УДК 667.64:678.026 DOI: 10.18372/0370-2197.3(112).21588

А. В. БУКЕТОВ, В. В. СОЦЕНКО, Л. О. САПРОНОВА, М. О. РИХТЕР, В. С. БАНГА

Херсонська державна морська академія, Херсон

ВПЛИВ МОДИФІКОВАНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ НА ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ КОРПУСІВ ЛІТАЛЬНИХ ТА МОРСЬКИХ БЕЗЕКІПАЖНИХ АПАРАТІВ

У статті досліджено вплив складу та товщини двошарових епоксидних захисних покриттів на їхню екрануючу ефективність у радарному діапазоні частот (8…12 ГГц). Актуальність роботи зумовлена необхідністю зниження радіолокаційної помітності безекіпажних літальних і морських апаратів шляхом створення ефективних радіопоглинальних матеріалів та епоксидних покриттів на їх основі. У вигляді зв'язувача застосовано модифіковану 4,4-сульфонілбіс(4,1-фенілен)біс(N,N-діетилдітіокарбаматом) епоксидну смолу ЕД-20, яку полімеризували поліетиленполіаміном. Розроблено три види двошарових покриттів, які містять адгезійний шар (товщина 80±5 мкм), що наповнений нанодисперсними вуглецевими сполуками (технічний вуглець, фулерено-сажова суміш, конденсований вуглець), та функціональний шар, що наповнений мікрочастками промислових відходів (конвертерний, зварювальний та гранульований шлаки). Товщину функціонального шару варіювали дискретно (150, 300 і 400 мкм). Встановлено, що для покриття 1 (технічний вуглець + конвертерний шлам) і покриття 2 (фулерено-сажова суміш + зварювальний шлак) оптимальною є товщина функціонального шару 300 мкм. Для покриття 3 (конденсований вуглець + гранульований шлак) оптимальною є товщина 400 мкм. Найвищу екрануючу ефективність забезпечує покриття 2: за частоти 10 ГГц SE = 40,1 дБ, що на 4,3 дБ перевищує даний показник для покриття 1 та на 3,9 дБ – для покриття 3. Виявлено найвищий показник SE = 35,8 дБ для покриття 1 з товщиною функціонального шару 300 мкм, а для покриття 3 – SE = 36,2 дБ при товщині 400 мкм. Доведено, що усі досліджені покриття перевищують інженерний критерій ефективного екранування (SE>30 дБ), що підтверджує їхню практичну придатність для захисту безекіпажних апаратів від радіолокаційного виявлення. Результати роботи обґрунтовують доцільність використання промислових відходів у вигляді функціональних наповнювачів для екрануючих покриттів, що забезпечує їх економічну доцільність й екологічну безпеку. Отримані результати створюють наукову основу для подальшого проєктування багатошарових радіопоглинальних матеріалів з контрольованими і наперед заданими властивостями для потреб військово-промислового комплексу та цивільної авіації.

Ключові слова: *епоксидний композит, покриття, нанонаповнювач, мікронаповнювач, електромагнітне випромінювання, екрануюча ефективність, безекіпажні апарати.*

Вступ.

Полімерні композитні матеріали (КМ) на основі епоксидних смол займають одне з провідних місць у сучасному світі завдяки унікальному і практичному поєднанню підвищених фізико-механічних, адгезійних, теплофізичних властивостей і експлуатаційних характеристик в цілому. Епоксикомпозитні покриття широко застосовують в машино-, суднобудуванні й авіаційній промисловості, а також у електротехніці та в оборонному комплексі. Основне

призначення – захист виробів від корозійних, механічних пошкоджень і впливу агресивних середовищ [1-7]. Особливе значення епоксидні композити мають при формуванні захисних покриттів для військової техніки, зокрема при зниженні радіолокаційної помітності безекіпажних літальних і морських апаратів. Це є важливим для збільшення їх бойової стійкості й скритності.

Водночас сучасні тенденції розвитку полімерного матеріалознавства спрямовані на розроблення багатофункціональних композитів, здатних одночасно забезпечувати збільшення механічної міцності, корозійної стійкості та інших необхідних властивостей, таких як екранування електромагнітного випромінювання. Для покращення означених вище властивостей епоксидні зв'язувачі модифікують добавками різної фізичної природи. Серед них особливе значення мають нанодисперсні вуглецеві матеріали – технічний вуглець, фулереновмісні суміші, детонаційний конденсований вуглець. Уведення нанодобавок забезпечує формування в об'ємі полімеру провідної гратки, яка забезпечує поглинання або відбиття електромагнітних хвиль у широкому діапазоні частот.

Крім того, використання промислових відходів, таких як конвертерний, зварювальний або гранульований шлаки, у вигляді мікродисперсних наповнювачів є на сьогодні економічно доцільним та екологічно вигідним рішенням [8-10]. Це дозволяє знизити вартість адгезивів без суттєвої втрати їх функціональних властивостей.

Перспективним підходом при створенні високоефективних екрануючих матеріалів є формування двошарових епоксидних покриттів. У такому випадку адгезійний шар забезпечує надійне зчеплення з основою та містить у епоксидному зв'язувачі нанодисперсні добавки. Функціональний шар у епоксиматриці містить мікрочастки промислових відходів. Основна його функція – екранування електромагнітного випромінювання. Така архітектура дворівневого покриття дозволяє оптимізувати властивості кожного шару, досягаючи високих показників екрануючої ефективності при збереженні достатньо високих показників адгезійно-когезійної міцності матеріалу.

Водночас окрему увагу слід приділити модифікації епоксидного зв'язувача сполуками, які здатні до активації міжфазової взаємодії. У цьому контексті слід відмітити перспективність застосування як добавки 4,4-сульфонілбіс(4,1-фенілен)біс(N,N-діетилдітіокарбамату), який містить дитіокарбаматні групи з подвійними зв'язками атомів сірки. Це додатково сприяє утворенню стабільної структури композитів при їх зшиванні.

Постановка проблеми та аналіз останніх публікацій.

