

ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЯКУЩЕНКО СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК 629.1

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ МОДИФІКОВАНИХ ЕПОКСИ-
ПОЛЕФІРНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ
ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

275 Транспортні технології

27 Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ С.В. Якущенко

Науковий керівник

Браїло Микола Володимирович,
кандидат технічних наук, доцент

Херсон – 2020

АНОТАЦІЯ

Якущенко С.В. Закономірності формування модифікованих епоксиполіефірних композитів для підвищення зносостійкості деталей транспортних засобів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 Транспортні технології. – Херсонська державна морська академія, Міністерство освіти і науки України, Херсон, 2020.

Науковий інтерес розроблення і дослідження епоксиполіефірних композитів модифікованих ультрафіолетом з введенням дрібнодисперсних та дисперсних добавок різної фізико-хімічної природи обумовлений актуальністю їх застосування. Зокрема, для підвищення ресурсу роботи деталей та механізмів засобів транспорту, що дозволяє знизити затрати на їх виготовлення та ремонт. Додатково дозволяє, зменшити витрати на подолання сил тертя і, як наслідок, підвищення надійності та технічних характеристик. При цьому, поглиблене вивчення особливостей структури композитних матеріалів, із використанням сучасних методів дослідження, дозволить виявити процеси у області механічної взаємодії тіл пари тертя, що у свою чергу дозволить прогнозовано керувати властивостями при розробленні полімерних КМ з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Метою дисертаційної роботи є встановлення основних закономірностей формування модифікованих епоксиполіефірних композитів для підвищення зносостійкості деталей транспортних засобів та видати рекомендації щодо створення на їх основі матеріалів з підвищеними трибологічними властивостями, які працюють в умовах впливу агресивних середовищ.

У вступі представлена оцінка сучасного стану проблеми, обґрунтовано актуальність вибору теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та завдання досліджень, представлені наукова новизна й практичне значення отриманих результатів.

В першому розділі проведений аналіз сучасного стану питання використання полімерних епоксидних та поліефірних матеріалів для

виготовлення та ремонту вузлів тертя засобів транспорту. Розглянуто основні напрямки підвищення експлуатаційних характеристик деталей вузлів тертя, виготовлених на основі композитних матеріалів шляхом введення активних дисперсних наповнювачів та модифікаторів, що дозволяє впливати на структуру композитів та змінювати їх експлуатаційні характеристики.

У другому розділі обґрунтовано вибір компонентів зв'язувача, модифікатора, наповнювачів для формування композитних матеріалів з підвищеними трибологічними властивостями. Наведені загальноприйняті методи дослідження: адгезійних, фізико-механічних (руйнівні напруження при згинанні, модуль пружності при згинанні, ударна в'язкість, залишкові напруження, адгезійна міцність при відриві), теплофізичних (термічний коефіцієнт лінійного розширення, теплостійкість, температура склування), трибологічних (коефіцієнт тертя, масова інтенсивність зносу) властивостей. Додатково представлено сучасні методики дослідження структури композитних матеріалів та наповнювачів (ІЧ-спектральний аналіз, дослідження питомої площі поверхні, оптична та скануюча електронна мікроскопія). Методами математичного планування оптимізували склад двокомпонентного бідисперсного наповнювача для композитів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Третій розділ присвячений питанням оптимізації вмісту поліефірного компоненту в епоксидному зв'язувачі та модифікатора метилендіфенілдіізоціанат для поліпшення адгезійних та когезійних властивостей. За результатами адгезійних, фізико-механічних та теплофізичних досліджень композитних матеріалів встановлено, що оптимальний вміст поліефірної смоли становить $q = 80$ мас.ч. на $q = 100$ мас.ч. епоксидного олігомеру. Розроблений матеріал відзначається наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 47,0$ МПа, залишкові напруження – $\sigma_z = 2,7$ МПа. Визначено, що при введенні $q = 10$ мас.ч. поліефірного зв'язувача ENYDYNE H 68372 TAE до $q = 100$ мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 показники фізико-механічних властивостей

максимальні. Показано, що напружений стан матеріалів та характер ліній сколювання корелює із показниками фізико-механічних властивостей. Доведено, що введення поліефірної смоли в епоксидний зв'язувач при $q = 10$ мас.ч. приводить до підвищення теплостійкості матриці від $T = 341$ К до $T = 352$ К та зниження лінійної усадки композиту від $\Delta l = 0,31$ % до $\Delta l = 0,06$ %. Значення показників термічного коефіцієнту лінійного розширення на всіх досліджуваних температурних діапазонах знижуються порівняно з показниками ТКЛР епоксидної матриці, а температура склування T_c при цьому підвищується від $T_c = 311$ К до $T_c = 318$ К, що зумовлено збільшенням ступеня зшивання матриці.

