

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ВИРОБІВ З НОВИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Проценко В. О., д.т.н., професор, професор кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: 1904pvo@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3468-4952;

Касян О. А., аспірант кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: kasyan.aleksey@ukr.net, ORCID: 0009-0008-2039-6096.

Стаття стосується техніко-економічного обґрунтування застосування виробів з нових композитних матеріалів. Обґрунтовано структуру собівартості композитних виробів, що включає вартість матеріалів, наповнювачів, армування, оброблення стаціонарними чи змінними фізичними полями, механічного оброблення. Витрати на виконання кожної операції включають оплату праці робітників, витрати на оплату електроенергії, амортизації обладнання, експлуатаційних та інших цехових витрат. Наведені вирази, які можна використовувати на практиці для визначення складових собівартості композитного виробу. Для ілюстрації виконано співставлення виготовлення втулок дейдвудних підшипників з капролону наповненого графітом, капролону наповненого графітом та дисульфідом молібдену, а також з епоксидного композиту наповненого графітом та поліамідом. Отримані вирази для розрахунку трудомісткості та вартості виготовлення втулок з цих матеріалів залежно від їхніх розмірів. Результати розрахунків показали, що вартості втулок з усіх трьох аналізованих матеріалів є цілком співставними величинами одного порядку, що в умовах одиничного виробництва судноремонтного підприємства робить витрати на виготовлення для всіх варіантів рівнозначними. Показано, що у випадку застосування втулок з капролону наповненого графітом та фісульфідом молібдену, кількість ремонтів з докуванням судна за термін його використання буде майже в 6 разів меншою ніж при застосуванні втулок з епоксидного композиту, що є ключовим фактором для вибору матеріалу, оскільки зменшує кількість простойв судна в доку та собівартість перевезення тони вантажу. Представлена методика розрахунку може бути використана інженерами при обґрунтуванні вибору матеріалу та корисна аспірантам для співставлення отриманих результатів з дослідженнями інших авторів.

Ключові слова: композитний матеріал; собівартість; оброблення; економічна доцільність; якість.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.118-131

Вступ. Композитні матеріали існують з давніх часів, їх створила сама природа, що підкреслює їх перспективність. Найвідомішим композитом є деревина, що містить довгі целюлозні волокна, які утримуються вкупі та взаємодіють завдяки набагато слабшій механічно речовині – лігніну. Таким чином, у деревині дві речовини з низькою міцністю, лігнін та целюлоза, сукупно утворюють набагато міцнішу речовину. Композитами є кістки людського тіла (фосфат кальцію + колаген), та в ширшому розумінні саме людське тіло. Нашими предками композити здавна використовувались перш за все у будівництві, достатньо згадати поєднання соломи та глини, а згодом і залізобетону, використовувались для полювання та у військових діях (дамаська сталь), тепер їх використовують у найбільш прогресивних галузях виробництва, зокрема літаків та аерокосмічної техніки.

У сучасному розумінні, композитні матеріали, що застосовують у техніці, умовно ділять на такі класи [1]:

- полімерні матричні композити – зазвичай термореактивні смоли (епоксидні, поліамідні чи поліефірні) або термопласти, армовані склом, вуглецем, бором або арамідними (кевларовими) волокнами, керамічними монокристаллами або, останнім часом, металевими волокнами. Вони в основному використовуються в умовах, що передбачають відносно низькі робочі температури (як правило, до 400°C).