Проблема зменшення радіолокаційної помітності безекіпажних літальних і морських апаратів (БЛМА) є однією з ключових у сучасній оборонній промисловості. Виявлення об'єктів радіолокаційними станціями супротивника суттєво знижує бойову ефективність БЛМА. Ефективним способом вирішення даної проблеми є застосування новітніх захисних покриттів, здатних поглинати чи розсіювати електромагнітне випромінювання (ЕВ) у радарному діапазоні частот. Це відповідає умовам експлуатації більшості сучасних систем виявлення. Найбільш важливим і критичним для військового застосування є Х-діапазон (у межах 8…12 ГГц), який використовують радіолокаційні станції повітряного базування. Аналіз останніх публікацій свідчить про активний пошук ефективних матеріалів, у тому числі й полімерних, для екранування ЕВ [2, 4, 7]. Серед них

значне місце займають КМ на основі електропровідних полімерів, які містять вуглецеві добавки, металеві порошки та їхні комбінації. Екрануюча ефективність покриттів залежить від вмісту й виду наповнювачів, товщини шарів, частоти ЕВ, а також, що особливо, від однорідності розподілу провідних часток у полімерній матриці. Водночас, більшість досліджень на сьогодні зосереджена на одношарових покриттях, що не завжди дозволяє досягти оптимального поєднання адгезійно-механічних й екрануючих властивостей покриттів [1-3]. Залишається недостатньо вивченим вплив комбінування нано- та мікродисперсних часток у двошарових структурах на ефективність екранування ЕВ [4]. Особливо це важливо при створенні покриттів, які містять промислові відходи у вигляді функціональних наповнювачів. На сьогодні не встановлено оптимальні співвідношення між адгезійним і поверхневим функціональними шарами за критеріями товщини і складу при досягненні максимальних показників екрануючої ефективності в радарному діапазоні. Відсутні системні дані щодо впливу природи модифікатора на структуру та властивості КМ з високим вмістом мікрочасток. Не з'ясовано, яким чином дитіокарбаматні групи модифікатора можуть впливати на міжфазову взаємодію зв'язувача з наповнювачем під час формування провідної гратки в об'ємі покриття. Вирішення цих питань забезпечить створення новітніх двошарових епоксидних покриттів, які забезпечуватимуть достатню екрануючу ефективність при підвищених показниках механічних та адгезійних властивостей. Саме ця умова є важливо критичною для захисту безекіпажних апаратів від радіолокаційного виявлення.

Мета роботи – дослідити вплив інгредієнтів композицій і товщини адгезивів на екранування електромагнітного випромінювання захисними покриттями.

Матеріали та методи дослідження. Як основу для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий оліґомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується підвищеною адгезійною міцністю до основи, можливістю полімеризації при низьких температурах, незначною усадкою, відсутністю виділення летючих речовин при полімеризації, технологічністю. Для зшивання епоксикомпозицій застосовано твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78).

Як модифікатор застосовано синтезовану нами сполуку 4,4 – сульфонілбіс (4,1 – фенілен)біс(N, N – діетилдітіокарбамат). Модифікатор містить дитіокарбаматні групи, які відзначаються подвійними зв'язаними атомами сірки. Це забезпечує його активацію до міжфазової взаємодії при структуроутворенні захисних покриттів.

Додатково при формуванні покриттів застосовано нано- і мікродисперсні добавки. Як нанодисперсні добавки використано:

1. Технічний вуглець (нанодисперсна сажа (НС)) CARBON BLACK марки PowCarbon 2419G (CAS NO.: 1333-86-4) (компанія «Black Diamond Material Science Co., Ltd.», Китай). Розмір часток становить 20…22 нм.

2. Нанодисперсна фулерено-сажова суміш (НФСС) (компанія «YongFeng Chemical»s, Китай). НФСС отримано шляхом синтезу фулеренів згідно технології лазерного випаровування графіту. Розмір НФСС – 30…40 нм, питома площа – 180…210 $м^2/г$, вміст фулеренів – до 0,1%.

3. Нанодисперний конденсований вуглець (НКВ) (компанія «YongFeng Chemicals», Китай), який отримано шляхом детонаційного синтезу. Розмір НКВ – 8…14 нм. Склад НКВ: щільність – 2,3…2,7 $г/см^3$; питома площа – 290…460 $м^2/г$;

кількість (С) – 85…88 %; кількість (Н) – 0,4…1,0 %; кількість (N) – 3,0…4,2 %; кількість (О) – 4,1…8,2 %; кількість залишку – 3,2…6,2 %.

Як мікродисперсні добавки використано порошки з розміром 63 мкм, які є відходами промислового виробництва. Зокрема:

1. Конвертерний шлам (КвШ). КвШ має такий склад, %: SiO_2 – 20,9; Al_2O_3 – 2,5; Fe_2O_3 – 12,79; FeO – 7,7; MgO – 5,1; MnO – 2,8; CaO – 46,6; S – 0,2; Fe – 14,9.

2. Зварювальний шлак (ЗвШ). ЗвШ має такий склад, %: SiO_2 – 11,7; Al_2O_3 – 1,1; Fe_2O_3 – 25,6; FeO – 59,1; MgO – 0,4; MnO – 0,8; CaO – 0,3; S – 0,1; Fe – 63,7.

3. Гранульований шлак (ГШ). ГШ має такий склад, %: SiO_2 – 38,5; Al_2O_3 – 5,7; Fe_2O_3 – 0,1; FeO – 0,5; MgO – 6,6; MnO – 0,7; CaO – 44,8; S – 1,6; Fe – 0,4.

Випробування матеріалів для екранування електромагнітного випромінювання (ЕВ) здійснювали згідно стандарту IEEE 2715-2023. Використовували вимірювальний стенд для дослідження ефективності екрануючих покриттів у вибраному діапазоні електромагнітного випромінювання. При випробуваннях охоплювали радарний діапазон частот (X-band, 8…12 ГГц), який є критичним для зниження радіолокаційної помітності безекіпажних літальних та морських апаратів.

Згідно IEEE 2715-2023 застосовували метод вимірювання екрануючої ефективності (SE) матеріалів у вигляді захисних покриттів. Зазначимо, що показник SE, який вимірюється у децибелах (дБ), розраховували як відношення потужності (або напруженості) електромагнітного поля, що проникає у зразок, до потужності поля, яке пройшло крізь зразок:

$$SE\ (дБ) = 10 \times \log_{10} (Рпр / Рпрох),$$

де Рпр – потужність проникаючої хвилі;

Рпрох – потужність хвилі, що пройшла крізь зразок.