У четвертому розділі проведено комплексні дослідження впливу ультрафіолетового опромінення на властивості епокси-поліефірних композитів. Констатовано, що максимальними показниками досліджуваних властивостей характеризується композит за тривалості опромінення $\tau_0 = 5$ хв та довжини хвилі опромінення 365 нм. Визначено показники фізико-механічних властивостей: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{32} = 57,0$ МПа, модуль пружності – $E = 3,7$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 8,9$ кДж/м², а теплостійкість за такого режиму опромінення становить $T = 354$ К. Розглянуто особливості активності та морфології поверхні наповнювачів. Визначено питому площу поверхні наповнювачів. Проведено ІЧ-спектральний аналіз слюди, h-BN, CuO, WS₂, який дозволив оцінити активність поверхні досліджуваних матеріалів. В діапазоні $\nu = 400 \dots 4000$ см⁻¹ визначено спектральні характеристики для кожного з порошків. Всі досліджувані спектри порошків характеризуються значною інтенсивністю смуг поглинання поверхнево-активних O–H, C=O, C–H, -CH₂-, NH₂ груп. Результати дослідження питомої площі поверхні та ІЧ-спектрального аналізу порошкоподібних матеріалів дозволяють стверджувати про ефективність використання даних порошків у вигляді антифрикційних наповнювачів для епокси-поліефірних композитів.

За результатами дослідження фізико-механічних та теплофізичних властивостей встановлено оптимальні співвідношення порошкоподібних наповнювачів: $q = 30$ мас.ч. (слюда), $q = 60$ мас.ч. (CuO), $q = 60$ мас.ч. (h-BN) та $q = 5$ мас.ч. (WS₂) відповідно. Склад бідисперсного двокомпонентного наповнювача у епокси-поліефірному зв'язувачі для формування композитних матеріалів оптимізовано за допомогою математичного планування з використанням ортогонального центрального композиційного планування експерименту.

У п'ятому розділі представлено результати дослідження трибологічних характеристик композитів та стійкості до ударних навантажень при експлуатації у різних агресивних середовищах. Експериментально встановлено, що при сухому терті показник температури дослідного зразка у області механічної взаємодії поверхонь суттєво зростає із збільшенням шляху тертя до $T_k = 366...369$ К. Коефіцієнт тертя при цьому становить $f = 0,33...0,35$. Доведено, що композитний матеріал, який випробовували у середовищі морської води відрізняється стабільною температурою у області тертя – $T_k = 295...298$ К. Коефіцієнт тертя за такого випробування становить $f = 0,08...0,09$, що є у 3...4 рази нижчим порівняно з КМ, який випробовували при сухому терті. Крім того, встановлено, що шлях притирання за різних умов експлуатації не відрізняється і становить $L = 5500...6000$ м. Проаналізовано, що при випробуванні в мастильному середовищі композитний матеріал характеризується низькими показниками інтенсивності зносу та коефіцієнту тертя – $I_m = 0,25...0,30$ мг/км, $f = 0,03...0,04$. Температура в області контакту при терті в мастильному матеріалі залишається стабільною і становить $T_k = 293...295$ К. Методом скануючої електронної мікроскопії проведено аналіз мікроструктури поверхні тертя зразків та встановлено елементний склад поверхонь КМ за допомогою рентгенівського мікроаналізу. Виявлено, що наповнювач Купрум (II) оксид розташований в приповерхневому шарі, і не вступає в процес тертя на початковому етапі припрацювання матеріалу. Підтверджено, що система є гетерогенною, дисперсні наповнювачі рівномірно

розподілені у об'ємі матриці. Наявні процеси руйнування і виділення матеріалу з поверхні КМ не розміщені безпосередньо навколо дисперсних часток, що вказує на міцне зчеплення часток з макромолекулами матриці згідно з молекулярною теорією адгезії. Доведено, що кожна з досліджуваних поверхонь тертя формується внаслідок окремої контактної взаємодії мікроставів робочої пари, що підтверджено зміною співвідношення атомів на поверхні до і після випробування, та наявністю часток Fe (0,71 %). Експериментально встановлено, що витримування зразків упродовж 30 діб в агресивних середовищах: масляне середовище, морська вода, річкова вода, бензин та лужне середовище (NaOH (50%)) суттєво не впливає на здатність полімерного матеріалу чинити опір ударним навантаженням. Знайдено час зростання макротріщини до ініціювання її росту – для зразка, який витримували на повітрі $\tau = 0,16$ мс. Значення максимального навантаження, яке призводить до руйнування зразка отримали на рівні $P_{\max} = 2,47$ кН. Критична деформація зразка при визначеному навантаженні – $l_d = 0,92$ мм. Визначено, що композитний матеріал за вмісту $q = 60$ мас.ч. гексагонального нітриду бору та $q = 20$ мас.ч. слюди характеризується зниженням адсорбції середовища на поверхні матеріалу: зразок, який витримували на повітрі – $\Delta m = 0,12$ %, в масляному середовищі – $\Delta m = 0,09$ %, середовищі морської води – $\Delta m = 0,20$ %, річкової води – $\Delta m = 0,23$ %, бензину – $\Delta m = 0,11$ %, NaOH (50%) – $\Delta m = 0,07$ %. На основі експериментальних досліджень адгезійних, фізико-механічних, теплофізичних властивостей, зносостійкості та статистичної обробки результатів дослідження розроблено 2 варіанти композитних матеріалів та захисних покриттів на їх основі для практичного впровадження.

Розроблені епоксидно-поліефірні композитні матеріали та покриття на їх основі, технологія їх формування і нанесення впроваджено на підприємствах суднобудівної і автомобілебудівної промисловості, а саме: впроваджено результати роботи в ТОВ «Шипярд1930» (м. Херсон, Україна), «Lakiernictwo Samochodowe» (м. Гнезно, Польща). Також результати дослідження

впроваджено у навчальному процесі при підготовці аспірантів Херсонської державної морської академії.

