskva : Voenizdat.
10. Alyamovskiyj A. A. (2010). *Inzhenernihe raschetih v SolidWorks Simulation*. Moskva : DMK Press.
11. Bocharov N. F., Zuzov V. N., Kurbatskiyj M. I. (1982). *Primenenie EhVM v proektirovanii ram gruzovihkh avtomobileyj : uchebnoe posobie*. Moskva : MVTU.
12. Zenkevich O. (1975). *Metod konechnihkh ehlementov v tekhnike*. Moskva : Mir.
13. Lyashuk O., Pyndus Y., Lutsiv I., Vovk Y., Poberezhna L., Tretiakov O. & Zoloty R. (2019). Fracture cause analysis of the extruders shaft and geometry optimization of the spline. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Vol. 13, Issue 1, 4449–4460. DOI:10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378.
14. Tson O. (2016). Analytical evaluation of technical and operational indicators impact on the transportation technology by automobile trailers. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, Vol. 1, Issue 1, 23–26. DOI:10.14254/jsdtl.2016.1-1.4.

Ляшук О. Л., Гевко И. Б., Левкович М. Г., Вовк Ю. Я., Сташків Н. Я., Капський Д. В.
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДНА КУЗОВА
ПОЛУПРИЦЕПА ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

В статье приведены новые высокоэффективные конструкции грузовых автомобилей, максимально приспособленные для перевозки определенных видов грузов и к конкретным условиям эксплуатации. Статья посвящена совершенствованию технологии проектирования несущих конструкций кузовов грузовых автомобилей. Выполнен обзор и анализ современного состояния теории математического программирования и оптимального проектирования. Предложена численная процедура оптимизации несущих конструкций кузовов грузовых автомобилей.

Проведено исследование влияния геометрических параметров элементов дна кузова на его напряженно-деформированное состояние (НДС) грузового автомобиля с общим применением методов компьютерного моделирования. Исследования проводились средствами инженерного анализа Simulation специализированного программного комплекса SolidWorks на разработанной САД - модели кузова полуприцепа грузового автомобиля. Проведен анализ изменения параметров НДС при изменении геометрических параметров элементов дна кузова. Исследован характер изменения статического напряжения и перемещения в зависимости от изменения пропорций поперечного пересечения швеллера при фиксированных геометрических размерах заготовки и толщины заготовки и материала дна кузова.

По результатам исследований построены графические зависимости изменения статического напряжения, перемещения и коэффициента запаса прочности от ширины полки и толщины швеллера; зависимость статических напряжений в швеллере от толщины стенки швеллера и толщины листа дна кузова. Получено уравнение, описывающее характер изменения напряжений

в швеллерах дна кузова полуприцепа. Результаты проведенных исследований по совершенствованию конструкции кузова грузового автомобиля является основой для принятия инженерных решений по совершенствованию конструкции дна кузова полуприцепа грузового автомобиля, что позволяет максимизировать грузоподъемность и улучшить прочность, уменьшить вес и продлить эксплуатационный ресурс, а также поддерживать технический ресурс полуприцепа при существующей ремонтной базе.

Ключевые слова: дно кузова полуприцепа, швеллер, развертка, статическое напряжение, статическое перемещение, CAD-модель.

Lyashuk O. L., Hevko I. B., Levkovych M. G., Vovk Y. Y., Stashkiv M. Ya., Kapsky D. V.
INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A TRUCK SEMI-TRAILER BODY BOTTOM

The article contains new high-performance truck designs best suited for the transportation of certain goods types and for specific operating conditions. The article is devoted to the improvement of the designing technology of load-bearing structures of truck bodies. A review and analysis of the current state of the theory of mathematical programming and optimal design have been carried out. A numerical procedure for optimizing the load-bearing structures of truck bodies has been proposed.

The influence of the truck body bottom elements geometric parameters on its stress-strain state (SSS) has been investigated with the general application of computer modeling methods. The research was carried out by the module Simulation engineering analysis tools of the specialized software SolidWorks on the developed CAD - model of the truck semi - trailer body. The analysis of a change of the stress-strain state parameters at a change of body bottom elements geometrical parameters has been conducted. The nature of static stress and displacement change depending on a change of channel cross section proportions at the fixed geometrical sizes and thickness of a blank and material of a body bottom has been investigated. On the basis of the research results, the graphical dependences of the static stress change, displacement and safety factor (FOS) on the shelf width and channel thickness, as well as the dependence of static stresses in the channel on the channel wall thickness and body bottom sheet thickness are being constructed. An equation that describes the nature of the static stress change in the channels of the body semi-trailer bottom has been obtained. The results of research on improving the design of the truck body provide the basis for engineering solutions to improve the design of the semi-trailer body bottom, which allows to maximize load capacity and improve strength, reduce weight and extend service life, and maintain the technical resource.

Keywords: semi - trailer body bottom, channel, scan, static stress, static displacement, CAD model.

© Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Левкович М. Г., Вовк Ю. Я., Шашків М. Я., Капський Д. В.