Фактично, вимірюючи цю величину, визначали, у скільки разів покриття зменшує потужність електромагнітної хвилі, яка проходить крізь нього.

Викладення основного матеріалу та обговорення результатів дослідження. Слід зазначити, що попередньо нами було досліджено структуру і властивості епоксидних захисних покриттів, як містять нано- і мікродисперсні наповнювачі за різного вмісту [8-10]. За результатами випробувань фізико-механічних властивостей епоксидних композитів було встановлено склад епоксидної матриці, яка містить модифікатор 4,4-сульфонілбіс(4,1-фенілен) біс(N,N-діетилдітіокарбамат) за оптимальної концентрації 1,5 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли ЕД-20. Її було взято за основу при наступному формуванні двошарових покриттів.

Крім того, на основі результатів випробувань КМ з нанодисперсними частками було визначено їх оптимальний вміст за критерієм адгезійної міцності і сформовано композиції для адгезійного шару захисних покриттів. Зокрема, для формування адгезійного шару трьох покриттів було обрано нанодисперсну сажу (НС) CARBON BLACK за вмісту 4 мас.ч., нанодисперсну фулерено-сажову суміш (НФСС) за вмісту 1,5 мас.ч. і нанодисперний конденсований вуглець (НКВ) за вмісту 3,5 мас.ч.

Як було показано вище, нами було сформовано двошарові покриття, які містять адгезійний та функціональний шари. При формуванні функціонального шару у епоксидний зв’язувач уводили мікродисперсні порошки, які є відходами промислового виробництва. На основі фізико-механічних випробувань матеріалів з мікрочастками, які уводили в зв’язувач незалежно, було встановлено їх

оптимальний вміст у КМ. Зокрема, при формуванні поверхневого шару, застосовували мікрочастки конвертерного шламу (КвШ) за вмісту 50 мас.ч., зварювального шлаку (ЗвШ) за вмісту 40 мас.ч. і гранульованого шлаку (ГШ) за вмісту 60 мас.ч.

Отже, для подальших випробувань було сформовано три двошарові захисні покриття наступного складу.

Покриття 1.

Адгезійний шар:

Інгредієнти, мас. ч.: епоксидна смола ЕД-20 (100), ПЕПА (10), модифікатор (1,5), нанонаповнювач НС (4).

Функціональний шар:

Інгредієнти, мас. ч.: епоксидна смола ЕД-20 (100), ПЕПА (10), модифікатор (1,5), мікронаповнювач КвШ (50).

Покриття 2.

Адгезійний шар:

Інгредієнти, мас. ч.: епоксидна смола ЕД-20 (100), ПЕПА (10), модифікатор (1,5), нанонаповнювач НФСС (1,5).

Функціональний шар:

Інгредієнти, мас. ч.: епоксидна смола ЕД-20 (100), ПЕПА (10), модифікатор (1,5), мікронаповнювач ЗвШ (40).

Покриття 3.

Адгезійний шар:

Інгредієнти, мас. ч.: епоксидна смола ЕД-20 (100), ПЕПА (10), модифікатор (1,5), нанонаповнювач НКВ (3,5).

Функціональний шар:

Інгредієнти, мас. ч.: епоксидна смола ЕД-20 (100), ПЕПА (10), модифікатор (1,5), мікронаповнювач ГШ (60).

Зазначимо, що товщина адгезійного шару була стандартною – 80 ± 5мкм, а товщину функціонального шару змінювали дискретно. Для випробувань нами вибрано наступні параметри товщини функціонального шару: 150, 300 і 400 мкм.

Слід зауважити, що основне призначення розроблених покриттів – екранування електромагнітного випромінювання (ЕВ). Захисні покриття призначені для зниження радіолокаційної помітності безекіпажних літальних та морських апаратів. Враховуючи це при випробуваннях вибрано радарний діапазон частот (X-band, 8…12 ГГц). Саме у цьому діапазоні оцінювали екрануючу ефективність (SE) матеріалів у вигляді захисних двошарових покриттів залежно від їх складу та товщини.

На рис. 1 наведено експериментальні залежності екрануючої ефективності (SE) захисного покриття 1 від частоти електромагнітного поля в радарному діапазоні 8…12 ГГц. Покриття 1 формували у вигляді двошарової структури, яка містить адгезійний та функціональний шари. Товщина адгезійного шару становить 80±5 мкм. Даний параметр вибрано на основі попередніх досліджень адгезійної міцності КМ до основи. За цієї товщини досягли максимальні показники міцності зчеплення адгезиву з основою. Подальше збільшення товщини призводить до збільшення залишкових напружень, що суттєво погіршує адгезію покриття до основи.

Функціональний шар досліджували при трьох значеннях товщини (150, 300 та 400 мкм). Виходили з умови встановлення оптимального співвідношення між

екрануючою ефективністю та адгезійно-механічними властивостями покриття. Як показали результати дослідження, для усіх досліджених товщин адгезиву спостерігали загальну тенденцію до зменшення екрануючої ефективності зі збільшенням частоти (рис. 1).