Ключові слова: епоксидно-поліестерний композит, метилендіфенілдіізоціанат, ультрафіолетове опромінення, трибологічні властивості, зносостійкість, агресивне середовище, скануюча електронна мікроскопія, рентгенівський мікроаналіз.

ABSTRACT

Yakushchenko S.V. Regularities of formation of modified epoxy-polyester composites to increase the wear resistance of vehicle parts. – Manuscript of qualifying scientific work.

Dissertation in support of candidature for a doctor of philosophy in specialty 275 Transport technologies. – Kherson State Maritime Academy of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kherson, 2020.

The scientific interest in the development and research of epoxy-polyester composites modified by ultraviolet light with the introduction of finely and dispersed additives of different physicochemical nature is due to the relevance of their implementation. In particular, for increasing of the service life of parts and mechanisms of vehicles, which allows to reduce the cost of their manufacture and repair. Additionally, it allows you to reduce the cost of overcoming friction forces and, as a consequence, to increase reliability and technical characteristics. At the same time, in-depth study of the composite materials structure using modern research methods will reveal processes in the area of mechanical interaction of surfaces, which in turn will allow to control the properties during the development of polymeric CMs with high operational characteristic.

The purpose of the dissertation is to establish the basic regularities of formation of modified epoxy-polyester composites to increase the wear resistance of vehicle parts and to issue recommendations for their creation of materials with high tribological properties that work under aggressive environments.

The introduction presents an assessment of the current state of the problem,

substantiates the relevance of the choice of the topic of the dissertation, formulates the purpose and objectives of research, presents the scientific novelty and practical significance of the results.

In the first section was analyzed the current state of the use of polymeric epoxy and polyester materials for the manufacture and repair of friction units of vehicles. The main directions of improving the performance of parts of friction units made on the basis of composite materials by introduce active disperse fillers and modifiers, which allows to influence the structure of composites and change their operational characteristics were considered.

In the second section was substantiated the choice of binder components, modifier, fillers for the formation of composite materials with high tribological properties. The generally accepted research methods are given: adhesive, physical and mechanical (flexural stresses, elasticity modulus, impact strength, residual stresses, adhesive strength at separation), thermophysical (thermal coefficient of linear expansion, heat resistance, glass transition temperature) tribological (friction coefficient, wear rate) properties. Additionally, modern methods of studying the structure of composite materials and fillers (IR spectral analysis, study of specific surface area, optical and scanning electron microscopy) are presented. The composition of the two-component bidispersed filler for composites with high operational characteristics was optimized by mathematical planning methods.

The third section is devoted to the optimization of the content of the polyester component and the methylene diphenyl diisocyanate modifier in the epoxy binder to improve the adhesion and cohesion properties. According to the results of adhesive, physical and mechanical and thermophysical studies of composite materials, it was found that the optimal content of polyester resin is $q = 80$ wt.% per $q = 100$ wt.% of epoxy oligomer. The developed material is characterized by the following properties: adhesive strength at separation – $\sigma_a = 47.0$ MPa, residual stresses – $\sigma_r = 2.7$ MPa. It is determined that at introduction of $q = 10$ wt.% of polyester binder ENYDYNE H 68372 TAE up to $q = 100$ wt.% of epoxy oligomer ED-20 values of physical and mechanical properties are maximum. It is shown that the stress state of

materials and the nature of chipping lines correlate with the indicators of physical and mechanical properties. It is proved that the introduction of polyester resin into the epoxy binder at $q = 10$ wt.% leads to an increase in the heat resistance of the matrix from $T = 341$ K to $T = 352$ K and a decrease in the linear shrinkage of the composite from $\Delta l = 0.31\%$ to $\Delta l = 0.06\%$. The values of the coefficients of thermal coefficient of linear expansion in all studied temperature ranges decrease compared to the TCLE of the epoxy matrix, and the glass transition temperature T_c increases from $T_c = 311$ K to $T_c = 318$ K, due to increase of the degree of crosslinking of the matrix. In the fourth section, a comprehensive study of the effect of ultraviolet radiation on the properties of epoxy-polyester composites. It is stated that the composite is characterized by the maximum values of the studied properties at the irradiation duration $\tau_0 = 5$ min and the irradiation wavelength of 365 nm. Values of physical and mechanical properties were determined: flexural stresses – $\sigma_{fl} = 57.0$ MPa, elasticity modulus – $E = 3.7$ GPa, impact strength – $W = 8.9$ kJ/m², and heat resistance under this mode of irradiation is $T = 354$ K. The features of activity and morphology of the surface of the fillers are considered. The specific surface area of fillers is determined. IR spectral analysis of mica, h-BN, CuO, WS₂ was performed, which allowed to evaluate the surface activity of the studied materials. In the range of $\nu = 400 \dots 4000$ cm⁻¹, the spectral characteristics for each of the powders were determined. All investigated spectra of powders are characterized by a significant intensity of the absorption bands of surface-active OH, C=O, C–H, –CH₂–, NH₂ groups. The results of the study of the specific surface area and IR spectral analysis of powdered materials suggest the effectiveness of the use of these powders in the form of antifriction fillers for epoxy-polyester composites.