- металоматричні композити – найчастіше на основі алюмінієвих, магнієвих, титанових або мідних сплавів, в які вводяться борові, вуглецеві (графітові) або керамічні волокна (зазвичай оксид алюмінію або карбід кремнію). Робоча температура таких матеріалів рідко перевищує більше ніж 800°C. Температура обмежується границею

розм'якшення або плавлення, що характеризує матеріал матриці. Якщо передбачуване застосування передбачає високі температури, то як матрицю застосовують сплави на основі нікелю та ін. [2];

– композити з керамічною матрицею, що розроблені спеціально для застосування за високих робочих температур понад 1000°C. Широко використовуються: карбід кремнію (SiC), оксид алюмінію (Al₂O₃) та скло, а поширеними армуючими волокнами також є керамічні матеріали;

– вуглець-вуглецеві композити, що містять вуглецеву або графітову матрицю, армовану волокнами чи графітовими тканинами, що забезпечує стійкість до надвисоких температур близько 3000°C, що сукупно з низькою щільністю та низьким коефіцієнтом теплового розширення робить їх дуже прогресивними. Найпоширенішими волокнистими композитами є матеріали на основі вуглецевого волокна, скловолокна та кевлару.

Враховуючи велику різноманітність матеріалів, очевидно, що існує багато критеріїв для їх класифікації, і згадані вище – лише деякі з них. Велике різноманіття матеріалів ускладнює задачу їх вибору для тих чи інших умов. Особливо це стосується полімерних композитів, як широко розповсюджених у техніці, і тому є фокусом досліджень багатьох науковців.

Аналіз публікацій. У структурі експлуатаційних витрат для засобів транспорту значну частину займають витрати на технічне обслуговування та ремонт, які залежать від його періодичності та можуть бути достатньо трудомісткими [3]. На цей показник впливає в свою чергу довговічність таких, на перший погляд простих елементів як ущільнення, довговічність яких залежить як від розподілу навантажень [4], так і від опору зношуванню матеріалу. Так, на періодичність докування судна впливає зносостійкість матеріалу ущільнень та втулок дейдвудних підшипників, причому вартість самих цих виробів є незначною порівняно з вартістю докування. Те саме стосується авіап перевезень, де значний вплив на прибутковість авіакомпаній мають витрати на обслуговування та експлуатацію парку, що підкреслює важливість застосування матеріалів із високими показниками, що здатні зменшити потреби в обслуговуванні та підвищують строк служби елементів повітряних суден, оскільки зниження частоти та тривалості технічного обслуговування підвищує доступність літаків та мінімізує перерви в розкладі рейсів [5]. Такий підхід до вибору витратних елементів при технічному обслуговуванні дає можливість авіакомпаніям підсилити свою конкурентоспроможність внаслідок оптимізації витрат [6]. Зокрема, оцінка потреби технічного обслуговування та супутніх витрат є визначною для прийняття рішень про заміну матеріалів деталей газотурбінних двигунів літальних апаратів з метою зменшення ризиків під час виконання польотів [7, 8]. З цією ж метою розробляються методи техніко-економічного аналізу композитів із керамічною матрицею [9].

Застосування полімерних композитів часто дозволяє отримати достатньо швидкі рішення по отриманню фізичних моделей при виконанні наукових досліджень [10] чи ремонту, де виробництво є одиничним і не потребує детального техніко-економічного обґрунтування. У випадку ж застосування у серійному чи масовому виробництві ресурсоемних композитних виробів на основі полімерів, що потребують дорожчих вихідних матеріалів, значних витрат енергії та праці на оброблення, виконання техніко-економічного аналізу є необхідним.

Постановка проблеми. Значна кількість досліджень в галузі матеріалознавства стала джерелом розроблення і вивчення властивостей нових матеріалів, на шляху впровадження яких часто знаходиться ресурсоемність композиції, енергоемність чи трудомісткість запропонованої технології, низькі експлуатаційні показники готових виробів та ін. З огляду на наявність явного дослідницького пробілу в галузі техніко-економічного обґрунтування доцільності застосування нових композитних матеріалів, що підкреслюється відсутністю такого обґрунтування у значній кількості захищених дисертацій з матеріалознавства, існує потреба у розробленні методології його виконання для виведення нових розроблюваних матеріалів з лабораторій у сферу реального використання.

Метою роботи є розроблення методики визначення собівартості виробів з матеріалів типу полімерних композитів для спрощення прийняття рішення про впровадження того чи іншого виробу шляхом виконання техніко-економічного аналізу.