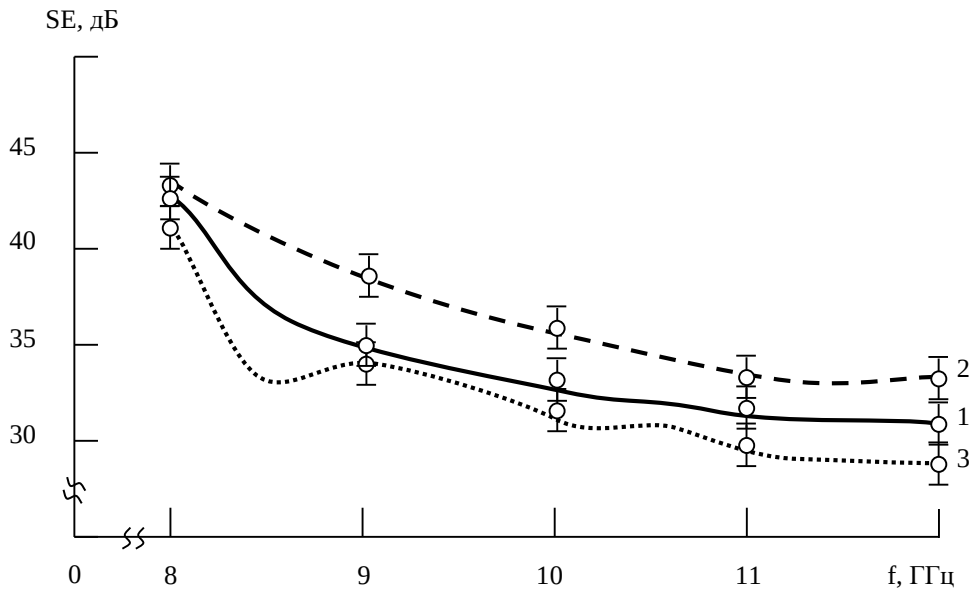


Рис. 1. Вплив частоти електромагнітного поля f на екрануючу ефективність (SE) захисного покриття 1 (за товщини адгезійного шару 80 ± 5мкм):
1 – товщина функціонального шару 150 мкм;
2 – товщина функціонального шару 300 мкм;
3 – товщина функціонального шару 400 мкм.

Це можна пояснити зменшенням довжини хвилі електромагнітного поля й відповідним зменшенням ефективності впливу нано- і мікродобавок у структурі композитів. При цьому найвищі значення SE (44,2 дБ при 8 ГГц, 38,2 дБ при 9 ГГц, 35,8 дБ при 10 ГГц, 33,8 дБ при 11 ГГц та 33,2 дБ при 12 ГГц) спостерігали для покриття з товщиною функціонального шару 300 мкм. Це є свідченням досягнення оптимального об'ємного вмісту дисперсного наповнювача (нанодисперсної сажі в адгезійному шарі та КвШ у функціональному) при формуванні ефективної просторової гратки у КМ. За товщини 150 мкм показники SE є дещо меншими, що пов'язано з недостатньою ефективністю впливу провідних добавок у функціональному шарі для забезпечення умов інтенсивного поглинання ЕВ. Для зразків з товщиною функціонального шару 400 мкм спостерігали зниження екрануючої ефективності, стосовно КМ з товщиною функціонального шару 300 мкм. Це зумовлено збільшенням кількості дефектів структури у покриттях, утворенням агломератів мікрочасток КвШ внаслідок седиментації порошку, що погіршує однорідність покриття за товщиною. Особливо цей ефект помітний при аналізі результатів випробування при частотах 11 та 12 ГГц, де різниця між SE для товщин функціонального шару 300 та 400 мкм становить 3…4 дБ. Механізм підвищення екрануючої ефективності покриття 1 зумовлений синергічним впливом нанодисперсної сажі (адгезійний шар) та

мікрочасток КвШ (функціональний шар). Нано- та мікродобавки створюють розвинуту просторову провідну гратку з різними механізмами втрат: наночастки з високою питомою поверхнею забезпечують ефективне поглинання на мікро- та нанорівні, а мікрочастки шламу сприяють формуванню додаткових каналів розсіювання й провідності на мікрорівні. Таким чином сумісний вплив ноно- та мікропорошків забезпечує інтенсивне поглинання електромагнітної енергії. Отже встановлено, що оптимальною товщиною функціонального шару для покриття 1 є 300 мкм. За такої товщини досягли максимальну екрануючу ефективність у всьому вибраному діапазоні частот.

На рис. 2 наведено залежності екрануючої ефективності (SE) захисного покриття 2 від частоти електромагнітного поля. Покриття 2 також є двошаровим і містить адгезійний шар з товщиною 80±5 мкм, який наповнений нанодисперсною сумішшю (НФСС) за вмісту 1,5 мас.ч., та функціональний шар, наповнений мікрочастками зварювального шлаку (ЗвШ) за вмісту 40 мас.ч. Аналогічно, як і у покритті 1, досліджено три значення товщини функціонального шару: 150, 300 і 400 мкм. Експериментально встановлено, що найвищі показники екрануючої ефективності для покриття 2 досягнуто за товщини функціонального шару 300 мкм: при частоті 8 ГГц SE = 46,4 дБ, при 9 ГГц – 41,8 дБ, при 10 ГГц – 40,1 дБ, при 11 ГГц – 37,3 дБ та при 12 ГГц – 37,5 дБ. За товщини функціонального шару покриття 150 мкм показники екрануючої ефективності є дещо нижчими: за частоти 10 ГГц SE = 37,2 дБ, а за частоти 12 ГГц – 33,2 дБ. Ці показники є на 2…4 дБ меншими порівняно з оптимальною товщиною функціонального шару покриття (300 мкм). Для товщини функціонального шару покриття 400 мкм спостерігали значне зменшення екрануючої ефективності: за частоти 10 ГГц SE становить 35,6 дБ (що є на 4,5 дБ меншим, ніж для товщини 300 мкм). За частоти 12 ГГц SE становить 31,4 дБ (що є на на 6,1 дБ меншим порівняно з товщиною 300 мкм). Крім того, для усіх досліджуваних товщин функціонального шару спостерігали зменшення екрануючої ефективності зі збільшенням частоти. При цьому зменшення показника SE (від 46,4 дБ до 37,5 дБ при товщині 300 мкм) можна пояснити зменшенням довжини хвилі, що відповідно погіршує ефективність поглинання. Водночас для покриття 2 спостерігали вищі показники екрануючої ефективності порівняно з покриттям 1. Доведено (рис. 1, рис. 2) що за частоти 10 ГГц (оптимальна товщина для обох покриттів 300 мкм) для покриття 2 SE = 40,1 дБ. Цей показник на 4,7 дБ є більшим, порівняно з аналогічним значенням для покриття 1 (35,8 дБ). Такий ефект можна пояснити вищою провідністю часток НФСС завдяки наявності фулеренів. Останні забезпечують додаткові канали для поглинання та розсіювання ЕВ. Окремо слід зазначити, що покриття 2 характеризується більш стабільними показниками екрануючої ефективності в усьому діапазоні частот порівняно з покриттям 1. Це особливо видно при аналізі результатів за товщини функціонального шару 300 мкм. Спостерігали зменшення SE на 8,9 дБ для покриття 2 (у діапазоні частот від 8 до 12 ГГц), а для покриття 1 – на 11,1 дБ.