According to the results of the study of physical and mechanical and thermophysical properties, the optimal ratios of powdered fillers were established: $q = 30$ wt.% (mica), $q = 60$ wt.% (CuO), $q = 60$ wt.% (h-BN) and $q = 5$ wt.% (WS₂) respectively. The composition of the bidispersed two-component filler in the epoxy-polyester binder for the formation of composite materials is optimized by mathematical planning using orthogonal central compositional planning of the

experiment.

In the fifth section presents the results of the study of tribological characteristics of composites and resistance to shock loads during operation in various aggressive environments. It has been experimentally determined that the contact temperature index of the specimen in the area of mechanical interaction of surfaces increases significantly with an increase of the sliding distance to $T = 366...369$ K during dry friction. The coefficient of friction in this case is $f = 0.33...0.35$. It is proved that that CM differs in improved tribological characteristics, which was tested in a seawater environment. The contact temperature in the friction area is stable and is $T_k = 295...298$ K. At the same time, the coefficient of friction is $f = 0.08...0.09$, which is 3 to 4 times lower in comparison to CM, which was tested at dry friction. In addition, it was found that the way of friction in different conditions is not significantly different and is $L = 5500...6000$ m. It was analyzed that when tested in a lubricating medium, the composite material is characterized by low wear rate and friction coefficient – $I_m = 0.25...0.30$ mg/km, $f = 0.03...0.04$. The temperature in the area of contact during friction in the lubricant was stable and was $T_k = 293...295$ K. The microstructure of the friction surface of the specimens was investigated by scanning electron microscopy analysis and the elemental composition of the CM surfaces was determined using X-ray microanalysis. It was found that the copper (II) oxide filler is located in the near-surface layer, and does not enter the process of friction at the initial stage of running-in of the material. It is confirmed that the system is heterogeneous, the disperse fillers are evenly distributed in the volume of the matrix. The existing processes of destruction and releasing of the material from the CM surface are not occur directly around the dispersed particles, which indicates a strong adhesion of the particles with the macromolecules of the matrix according to the molecular theory of adhesion. It is determined, that each of the investigated friction surfaces is formed due to the separate contact interaction of the microirregularities of the working pair, which is confirmed by a change in the ratio of atoms on the surface before and after the test, and with the presence of iron particles (0.71 %). It has been experimentally established that

holding the specimens for 30 days in aggressive environments: oil, sea water, river water, gasoline and alkaline environment (NaOH (50%)) does not significantly affect the ability of the polymer material to resist impact loads. The time of initiation of macrocrack growth for the specimen which was kept in the air was found – $\tau = 0.16 \mu\text{s}$. The value of maximum load that leads to the destruction of the specimen was $P_{\text{max}} = 2.47 \text{ kN}$. The critical deformation at this load was $l = 0.92 \text{ mm}$. It was determined that the composite material at the content $q = 60 \text{ pts.wt.}$ of hexagonal boron nitride and $q = 20 \text{ pts.wt.}$ of mica is characterized by a decrease in the adsorption of the environment on the surface of the material: a specimen, which was kept in the air – $\Delta m = 0.12\%$, in an oil environment – $\Delta m = 0.09\%$, seawater – $\Delta m = 0.20\%$, river water – $\Delta m = 0.23\%$, gasoline – $\Delta m = 0.11\%$, NaOH (50%) – $\Delta m = 0.07\%$. On the basis of experimental studies of adhesive, physical and mechanical, thermophysical properties, wear resistance and statistical processing of results of research 2 variants of composite materials and protective coatings on their basis for practical implementation are developed.

Developed epoxy-polyester composite materials and coatings based on them, the technology of their formation and application is implemented in the shipbuilding and automotive industries, namely: implemented the results of LLC «Shipyards1930» (Kherson, Ukraine), «Lakiernictwo Samochodowe» (Gniezno, Poland). Also, the results of the study were implemented in the educational process in the preparation of graduate students of the Kherson State Maritime Academy.

Key words: epoxy-polyester composite, methylene diphenyl diisocyanate, ultraviolet irradiation, tribological properties, wear resistance, aggressive environment, scanning electron microscopy, X-ray microanalysis.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Браїло, М.В., **Якущенко, С.В.**, Фесенко, І.П.: Оптимізація вмісту ініціатора у полієфірній матриці за її фізико-механічними властивостями. Наукові нотатки. **57**, 32–36 (2017). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Google Scholar.* (Внесок дисертанта: формування матеріалів для дослідження фізико-механічних властивостей).
2. Браїло, М.В., Букетов, А.В., **Якущенко, С.В.**, Dulebova, L.: Застосування методу планування експерименту при формуванні полімерного композиту з поліпшеними експлуатаційними характеристиками для його використання у засобах транспорту. Наукові нотатки. **60**, 58–68 (2017). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Google Scholar.* (Внесок дисертанта: участь у проведенні математичного планування експериментальних досліджень та аналіз отриманих результатів).
3. Ходаковський, О.В., Амелін, М.Ю., Гусєв, В.М., **Якущенко, С.В.**, Браїло, М.В.: Захисні покриття з двокомпонентною добавкою для транспортної техніки. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. **2** (17), 218–229 (2017). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Google Scholar.* (Внесок дисертанта: участь у проведенні математичного планування експериментальних досліджень).
4. Браїло, М.В., Букетов, А.В., **Якущенко, С.В.**, Яцюк, М.В.: Дослідження теплофізичних властивостей епокси-полієфірних композитів, модифікованих метилендіфенілдіізоціанатом. Наукові нотатки. **63**, 27–33 (2018). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Google Scholar.* (Внесок дисертанта: аналіз результатів дослідження і обґрунтування механізму впливу модифікатора на теплофізичні властивості матеріалів).
5. **Якущенко, С.В.**, Гусєв, В.М., Стухляк, Д.П.: Дослідження адгезійної міцності і залишкових напружень епоксидних нанокompозитів. Вісник ХНТУ. **3** (66), 326–331 (2018). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Google Scholar.* (Внесок дисертанта: формування матеріалів для експериментальних досліджень адгезійних властивостей та залишкових напружень).