Задачі роботи:

- обґрунтувати структуру собівартості виробів з композиційних матеріалів на прикладі полімерних епоксикомпозитів;
- навести вирази для обчислення основних витрат, що формують собівартість таких виробів;
- виконати розрахунки та порівняння собівартості виробів з композитних матеріалів на прикладі втулок дейдвудних підшипників ураховуючи такі критерії як трудомісткість виготовлення, вартість та довговічність.

Виклад основного матеріалу. Вартість виготовлення B_{KB} виробу з композитного матеріалу (грн/шт.) можна обчислити як суму вартості матеріалів B_M та вартості оброблення B_O (1).

$$B_{KB} = B_M + B_O. \quad (1)$$

До вартості матеріалів (для випадку композитів на основі рідких смол) (2) входить вартість віднесених до одного виробу матеріалу матриці B_{MM} , вартість матеріалу твердника B_{MT} , вартість матеріалу наповнювача(ів) B_{MH} , матеріалу армування(нь) B_{MA} та ливарної форми B_Φ за відрахуванням вартості B_{MB} матеріалу відходів (у випадку складності утилізації цю вартість необхідно додавати):

$$B_M = \sum_{i=1}^n B_{Mi} - B_{MB} = B_{MM} + B_{MT} + B_{MH} + B_{MA} + B_\Phi - B_{MB}. \quad (2)$$

Технологія оброблення може включати вплив на виріб стаціонарних (температурне, електричне, силове та ін.) чи змінних (магнітно-імпульсне, ультрафіолетове та ін.) фізичних полів, а також механічне оброблення різанням, тиском і т.п., загалом на n операціях із відповідною вартістю $B_{OC\Phi\Pi}$, $B_{OЗ\Phi\Pi}$, B_{OM} (3).

$$B_O = B_{OC\Phi\Pi} + B_{OЗ\Phi\Pi} + B_{OM}. \quad (3)$$

Після підстановки (2) та (3) у (1), матимемо вираз (4):

$$\begin{aligned} B_{KB} &= \{B_{MM} + B_{MT} + B_{MH} + B_{MA} + B_\Phi - B_{MB}\} + B_{OC\Phi\Pi} + B_{OЗ\Phi\Pi} + B_{OM} = \\ &= \{B_{MM} + B_{MT} + B_{MH} + B_{MA} + B_\Phi - B_{MB}\} + \sum_{j=1}^n B_{Oj} = \{B_K + B_\Phi - B_{MB}\} + \sum_{j=1}^n B_{Oj}. \end{aligned} \quad (4)$$

Вартість матеріалів можна оцінити як:

$$B_{Mi} = m_{Mi} \times \Pi_{Mi}, \quad (5)$$

де m_{Mi} – маса i -го матеріалу (матриці, твердника, наповнювача, армування, відходів), кг;

Π_{Mi} – ціна i -го матеріалу, грн/кг.

У випадку застосування композитів, де задано масові частки кожного компонента q_{mi} їх ціну та їх густину ρ_{mi} вартість композиції рахувати за виразом:

$$\left\{ \begin{aligned} B_K &= B_{MM} + B_{MT} + B_{MH} + B_{MA} = \rho_{36} V_6 \Pi_{36}; \\ \rho_{36} &= \sum_{i=1}^n \rho_{mi} q_{mi} / \sum_{i=1}^n q_{mi}; \\ \Pi_{36} &= \sum_{i=1}^n \Pi_{mi} q_{mi} / \sum_{i=1}^n q_{mi}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Вартість оброблення B_o на j -тій операції, у загальному випадку є сумою оплати праці робітника B_{OPP} , вартості електроенергії B_{EH} , амортизації обладнання AM , експлуатаційних витрат B_E (технічне обслуговування та ремонт обладнання, інструменту, оснащення, витратні матеріали і т.ін.). Сюди також необхідно додати інші цехові витрати $B_{ЦВ}$ (на утримання та обслуговування виробничих площ, забезпечення охорони праці та т.д.).