Статтю прийнято
 до редакції 09.04.21

ЗМІСТ

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

- Білій В. А., Голіков В. А.** 6
 АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ТА КОМФОРТНІСТЮ
 ПОВІТРЯ СУДНОВИХ ПРИМІЩЕНЬ
- Годованюк С. П., Селіванов С. Є.* 19
 ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ
 ПОШУКУ І РЯТУВАННЯ НА МОРІ ПОЗАШТАТНИХ СИТУАЦІЯХ
- Zinchenko S. M., Nosov P. S., Popovych I. S.** 29
 CONTROL REDUNDANCY AS A QUANTITATIVE MEASURE OF
 MANEUVERABILITY
- Мальцев А. С.** 38
 НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ГАРАНТИРОВАННОГО
 БЕЗОПАСНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНЕВРИРОВАНИЕМ
 СУДОВ БЕЗ ЭКИПАЖА
- Nosov P. S., Zinchenko S. M., Prokorchuk Yu. A., Popovych I. S.,
 Litovchenko V. I.** 57
 INFLUENCE HUMAN FACTOR ON SAFETY'S PLANNING ROUTE OF
 WATER TRANSPORT

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

- Безбах О. М.** 72
 ВИКОРИСТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ПОЛІМЕРКОМПОЗИТНИХ
 ПОКРИТТІВ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ
 ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СУДНОВОДІННЯ
- Житник Д. В., Гусєв В. М., Букетов А. В., Кулініч В. Г.,
 Яцюк В. М.** 82
 ВПЛИВ МАЛЕЙНОВОГО АНГІДРИДУ НА АДГЕЗІЙНІ ТА МЕХАНІЧНІ
 ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНОЇ МАТРИЦІ ДЛЯ ЗАХИСТУ ДЕТАЛЕЙ
 ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ
- Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Левкович М. Г., Вовк Ю. Я.,
 Сташків М. Я., Капський Д. В.** 93
 ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДНА
 КУЗОВА НАПІВПРИЧЕПА ВАНТАЖНОГО АВТОМОБІЛЯ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Наговський Д. А., Дощенко Г. Г.** 106
УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ЗМАЩЕННЯ ГОЛОВНОГО
ДВИГУНА СУДНА

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- Сапронов О. О., Соценко В. В., Сапронова А. В., Воробйов П. О.,
Яцюк В. М.** 118
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВМІСТУ МОДИФІКАТОРА
2-БЕНЗОФУРАН-1,3-ДИОН НА АДГЕЗІЙНІ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТИВ

- Сидорчук О. М.** 129
ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ
З УРАХУВАННЯМ ПИТОМОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ
ЛИТОЇ ШТАМПОВОЇ СТАЛІ 4Х4Н5М4Ф2

- ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ** 136

CONTENTS

SEA AND RIVER TRANSPORT

- Bily V. A., Golikov V. A.** 6
AUTOMATIC CONTROL OF INDOOR AIR QUALITY AND COMFORT OF SHIP PREMISES
- Godovanyuk S. P., Selivanov S. E.** 19
APPROACHES TO ENSURING STABLE CONTROL OF THE SEARCH AND RESCUE SYSTEM AT SEA IN NON-STANDARD SITUATIONS
- Zinchenko S. M., Nosov P. S., Popovych I. S.** 29
CONTROL REDUNDANCY AS A QUANTITATIVE MEASURE OF MANEUVERABILITY
- Maltsev A. S.** 38
NAVIGATION SYSTEM FOR GUARANTEED SAFE MANEUVERING CONTROL OF SHIPS WITHOUT A CREW
- Nosov P. S., Zinchenko S. M., Prokopchuk Yu. A., Popovych I. S., Litovchenko V. I.** 57
INFLUENCE HUMAN FACTOR ON SAFETY'S PLANNING ROUTE OF WATER TRANSPORT

ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

- Bezbakh O. M.** 72
THE USE OF INNOVATIVE POLYMER COMPOSITE COATINGS TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF TECHNICAL MEANS OF NAVIGATION
- Zhitnik D. V., Gusev V. N., Buketov A. V., Kulinich V. G., Yatsyuk V. N.** 82
INFLUENCE OF MALEIC ANHYDRIDE ON ADHESION AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY MATRIX FOR PROTECTION OF VEHICLE PARTS
- Lyashuk O. L., Hevko I. B., Levkovych M. G., Vovk Y. Y., Stashkiv M. Ya., Kapsky D. V.** 93
INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE BOTTOM OF THE BODY OF A TRUCK SEMI-TRAILER

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

- Nagovsky D. A., Doshchenko G. G.** 106
IMPROVEMENT OF ALGORITHM OF GREASING OF THE MAIN ENGINE OF THE VESSEL

MATERIALS SCIENCE

Sapronov O. O., Sotsenko V. V., Sapronova A. V., Vorobiov P. O., Yatsyuk V. M.	118
INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MODIFIER 2-BENZOFURAN-1,3- DIONE ON ADHESION AND PHYSICAL/MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES	
Sydorchuk O. M.	129
OPTIMIZATION OF HEAT TREATMENT MODES TAKING INTO ACCOUNT THE SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF CAST DIE STEEL 4KH4N5M4F2	
APPLICATION REQUIREMENTS	136

Науковий журнал

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

№ 1 (24), 2021

Відповідальний за випуск *Р. Є. Врублевський*
Технічний редактор *О. Ю. Клементьєва*
Комп'ютерна верстка *О. В. Філіпова*
Коректор *Н. М. Грем*
Коректура англійської мови *А. С. Волкова*
Друк, фальцювальню-палітурні роботи *В. Г. Удов*

Підписано до друку 07.09.2021. Формат 84×108/32.
Папір офсетний.
Ум. др. арк. 9,00. Наклад 100 прим.

Видавець і виготовлювач ХДМА
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 4319 від 10.05.2012
73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20