6. Stukhlyak, D.P., **Yakushchenko, S.V.**: Influence of nanoparticles on the physical and mechanical properties of modified epoxy-composite coatings. J. Hydrocarb. Power Eng. **5**, 14–21 (2018). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Google Scholar.* (Внесок дисертанта: участь у проведенні експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей).
7. Brailo, M.V., Buketov, A.V., Kobelnyk, O.S., **Yakushchenko, S.V.**, Saprionova, A.V., Saprionov, O.O., Vasilenko, A.O.: Оптимізація вмісту добавок у епокси-поліефірному зв'язувачі для підвищення когезійної міцності композитів. Sci. Bull. UNFU. **28**, 71–77 (2018). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Google Scholar. (doi:10.15421/40281114)* (Внесок дисертанта: формування матеріалів для експериментальних досліджень когезійних властивостей).
8. Браїло, М.В., Стухляк, Д.П., Кобельник, О.С., **Якущенко, С.В.**, Рачинський, В.В.: Теплофізичні властивості епоксидних композитів, наповнених сумішами нанодисперсних сполук. Вісник ХНТУ. **1** (68), 11–18 (2018). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Google Scholar.* (Внесок дисертанта: обґрунтування результатів дослідження).
9. Букетов, А.В., Браїло, М.В., Кобельник, О.С., **Якущенко, С.В.**, Сапронова, А.В.: Розроблення епокси-поліефірної матриці з поліпшеними фізико-механічними властивостями для відновлення засобів транспорту. Наукові нотатки. **66**, 30–36 (2019). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Google Scholar.* (Внесок дисертанта: обробка результатів експерименту).

Статті у наукових фахових виданнях України,

які входять до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Saprionov, O.O., Buketov, A.V., Marushchak, P.O., Panin, S.V. Brailo, M.V., **Yakushchenko, S.V.**, Saprionova, A.V., Leshchenko, O.V., Menou, A.: Research of crack initiation and propagation under loading for providing impact resilience of protective coating. Funct. Mater. **26**, 114–120 (2019). *Журнал входить у міжнародні наукометричні бази даних Scopus та Web of Science (doi:10.15407/fm26.01.114)* (Внесок дисертанта: аналіз результатів досліджень властивостей композитів).

2. Букетов, А.В., Браїло, М.В., **Якущенко, С.В.**, Яцюк, В.М.: Розроблення епоксиполіефірної матриці з поліпшеними адгезійними та фізико-механічними властивостями зі застосуванням ізоціанатного модифікатора. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 55, 31–36 (2019). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Google Scholar*. (Внесок дисертанта: аналіз результатів дослідження і обґрунтування механізму впливу модифікатора на властивості матеріалів).

Buketov, A. V., Brailo, M. V., **Yakushchenko, S. V.**, Yatsyuk, V.M.: Development of an Epoxy-Polyester Matrix with Improved Adhesive and Physicomechanical Properties with the Use of Isocyanate Modifier. *Mater. Sci.* 55, 168–174 (2019). *Журнал входить у міжнародні наукометричні бази даних Scopus та Web of Science (doi:10.1007/s11003-019-00284-1)* (Внесок дисертанта: проведення експерименту та обговорення одержаних результатів дослідження адгезійних та фізико-механічних властивостей композитів).

Статті у наукових виданнях інших держав,

які входять до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Brailo, M.V., Buketov, A.V., **Yakushchenko, S.V.**, Saponov, O.O., Dulebova, L.: Optimization of contents of two-component polydispersed filler by applying the mathematical design of experiment in forming composites for transport repairing. *Bull. Karaganda Univ. "Mathematics" Ser. 1* (89), 93–104 (2018). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Web of Science (doi:10.31489/2018M1/93-104)* (Внесок дисертанта: проведення математичного планування експерименту та обґрунтування отриманих результатів).
2. Brailo, M., Buketov, A., **Yakushchenko, S.**, Saponov, O., Vynar, V., Kobelnik, O.: The Investigation of Tribological Properties of Epoxy-Polyether Composite Materials for Using in the Friction Units of Means of Sea Transport. *Mater. Perform. Charact.* 7, 275–299 (2018). *Журнал входить у міжнародні наукометричні бази даних Scopus та Web of Science (doi:10.1520/MPC20170161)* (Внесок дисертанта: проведення експерименту та аналіз результатів дослідження трибологічних властивостей матеріалів).