$$B_{Oj} = B_{OPPj} + B_{EHj} + AM_j + B_{Ej} + B_{ЦВj}; \quad (7)$$

$$B_{OPPj} = \frac{12 \times 3П_{робj} + OB_{робj}}{\Phi PЧ_{робj}} \times \frac{T_{шкj}}{60n_{ej}} \times \left[1 + \frac{ССВ}{100} \right]; \quad (8)$$

$$B_{EHj} = \frac{P_j \times t_{oj}}{60n_{ej}\eta_j} \times Ц_{EHj}; \quad (9)$$

$$AM_j = \frac{B_{облj}}{T_{викj} \times \Phi PЧ_{облj}} \times \frac{t_{oj}}{60n_{ej}}, \quad (10)$$

де P_j – потужність, що витрачається на оброблення, кВт;

t_{oj} – основний час оброблення, хв;

n_{ej} – кількість одночасно оброблюваних виробів, шт.;

η_j – коефіцієнт корисної дії обладнання;

$Ц_{EH}$ – ціна електроенергії грн/(кВт×год);

$3П_{робj}$ – величина середньомісячної оплати праці відповідного робітника, грн;

$OB_{робj}$ – величина оплати відпустки робітника, грн;

$\Phi PЧ_{робj}$ – річний фонд робочого часу робітника год/рік;

$T_{шкj}$ – штучно-калькуляційний час (враховує оперативний час та підготовчо-заклучний час на налагодження обладнання), хв;

$ССВ = 22\%$ – єдиний соціальний внесок для фізичних осіб-підприємців;

$B_{облj}$ – вартість обладнання (з інструментом та оснащенням), грн;

$T_{викj}$ – термін використання обладнання, років (наприклад, для металорізальних верстатів зазвичай приймається 6...10 років);

$\Phi PЧ_{облj}$ – річний фонд робочого часу обладнання год/рік.

У випадку наявності даних з досвіду виробництва, можна брати замість $T_{шк} = \phi_{пз} t_{о}$, де $\phi_{пз}$ – коефіцієнт, що враховує наявність підготовчо-заклучного часу (залежить від виду оброблення, застосованого обладнання та оснащення) [11].

Експлуатаційні витрати обчислюються наступним чином [12]:

$$B_{Ej} = B_{TOj} + B_{Pj} + B_{BMj} + B_{IOj} + B_{PIj}, \quad (11)$$

де B_{TOj} – витрати на технічне обслуговування обладнання, зведені до вартості однієї деталі, грн/шт.;

B_{Pj} – витрати на ремонт обладнання, зведені до вартості однієї деталі, грн/шт.;

B_{BMj} – вартість витратних матеріалів, зведена до вартості однієї деталі, грн/шт.;

B_{IOj} – витрати на експлуатацію інструмента та оснащення, зведені до вартості однієї деталі, грн/шт.;

B_{PIj} – витрати на розроблення та впровадження програм для роботи обладнання, зведені до вартості однієї деталі, грн/шт.

Експлуатаційні витрати B_E та інші цехові витрати $B_{ЦВ}$ (залежно від рівня ощадності та організації виробництва) орієнтовно становлять 75...150% (на підприємствах із менш досконалим виробничим процесом цей відсоток може бути більшим) від величини оплати праці робітника B_{OPP} [12...14]. З урахуванням цього, вираз (7) для розрахунку вартості оброблення на j -ій операції подамо у вигляді, зручному для практичного використання:

$$B_{Oj} = (1, 75...2, 50)B_{OPPj} + B_{EHj} + AM_j. \quad (12)$$

Застосування показаної методики будемо розглядати на прикладі виготовлення втулок дейдвудних підшипників (рис. 1) із матеріалів, застосування яких розглянуто в роботах [15...17], а їх основні властивості зведено в табл. 1. У подальших викладках використовуватимемо коефіцієнти довжини $k_1 = l/D$ та діаметрів $k_2 = d/D$ (D – зовнішній діаметр втулки; d – діаметр отвору втулки; l – довжина втулки).