Отже встановлено, що оптимальною товщиною функціонального шару для покриття 2, як і для покриття 1, є 300 мкм. Така товщина функціонального шару забезпечує найкраще поєднання високої екрануючої ефективності покриттів та стабільності показників у всьому вибраному для досліджень діапазоні частот.

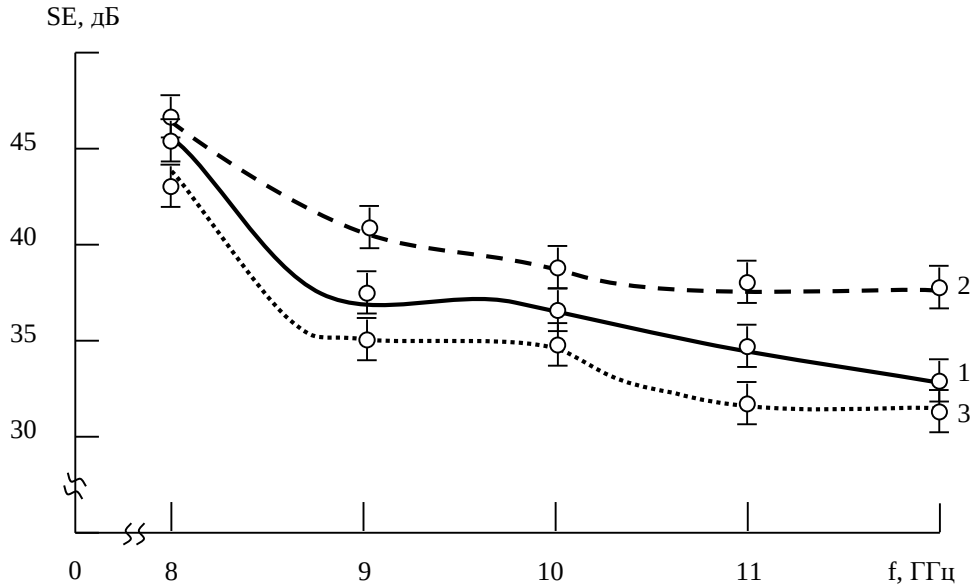


Рис. 2. Вплив частоти електромагнітного поля f на екрануючу ефективність (SE) захисного покриття 2 (за товщини адгезійного шару 80 ± 5мкм):
1 – товщина функціонального шару 150 мкм;
2 – товщина функціонального шару 300 мкм;
3 – товщина функціонального шару 400 мкм.

На рис. 3 наведено залежності екрануючої ефективності покриття 3 від частоти електромагнітного поля. Як було зазначено вище покриття 3 містить адгезійний шар, наповнений нанодисперсним конденсованим вуглецем (НКВ) за вмісту 3,5 мас.ч., та функціональний шар, наповнений гранульованим шлаком (ГШ) за вмісту 60 мас.ч. Аналіз отриманих результатів дозволяє констатувати про суттєво інший характер залежностей порівняно з попередньо описаними результатами. Зокрема, найвищі показники екрануючої ефективності для покриття 3 отримали за товщини функціонального шару 400 мкм. Для даної товщини поверхневого шару показники SE становлять: при 8 ГГц – 44,8 дБ, при 9 ГГц – 41,1 дБ, при 10 ГГц – 36,2 дБ, при 11 ГГц – 35,6 дБ та при 12 ГГц – 34,8 дБ. За товщини функціонального шару 300 мкм показники є дещо нижчими: за частоти 10 ГГц значення екрануючої ефективності становить 34,1 дБ (що на 2,1 дБ є меншим, ніж для товщини 400 мкм). За частоти 12 ГГц SE = 31,6 дБ (зменшення на ΔSE = 3,2 дБ). При товщині функціонального шару 150 мкм отримано найнижчі значення екрануючої ефективності: за частоти 10 ГГц SE = 31,9 дБ, що на 4,3 дБ є меншим порівняно з оптимальною товщиною 400 мкм, а при 12 ГГц – 29,6 дБ (зменшення показника на 5,2 дБ). Важливо зазначити, що для покриття 3 спостерігали тенденцію помірного зниження показника SE зі збільшенням частоти порівняно з покриттями 1 і 2. Зокрема, для товщини 400 мкм зменшення показника SE у досліджуваному діапазоні частот становить 10 дБ, тоді як для покриття 1 – 13,7 дБ, а для покриття 2 – 8,9 дБ. Це свідчить про частотну стабільність екрануючих властивостей такого захисного покриття.

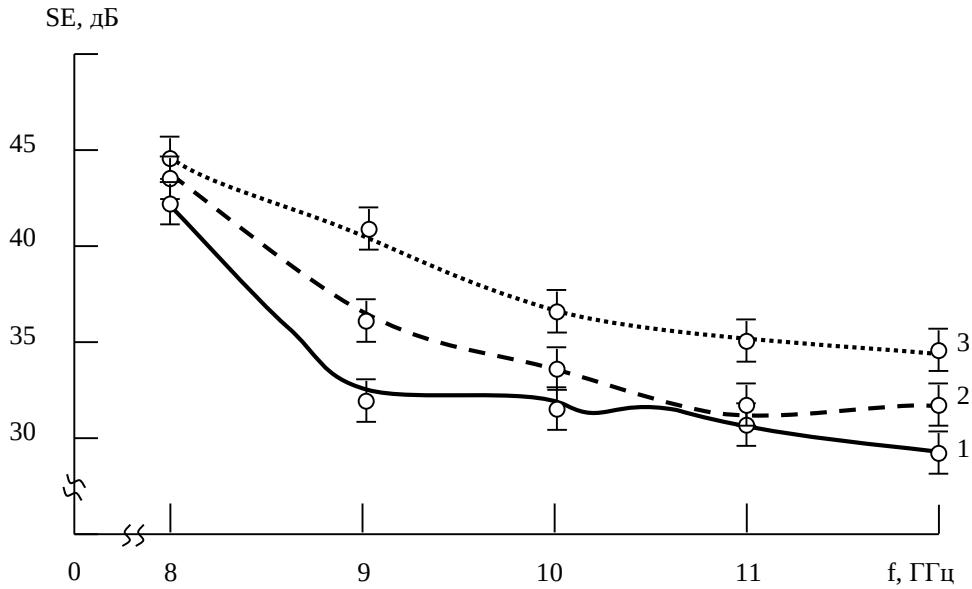


Рис. 3. Вплив частоти електромагнітного поля f на екрануючу ефективність (SE) захисного покриття 3 (за товщини адгезійного шару 80 ± 5мкм):
1 – товщина функціонального шару 150 мкм;
2 – товщина функціонального шару 300 мкм;
3 – товщина функціонального шару 400 мкм.