3. Buketov, A., Brailo, M., **Yakushchenko, S.**, Saprionova, A.: Development of Epoxy-Polyester Composite with Improved Thermophysical Properties for Restoration of Details of Sea and River Transport. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2018**, 1–6 (2018). *Журнал входить у міжнародні наукометричні бази даних Scopus та Web of Science (doi:10.1155/2018/6378782)* (Внесок дисертанта: проведення експерименту та аналіз результатів дослідження теплофізичних властивостей).
4. Buketov, A.V., Brailo, M.V., **Yakushchenko, S.V.**, Saprionov, 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. *J. Mar. Eng. Technol.* 1–6 (2018). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Scopus (doi:10.1080/20464177.2018.1530171)* (Внесок дисертанта: проведення експерименту та обговорення одержаних результатів дослідження фізико-механічних властивостей композитів).
5. Buketov, A.V., Saprionov, O.O., Brailo, M.V., Maruschak, P.O., **Yakushchenko, S.V.**, Panin, S.V., Nigalatiy, V.D.: Dynamics of destruction of epoxy composites filled with ultra-dispersed diamond under impact conditions. *Mech. Adv. Mater. Struct.* **27**, 725–733 (2020). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Scopus (doi:10.1080/15376494.2018.1495788)* (Внесок дисертанта: обговорення результатів дослідження ударних навантажень на властивості композитів).
6. Akimov, A.V., Buketov, A.V., Saprionov, A.A., Brailo, M.V., **Yakushchenko, S.V.**, Smetankin, S.A.: Development of polymer composites with improved thermophysical properties for shipbuilding and ship repair. *Compos. Mech. Comput. Appl. An Int. J.* **10**, 117–134 (2019). *Журнал входить у міжнародні наукометричні бази даних Scopus та Web of Science (doi:10.1615/CompMechComputApplIntJ.2018026989)* (Внесок дисертанта: математична обробка результатів експерименту).
7. Buketov, A.V., Brailo, M.V., Stukhlyak, D.P., **Yakushchenko, S.V.**, Cherniavskiy, V.V., Husiev, V.M., Dmitriev, D.A., Yatsyuk, V.M., Bezbakh, O.M., Negrutza, R.Y.: Optimization of components in development of polymeric coatings for restoration of transport vehicles. *Bull. Karaganda Univ. “Mathematics” Ser.* **4** (92), 119–131 (2018). *Журнал входить у міжнародну*

наукометричну базу даних Web of Science (doi:10.31489/2018M4/119-131) (Внесок дисертанта: проведення математичного планування експерименту та обґрунтування отриманих результатів).

8. Buketov, A., Brailo, M., **Yakushchenko, S.**, Sapronov, O., Vynar, V., Bezbakh, O., Negrutsa, R.: Investigation of Tribological Properties of Two-Component Bidisperse Epoxy-Polyester Composite Materials for Its Use in the Friction Units of Means of Sea Transport. *Period. Polytech. Mech. Eng.* **63**, 171–182 (2019). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Scopus (doi:10.3311/PPme.13161)* (Внесок дисертанта: дослідження трибологічних властивостей епокси-поліефірних композитів).
9. Buketov, A., Sapronov, O., Brailo, M., Stukhlyak, D., **Yakushchenko, S.**, Buketova, N., Sapronova, A., Sotsenko, V.: The Use of Complex Additives for the Formation of Corrosion- and Wear-Resistant Epoxy Composites. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2019**, 1–5 (2019). *Журнал входить у міжнародні наукометричні бази даних Scopus та Web of Science (doi:10.1155/2019/8183761)* (Внесок дисертанта: обговорення отриманих результатів).
10. Brailo, M.V., Bezbakh, O.M., Husiev, V.M., **Yakushchenko, S.V.**: Modified epoxy matrix with improved properties for protection of transport vehicles. *Bull. Karaganda Univ. “Mathematics” Ser. 3* (95), 88–100 (2019). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу даних Web of Science (doi:10.31489/2019M2/88-100)* (Внесок дисертанта: проведення математичного планування експерименту та обговорення отриманих результатів).
11. 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 Int. J. Mater. Manuf.* **13**, 05-13-01–0006 (2020). doi:10.4271/05-13-01-0006 (Внесок дисертанта: обговорення отриманих результатів)