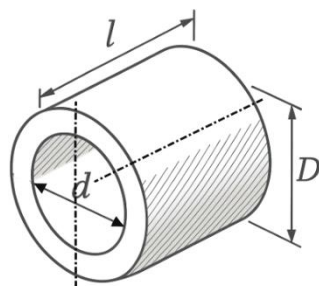


Рисунок 1 – Ескіз втулки дейдвудного підшипника (спрощено)

Таблиця 1 – Характеристики порівнюваних матеріалів

Позначення матеріалу	Найменування матеріалу	Модуль пружності E , ГПа	Густина ρ_m , кг/мм ³	Ціна C_m , грн/кг
$M1$	Капролон ПА-6МГ, наповнений графітом [15]	1,2...1,6	$1,17 \times 10^{-6}$	280
$M2$	Капролон ПА-6МДМ, наповнений графітом та дисульфідом молібдену [16]	1,6...2,0	$1,22 \times 10^{-6}$	340
$M3$	Матеріал ЕКМ-3 [17] ($\Sigma q = 220$ мас.ч.):	5,0...6,0	$\rho_{3в} = 1,75 \times 10^{-6}$	$C_{3в} = 270$
	Смола: Ероху 525 ($q_{m1} = 100$ мас.ч.)		$1,20 \times 10^{-6}$	300
	Твердник: ПЕПА ($q_{m2} = 5$ мас.ч.)		$1,00 \times 10^{-6}$	600
	Твердник: Telolit 410 ($q_{m3} = 5$ мас.ч.)		$1,00 \times 10^{-6}$	1100
	Наповнювач 1: графіт АГ 1500 ($q_{m4} = 60$ мас.ч.)		$2,90 \times 10^{-6}$	280
	Наповнювач 2: перліт ($q_{m5} = 20$ мас.ч.)		$2,30 \times 10^{-6}$	50
	Наповнювач 3: поліамід ПА-6 ($q_{m6} = 30$ мас.ч.)		$1,15 \times 10^{-6}$	100
Примітка: вартості матеріалів взято з відкритих джерел.				

За умови співвідношення для матеріалів $M1$ та $M2$ вартості матеріалу та вартості відходів $B_в/B_m = 0,25$, витрати на матеріал (з урахуванням 10% запасу на незворотні втрати матеріалу та ін.) можуть бути визначені згідно виразу:

$$B_m = 1,1 \times 0,785 \rho_m \frac{k_1}{k_2^3} d^3 (1 - 0,25 k_2^2) C_m. \quad (13)$$

Для матеріалів $M1$ та $M2$ оброблення передбачається тільки механічне в одну операцію ($j = 1$) на токарно-гвинторізному верстаті за дві установи, що включає, підрізання торця, зовнішнє точіння по діаметру D , свердління, розсвердлювання та розточування отвору d , відрізання деталі від прутка, підрізання протилежного торця. Режими різання для обох матеріалів $M1$ та $M2$ вважали однаковими. Для нормування операції використовували емпіричні співвідношення, наведені у [11] ($\phi_{пз} = 2,14$). Результати, перетворені відносно

внутрішнього діаметра та коефіцієнтів k_1 , k_2 , дали можливість отримати вирази для основного та штучно-калькуляційного часу:

$$t_{o1} = 0,17 \frac{d^2}{k_2^2} (2 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-3}, \text{ хв.}; \quad (14)$$

$$T_{ук1,2} = 0,36 \frac{d^2}{k_2^2} (2 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-3}, \text{ хв.} \quad (15)$$