Механізм підвищення екрануючої ефективності за збільшення товщини функціонального шару покриття 3 до 400 мкм можна пояснити тим, що ГШ має більш розвинуту поверхню, містить значну кількість оксидів, а також характеризується високою питомою площею поверхні. Це забезпечує кращий розподіл дисперсних часток у покритті навіть у відносно товстих шарах. Водночас частки НКВ, завдяки високій питомій площі (290…460 м²/г) створюють в адгезійному шарі ефективну наносітку. Остання разом з мікроструктурною сіткою ГШ у функціональному шарі забезпечує синергетичний ефект. Порівняно з покриттям 2 за частоти 10 ГГц (оптимальна товщина 300 мкм) у покритті 3 спостерігали значення SE = 36,2 дБ (за товщини функціонального шару 400 мкм). Даний показник на 3,9 дБ є меншим від аналогічного показника (40,1 дБ) для покриття 2. Однак перевага покриття 3 полягає у можливості досягнення високих значень екрануючої ефективності при більшій товщині функціонального шару. Таким чином покриття 3 є перспективним при застосуванні товстошарових захисних покриттів, де необхідно забезпечити високі показники механічної міцності з достатніми екрануючими властивостями. Це важливо у випадках, де є потреба у додатковому конструкційному захисті. Отже, оптимальною товщиною функціонального шару для покриття 3 є 400 мкм. У такому випадку досягали максимальну екрануючу ефективність у всьому дослідженому діапазоні частот.

У таблиці 1 наведено порівняльні результати оптимальних значень екрануючої ефективності 3-х досліджених двошарових покриттів за частоти 10 ГГц, яку обрано як найбільш репрезентативний показник для оцінки екрануючої здатності розроблених матеріалів. Доведено (табл. 1), що досліджувані покриття демонструють максимальні показники екрануючої ефективності при різних товщинах функціонального шару. Це свідчить про

значний вплив природи мікронаповнювачів на оптимальну товщину екрануючого шару. Для покриття 1, що містить технічний вуглець в адгезійному шарі та конвертерний шлам у функціональному, оптимальною товщиною є 300 мкм (SE = 35,8 дБ). Для покриття 2, що містить нанодисперсну фулерено-сажову суміш і зварювальний шлак, найкращі показники (SE = 40,1 дБ) спостерігали при товщині функціонального шару 300 мкм. Зауважимо, що цей показник є найвищим серед усіх досліджених композитів. Для покриття 3, яке містить нанодисперсний конденсований вуглець і гранульований шлак, виявлено максимальну екрануючу ефективність (SE = 36,2 дБ) за товщини функціонального шару 400 мкм. Це свідчить про можливість досягнення високих показників екрануючої ефективності при значній товщині покриття.

Таблиця 1

Оптимальні значення екрануючої ефективності захисних покриттів за частоти f = 10 ГГц

Матеріал	Товщина функціонального шару покриття, h, мкм	Екрануюча ефективність, SE, дБ
Покриття 1	300	35,8
Покриття 2	300	40,1
Покриття 3	400	36,2

Порівняльний аналіз результатів дозволяє констатувати, що покриття 2 є найефективнішим за критерієм екрануючої здатності (SE = 40,1 дБ). Цей показник на 4,3 дБ перевищує аналогічне значення для покриття 1 і на 3,9 дБ для покриття 3. На наш погляд, це зумовлено наявністю фулеренів у складі НФСС. Дані добавки забезпечують провідність композиту й посилюють ефективність екранування зовнішнього електромагнітного випромінювання. Водночас для покриття 3 спостерігали дещо нижчі показники екрануючої здатності порівняно з покриттям 2. Однак його перевага полягає у можливості збільшення товщини адгезиву до 400 мкм без значного зниження ефективності екранування випромінювання, що робить його важим при формуванні товстошарових систем. Покриття 1, незважаючи на найнижчі показники екрануючої здатності (35,8 дБ), має важливу перевагу – використання доступних і дешевих інгредієнтів (технічний вуглець та конвертерний шлам). Це при низькій собівартості покриття забезпечує прийнятний рівень його екрануючої ефективності. Загалом можна констатувати, що використання фулереновмісних добавок дозволяє значно підвищити екрануючу здатність захисних покриттів. Водночас використання інших вибраних наповнювачів на основі технічного вуглецю та промислових відходів забезпечує достатні показники екрануючої ефективності покриттів. Це передбачає доцільність їх практичного застосування, позаяк показники SE становлять понад 30 дБ. При цьому слід відзначити, що усі досліджені покриття демонструють значення SE, які перевищують 30 дБ, що є загальновизнаним інженерним критерієм для ефективного екранування радарних сигналів. Отже, вибір оптимального покриття для конкретного впровадження має ґрунтуватися на компромісному варіанті між необхідним рівнем екрануючої ефективності, технічними вимогами щодо товщини адгезиву та економічним обґрунтуванням. Такий підхід дозволить адаптувати розроблені покриття до різних видів безекіпажних апаратів та конкретних умов їх експлуатації.

Висновки.

У роботі досліджено вплив складу та товщини двошарових модифікованих епоксидних покриттів на їхню екрануючу ефективність у радарному діапазоні частот X-band (8…12 ГГц), що є важливим для зниження радіолокаційної помітності безекіпажних літальних і морських апаратів. Встановлено, що формування двошарової структури покриттів (адгезійний шар з нанодисперсними вуглецевими порошками та функціональний шар з мікрочастками промислових відходів) дозволяє досягти високих показників їх екрануючої ефективності при забезпеченні достатніх адгезійно-когезійних властивостей.