Патенти

1. Корозійнотривке епоксидне покриття: пат. 127445 Україна: МПК (2018.01) C08L 63/00, C09D 163/00. № u201803745; заявл. 06.04.18; опубл. 25.07.18, Бюл. № 14. (Внесок дисертанта: обговорення результатів експерименту).
2. Епоксидне зв'язуюче з поліпшеними адгезійними властивостями: пат. 128447 Україна: МПК (2018.01) C08L 63/00. № a201700480; заявл. 18.01.17; опубл. 25.09.18, Бюл. № 18. (Внесок дисертанта: обговорення результатів експерименту).
3. Спосіб отвердіння епоксидної матриці: пат. 128448 Україна: МПК (2018.01) C09D 163/00, C08J 3/28. № a2017 00482; заявл. 18.01.17; опубл. 25.09.18, Бюл. № 18. (Внесок дисертанта: обговорення результатів експерименту).
4. Модифікований епоксидний композит: пат. 128827 Україна: МПК (2018.01) C08L 63/00. № a201803716; заявл. 06.04.18; опубл. 10.10.18, Бюл. № 19. (Внесок дисертанта: обговорення результатів експерименту).
5. Епоксидне зв'язуюче з поліпшеними фізико-механічними властивостями: пат. 128672 Україна: МПК (2018.01) C08L 63/00, C09D 163/00. №a201700099; заявл. 03.01.17; опубл. 10.10.18, Бюл. № 19. (Внесок дисертанта: обговорення результатів експерименту).
6. Епоксидний композит з нанодисперсним наповнювачем: пат. 128830 Україна: МПК (2018.01) C08L 63/00. № u201803754; заявл. 06.04.18; опубл. 10.10.18, Бюл. № 19. (Внесок дисертанта: обговорення результатів експерименту).
7. Епоксидне зв'язуюче на основі епоксидної смоли та отверджувача з поліпшеними адгезійними властивостями: пат. 129018 Україна: МПК (2018.01) C09D 163/00, C08L 63/00. № a201700076; заявл. 03.01.17; опубл. 25.10.18, Бюл. № 20. (Внесок дисертанта: обговорення результатів експерименту).
8. Епоксидне покриття із підвищеною когезійною міцністю: пат. 129620 Україна: МПК (2018.01) C09D 163/00, C08L 63/00. № u201803764; заявл. 06.04.18; опубл. 12.11.18, Бюл. № 21. (Внесок дисертанта: обговорення результатів експерименту).

9. Спосіб визначення модуля поздовжньої пружності зразків матеріалів та готових виробів: пат. 130254 Україна: МПК (2018.01) G01N 3/00, G01N 3/42 (2006.01). № u201807099; заявл. 23.06.18; опубл. 26.11.18, Бюл. № 22. (Внесок дисертанта: обговорення результатів експерименту).
10. Модифіковане епоксидне зв'язуюче з підвищеними адгезійними властивостями: пат. 137913 Україна: МПК (2019.01) C08L 63/00, C09D 5/08 (2006.01). № u201904329; заявл. 22.04.19; опубл. 11.11.19, Бюл. № 21. (Внесок дисертанта: обговорення результатів експерименту).
11. Спосіб отвердіння модифікованого епоксидного зв'язуючого з підвищеними адгезійними властивостями: пат. 137916 Україна: МПК (2019.01) C08L 63/00, C09D 4/00. № u201904332; заявл. 22.04.19; опубл. 11.11.19, Бюл. № 21. (Внесок дисертанта: обговорення результатів експерименту).
12. Модифіковане епоксидне зв'язуюче з поліпшеними теплофізичними властивостями: пат. 137922 Україна: МПК (2019.01) C08L 63/00, C09D 4/00. № u201904344; заявл. 22.04.19; опубл. 11.11.19, Бюл. № 21. (Внесок дисертанта: обговорення результатів експерименту).

Тези наукових доповідей:

1. Браїло, М.В., Кобельник, О.С., **Якущенко, С.В.**, Bencheikh, L., Яцюк, В.М.: Дослідження ударної в'язкості епоксикомпозитних матеріалів. Матеріали 7-ї Міжнародної наук.-практ. конф. «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування». pp. 161–162., Херсон, 22–23 вересня (2016). (Внесок дисертанта: постановка експерименту та аналіз результатів досліджень композитів).
2. Nigalatiy, V., Brailo, M., Kobelnyk, O., **Yakushchenko, S.**: Adhesive strength of modified by benzene-1,3-diamine epoxy matrix. Международная научная конференция «Ukraine – Bulgaria – European Union: contemporary state and perspectives». pp. 37–38. , Varna, 10-16 September (2016). (Внесок дисертанта: обговорення результатів досліджень).

3. Браїло, М.В., Кобельник, О.С., **Якущенко, С.В.**: Створення епоксикомпозитних матеріалів з поліпшеними трибологічними властивостями в умовах впливу агресивного середовища. Міжнародна науково-практична конференція «Розвиток інноваційної діяльності в галузі технічних і фізико-математичних наук». pp. 189–191., Миколаїв, 22-24 вересня (2016). (Внесок дисертанта: обговорення результатів дослідження трибологічних властивостей).
4. Браило, Н.В., Кобельник, О.С., **Якущенко, С.В.**, Мансур, А.-Д.А.А.: Применение метода математического планирования эксперимента для оптимизации состава защитных покрытий с улучшенными механическими свойствами. Материалы междунар. науч. конф. Современные проблемы математики, механики и информатики. pp. 77–78., Караганда, 9-10 декабря (2016). (Внесок дисертанта: математична обробка результатів дослідження).
5. Браїло, М.В., Кобельник, О.С., **Якущенко, С.В.**, Нігалатій, В.Д., Мансур, А.Д.А.А.: Розроблення полімерної матриці з поліпшеними адгезійними властивостями на основі епоксидного та поліефірного зв'язуючого. Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“. pp. 76–76, Тернопіль 17–18 листопада (2016). (Внесок дисертанта: проведення експерименту та аналіз результатів досліджень властивостей).
6. Браїло, М.В., **Якущенко, С.В.**, Сапронов, О.О., Кобельник, О.С.: Створення полімерної матриці для ремонту елементів водного транспорту. Матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф. присвяченої пам'яті заслуженого винахідника України академіка АН вищої школи України, доктора технічних наук, професора Нагорняка Степана Григоровича «Обладнання і технології сучасного машинобудування». p. 42., Тернопіль, 11–12 травня (2017). (Внесок дисертанта: проведення експерименту та обговорення результатів досліджень).
7. Браїло, М.В., **Якущенко, С.В.**, Вухерех, Т.: Дослідження фізико-механічних властивостей поліефірної матриці для застосування при ремонті деталей та механізмів морського транспорту. Матеріали IX-ї Міжнарод. наук.-практ.

- конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2017)». р. 301., Херсон, 23–25 травня (2017). (Внесок дисертанта: аналіз результатів досліджень властивостей композитів).
8. Браїло, М.В., **Якущенко, С.В.**, Кобельник, О.: Розроблення епоксидно-поліефірної матриці для захисту та відновлення елементів транспорту. Міжнародна наук.-практ. конф. «Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство». р. 110., Херсон, 21–22 вересня (2017). (Внесок дисертанта: підготовка зразків та обробка результатів експерименту).
9. Браїло, М.В., Dulebova, L., **Якущенко, С.В.**, Винар, В.А., Кобельник, О.С.: Розроблення епоксидно-поліефірного композитного матеріалу для використання у вузлах тертя засобів транспорту. Міжнародна науково-технічна конференція «Суднова енергетика: стан та проблеми». pp. 164–167., Миколаїв, 8-10 листопада (2017). (Внесок дисертанта: проведення експерименту, аналіз результатів досліджень трибологічних властивостей).
10. Букетов, А.В., Браїло, М.В., **Якущенко, С.В.**: Дослідження впливу агресивних середовищ на ударну в'язкість епокси-поліефірних композитів. Матеріали VI-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Структурна релаксація у твердих тілах». pp. 165–167., Вінниця, 22-24 травня (2018). (Внесок дисертанта: проведення експерименту, аналіз результатів досліджень впливу ударних навантажень на властивості композитів).
11. Букетов, А.В., Браїло, М.В., **Якущенко, С.В.**, Яцюк, В.М., Амелін, М.Ю.: Дослідження адгезійних та фізико-механічних властивостей епокси-поліефірної матриці модифікованої метилендіфенілдіізоціанатом. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті) «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій». р. 31., Тернопіль, 22–24 травня (2018). (Внесок дисертанта: проведення експерименту, аналіз результатів досліджень впливу модифікатора на адгезійні та фізико-механічні властивості).
12. Браїло, М.В., **Якущенко, С.В.**, Кобельник, О.С., Янутенене, Й.: Дослідження теплофізичних властивостей епоксидно-поліефірних

композитів для деталей морського і річкового транспорту. Матеріали X-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018)». р. 275., Херсон, 29–31 травня (2018). (Внесок дисертанта: проведення експерименту, аналіз результатів досліджень теплофізичних властивостей).

13. Браїло, М.В., **Якущенко, С.В.**, Сапронова, А.В., Букетова, Н.М., Соценко, В.В., Кобельник, О.С.: Дослідження впливу матилендіфенілдіізоціанату на теплофізичні властивості епокси-поліефірних композитів. Матеріали IV-ої Міжнародної наук.-практ. конф. «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації». р. 95., Херсон, 12–16 вересня (2018). (Внесок дисертанта: проведення експерименту, аналіз результатів досліджень впливу модифікатора на теплофізичні властивості матеріалів).

14. **Якущенко, С.В.**: Применение метода планирования эксперимента при формировании композитного материала с двухкомпонентным дисперсным наполнителем для транспортных средств. Материалы Международной научной конференции, приуроченной к 70-летию доктора физико-математических наук, профессора Рамазанова Мурата Ибраевича «Теоретические и прикладные вопросы математики, механики и информатики». pp. 199–200., Караганда, 12–13 июня (2019).

15. Браїло, М.В., **Якущенко, С.В.**, Сапронов, О.О., Dulebova, L., Василенко, А.О.: Створення епокси-поліефірної матриці з поліпшеними експлуатаційними характеристиками для відновлення засобів транспорту. III Міжнародна науково-практична конференція «Розвиток інноваційної діяльності в галузі технічних і фізико-математичних наук». pp. 141–143., Миколаїв, 12-14 вересня (2019). (Внесок дисертанта: підготовка зразків та обробка результатів експерименту).

16. Сапронова, А.В., Соценко, В.В., Антонію, Б., Браїло, М.В., **Якущенко, С.В.**: Розроблення епоксидних композитів армованих дискретними волокнами для деталей водного транспорту. In: Міжнародна науково-технічна конференція «Суднова енергетика: стан та проблеми». pp.

306–308., Миколаїв, 7-8 листопада (2019). (Внесок дисертанта: аналіз результатів досліджень та їх обговорення).

17. **Якущенко, С.В.**, Браїло В.В., Василенко А.О.: Дослідження дисперсних наповнювачів для формування полімеркомпозитних матеріалів для використання в засобах транспорту. In: Міжнародна науково-технічна конференція до 60 річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175 річчя з дня народження Івана Пулюя «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій». pp. 46–47., Тернопіль, 14-15 травня (2020). (Внесок дисертанта: проведення експерименту, аналіз результатів досліджень дисперсних наповнювачів).