Досліджено три види покриттів і виявлено, що найвищою екрануючою ефективністю (SE = 40,1 дБ за частоти 10 ГГц) характеризується покриття 2 за товщини 300 мкм, яке містить адгезійний шар, наповнений нанодисперсною фулерено-сажовою сумішшю (1,5 мас.ч.), та функціональний шар, наповнений зварювальним шлаком (40 мас.ч.). У свою чергу покриття 1 на основі епоксидної смоли (100 мас.ч.), технічного вуглецю (4 мас.ч.) та конвертерного шламу (50 мас.ч.) за товщини 300 мкм відзначається екрануючою ефективністю SE = 35,8 дБ за частоти 10 ГГц. Цей показник є дещо нижчим, однак має перевагу за рахунок меншої вартості компонентів. Для покриття 3 з нанодисперсним конденсованим вуглецем (3,5 мас.ч.) і гранульованим шлаком (60 мас.ч.) при частоті 10 ГГц показник екрануючої ефективності становить 36,2 дБ. Водночас оптимальна товщина функціонального шару для такого адгезиву становить 400 мкм, що передбачає додаткові конструкційні переваги.

Порівняльний аналіз трьох розроблених покриттів показує, що покриття 2 є найефективнішим за критерієм екрануючої здатності, показники якого перевищують аналогічні значення для покриття 1 на 4,3 дБ та для покриття 3 на 3,9 дБ. Це можна пояснити провідністю фулеренів та їхньою здатністю до молекулярного поглинання електромагнітної енергії. Водночас покриття 3 відрізняється найкращою (серед усіх досліджених матеріалів) частотною стабільністю (зменшення SE у діапазоні частот від 8 до 12 ГГц становить лише 10,0 дБ порівняно з аналогічним показником (13,7 дБ) для покриття 1). Це доводить його перспективність для застосування в усьому спектрі впливу радарних частот.

Встановлено, що усі розроблені покриття перевищують інженерний критерій ефективного екранування (SE>30 дБ). Це є підтвердженням їхньої практичної придатності для зменшення радіолокаційної помітності безекіпажних апаратів. Експериментально доведено, що екрануюча ефективність усіх покриттів зменшується зі збільшенням частоти, однак ступінь такого зменшення залежить від фізичної природи наповнювачів. Отримані результати необхідно враховувати при впровадженні покриттів для роботи об’єктів в конкретних радарних діапазонах.

Крім того, результати роботи доводять ефективність використання промислових відходів (конвертерного, зварювального та гранульованого шлаків) як функціональних наповнювачів для екрануючих покриттів, що забезпечує економічну доцільність та екологічну безпеку розроблених матеріалів. Отже, отримані результати створюють наукову основу для розроблення новітніх

радіопоглинальних покриттів з регульованими екрануючими властивостями, адаптованих до різних типів безекіпажних літальних та морських апаратів.

Перспективи подальших досліджень у даному напряму. Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення фізико-механічних властивостей розроблених двошарових покриттів, а також адгезійної міцності, зносо- й корозійної стійкості в умовах реальної експлуатації об'єктів.

Список літератури

1. Liu X., Chen D., He H., Sun T., Wu Z. Synergistic toughening of thermoplastic particles-inorganic particles to carbon fiber reinforced epoxy resin composites. Fuhe Cailiao Xuebao/Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(8). P. 1904-1910.

2. Lysenkov É.A., Klepko V.V. Characteristic Features of the Thermophysical Properties of a System Based on Polyethylene Oxide and Carbon Nanotubes. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2015, 88 (4). P. 1008-1014.

3. Yang C., Kim Y., Ryu S., Gu G. X. Prediction of composite microstructure stress-strain curves using convolutional neural networks. Materials and Design, 2020, 189, Article 108509. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108509

4. Li S. Chen D., Yuan Y., Gao C., Cui Y., Wang H., Liu X., Liu M., Wu Z. Influence of flexible molecular structure on the cryogenic mechanical propertie of epoxy matrix and carbon fiber/epoxy composite laminate. Materials and Design, 2020, 195, 109028

5. 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 and Technology, 2020, 19 (3). P. 109-114. https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1530171

6. Sapronov O.O., Buketov A.V., Maruschak P.O., Panin S.V., Brailo M.V., Yakushchenko S.V., Sapronova A.V., Leshchenko O.V., Menou A. Research of crack initiation and propagation under loading for providing impact resilience of protective coating. Functional Materials. 2019. Vol. 26. № 1. P. 114-120. (doi: https://doi.org/10.15407/fm26.01.114).

7. Totosko O.V., Stukhlyak P.D., Mykytyshyn A.H., Levytskyi V.V. Investigation of Electrospark Hydraulic Shock Influence on Adhesive-Cohesion Characteristics of Epoxy Coatings. Functional Materials. 2020. Vol. 27, No. 4. P. 760–766.

8. Сапронов О.О., Букетова Н.М. Використання вторинних енергоресурсів для підвищення адгезійних і фізико-механічних властивостей епоксидних композитів. Наукові нотатки. Луцьк: ЛНТУ. Випуск 53. 2016. С. 154-161.

9. Амелін М.Ю., Сапронов О.О., Ходаковський О.В., Букетова Н.М. Відновлення деталей транспорту полімерними композитами з мікродисперсними частками, що є відходами виробництва. Наукові нотатки. Луцьк: ЛНТУ. Випуск 60. 2017. С. 22-30.

10. Букетов А.В., Скирденко В.О. Вплив природи наповнювачів, що є відходами промислового виробництва, на фізико-механічні і теплофізичні властивості епоксидних композитних матеріалів. Наукові нотатки. Луцьк: ЛНТУ. Випуск 43. 2013. С. 28-34.

Отримано: 23 серпня 2026
Прийнято: 25 серпня 2026
Опубліковано: 30 вересня 2026

A. V. BUKETOV, V. V. SOTSENKO, O. O. SAPRONOVA, M. O. RICHTER, V. S. BANGA

INFLUENCE OF MODIFIED EPOXY COMPOSITES ON THE SHIELDING OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF HULLS OF AIRCRAFT AND MARINE UNMANNED VEHICLES

The article investigates the influence of the composition and thickness of two-layer epoxy protective coatings on their shielding efficiency in the radar frequency range (8…12 GHz). The relevance of the work is due to the need to reduce the radar visibility of unmanned aerial vehicles and marine vehicles by creating effective radio-absorbing materials based on epoxy coatings. Modified 4,4-sulfonylbis(4,1-phenylene)bis(N,N-diethyldithiocarbamate) epoxy resin ED-20, which was polymerized with polyethylenepolyamine, was used as a binder. Three types of two-layer coatings were developed, which contain an adhesive layer (thickness 80±5 μm) filled with nanodispersed carbon compounds (technical carbon, fullerene-soot mixture, condensed carbon), and a functional layer filled with microparticles of industrial waste (converter, welding and granulated slags). The thickness of the functional layer was varied discretely (150, 300 and 400 μm). It was established that for coating 1 (technical carbon + converter sludge) and coating 2 (fullerene-soot mixture + welding slag) the optimal thickness of the functional layer is 300 μm. For coating 3 (condensed carbon + granulated slag) the optimal thickness is 400 μm. The highest shielding efficiency is provided by coating 2: at a frequency of 10 GHz SE = 40.1 dB, which is 4.3 dB higher than this indicator for coating 1 and 3.9 dB higher than for coating 3. The indicator SE = 35.8 dB was found for coating 1 with a functional layer thickness of 300 μm, and for coating 3 – SE = 36.2 dB with a thickness of 400 μm. It is proven that all the studied coatings exceed the engineering criterion of effective shielding (SE>30 dB), which confirms their practical suitability for protecting unmanned aerial vehicles from radar detection. The results of the work substantiate the feasibility of using industrial waste as functional fillers for shielding coatings, which ensures their economic feasibility and environmental safety. The results obtained create a scientific basis for further design of multilayer radio-absorbing materials with controlled and predetermined properties for the needs of the military-industrial complex and civil aviation.

Keywords: *epoxy composite, coating, nanofiller, microfiller, electromagnetic radiation, shielding efficiency, unmanned aerial vehicles.*

References

1. Liu X., Chen D., He H., Sun T., Wu Z. Synergistic toughening of thermoplastic particles-inorganic particles to carbon fiber reinforced epoxy resin composites. Fuhe Cailiao Xuebao/Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(8). P. 1904-1910.

2. Lysenkov É.A., Klepko V.V. Characteristic Features of the Thermophysical Properties of a System Based on Polyethylene Oxide and Carbon Nanotubes. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2015, 88 (4). P. 1008-1014.

3. Yang C., Kim Y., Ryu S., Gu G. X. Prediction of composite microstructure stress-strain curves using convolutional neural networks. Materials and Design, 2020, 189, Article 108509. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108509

4. Li S. Chen D., Yuan Y., Gao C., Cui Y., Wang H., Liu X., Liu M., Wu Z. Influence of flexible molecular structure on the cryogenic mechanical propertie of epoxy matrix and carbon fiber/epoxy composite laminate. Materials and Design, 2020, 195, 109028

5. 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 and Technology, 2020, 19 (3). P. 109-114. https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1530171

6. Sapronov O.O., Buketov A.V., Maruschak P.O., Panin S.V., Brailo M.V., Yakushchenko S.V., Sapronova A.V., Leshchenko O.V., Menou A. Research of crack initiation and propagation under loading for providing impact resilience of protective coating. Functional Materials. 2019. Vol. 26. № 1. P. 114-120. (doi: https://doi.org/10.15407/fm26.01.114).

7. Totosko O.V., Stukhlyak P.D., Mykytyshyn A.H., Levytskyi V.V. Investigation of Electrospark Hydraulic Shock Influence on Adhesive-Cohesion Characteristics of Epoxy Coatings. Functional Materials. 2020. Vol. 27, No. 4. P. 760–766.

8. Sapronov O.O., Buketova N.M. Vykorystannia vtorynnykh enerhoresursiv dlia pidvyshchennia adheziinykh i fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei epoksydnykh kompozytiv. Naukovi notatky. Lutsk: LNTU. Vypusk 53. 2016. S. 154-161.

9. Amelin M.Iu., Sapronov O.O., Khodakovskyi O.V., Buketova N.M. Vidnovlennia detalei transportu polimernymy kompozytamy z mikrodyspersnymy chastkamy, shcho ye vidkhodamy vyrobnytstva. Naukovi notatky. Lutsk: LNTU. Vypusk 60. 2017. S. 22-30.

10. Buketov A.V., Skyrdenko V.O. Vplyv pryrody napovniuvachiv, shcho ye vidkhodamy promyslovoho vyrobnytstva, na fizyko-mekhanichni i teplofizychni vlastyvosti epoksydnykh kompozytnykh materialiv. Naukovi notatky. Lutsk: LNTU. Vypusk 43. 2013. S. 28-34.

Букетов Андрій Вікторович – д.т.н., професор, завідувач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, проспект Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000, E-mail: buketov@tntu.edu.ua, http://orcid.org/0000-0001-9836-3296

Соценко Віталій Віталійович – PhD, доцент, доцент кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, проспект Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000, E-mail: sotsenko.vv@gmail.com, http://orcid.org/0000-0003-4384-9373

Сапронова Людмила Олександрівна – аспірантка, аспірантка кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, проспект Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000, E-mail: l.o.sapronova@gmail.com, http://orcid.org/0009-0008-9974-6860

Рихтер Максим Олександрович – аспірант, аспірант кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, проспект Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000, E-mail: maksymrykhter@ukr.net, http://orcid.org/0009-0003-4675-8300

Банга Влада Сергіївна – молодший науковий співробітник кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, проспект Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000, E-mail: 0660555311vl@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-7379-5927

Andrii Buketov – Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of the Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, 20 Ushakova Avenue, Kherson, Ukraine, 73000.

Vitalii Sotsenko – PhD, Associate Professor, Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, 20 Ushakova Avenue, Kherson, Ukraine, 73000.

Liudmyla Sapronova – PhD Student, Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, 20 Ushakova Avenue, Kherson, Ukraine, 73000.

Maksym Rykhter – PhD Student, Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, 20 Ushakova Avenue, Kherson, Ukraine, 73000.

Vlada Banga – Junior Researcher, Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, 20 Ushakova Avenue, Kherson, Ukraine, 73000.