У подальших перетвореннях нехтували витратами на електроенергію ($B_{EH} = 0$) та амортизацію ($AM = 0$), віднісши їх до інших цехових витрат, оскільки перші незначні, а другі в цьому випадку можна приймати нульовими, оскільки передбачається застосування вже проамортизованого обладнання. Інші величини в розрахунках брали наступними: $3P_{роб} = OB_{роб} = 30000$ грн, $\Phi PЧ_{роб} = 1800$ год/рік (при 36-годинному робочому тижні). Тоді вираз для визначення витрат на оплату праці верстатника з урахуванням (15) матиме вигляд:

$$B_{ОПР} = 1600 \frac{d^2}{k_2^2} (2 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-6}, \text{ грн.} \quad (16)$$

Прийнявши при цьому відсоток, що враховує експлуатаційні та інші цехові витрати 75% ($B_{ОПР} + B_E + B_{ШВ} = 1,75B_{ОПР}$), з урахуванням виразів (12), (13), (16), отримали вираз для визначення вартості деталей типу втулок з матеріалів $M1$ та $M2$:

$$\begin{aligned} B_{KB} &= B_M + 1,75B_{ОПР} = \\ &= 0,86\rho_m \frac{k_1}{k_2^3} d^3 \Pi_M (1 - 0,25k_2^2) + 2800 \frac{d^2}{k_2^2} (2 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-6}, \text{ грн.} \end{aligned} \quad (17)$$

Підставивши у (17) ціни матеріалів $M1$ та $M2$, а також прийнявши в середньому характерне для втулок дейдвудних підшипників співвідношення $k_2 = 0,75$, після нескладних перетворень отримаємо вирази для вартості втулок із цих матеріалів залежно від їхніх розмірів:

$$B_{KB1} = 574d^2 [k_1 (d + 28,3) + 17,4] \times 10^{-6}, \text{ грн.}; \quad (18)$$

$$B_{KB2} = 726d^2 [k_1 (d + 22,4) + 13,8] \times 10^{-6}, \text{ грн.} \quad (19)$$

Для матеріалу $M3$ матимемо наступні викладки. Вартість форми, що складатиметься з пустотілого циліндра зовнішнім діаметром $1,25D$, внутрішнім – $1,05D$, та встановленого всередину співвісного стрижня діаметром $0,9d$, із додаванням 10% на основу форми (множник 1,1) при $k_2 = 0,75$ становитиме:

– форми, видрукованої на 3D принтері з матеріалу ABS ($\rho_{mf} = 1,1 \times 10^{-6}$; $\Pi_{mf} = 8000$ грн/кг, стійкість форми $C\Phi = 50$ шт.):

$$\begin{aligned} B_{\Phi3-1} &= 1,1 \times 0,785l(0,46D^2 + 0,81d^2) \frac{\rho_{mf} \Pi_{mf}}{C\Phi} = \\ &= 1,1 \times 0,785 \times \frac{k_1}{k_2^3} d^3 (0,46 + 0,81k_2^2) \frac{\rho_{mf} \Pi_{mf}}{C\Phi} = \\ &= 0,7 \times \frac{k_1}{k_2^3} d^3 (0,57 + k_2^2) \frac{\rho_{mf} \Pi_{mf}}{C\Phi} = 1,88k_1 d^3 \frac{\rho_{mf} \Pi_{mf}}{C\Phi} \times 10^{-6} = 310k_1 d^3 \times 10^{-6}, \text{ грн.} \end{aligned} \quad (20)$$

– сталевій зварної форми за тих же співвідношень розмірів ($\rho_{mf} = 7,8 \times 10^{-6}$; $\Pi_{mf} = 1000$ грн/кг (враховує вартість матеріалу та виготовлення); $C\Phi = 250$ шт.):

$$B_{\Phi3-2} = 1,88k_1 d^3 \frac{\rho_{mf} \Pi_{mf}}{C\Phi} \times 10^{-6} = 60k_1 d^3 \times 10^{-6}, \text{ грн.} \quad (21)$$

Порівняння виразів (20) та (21) демонструє, що застосування друкованих форм може суттєво підвищити вартість виробів, тому далі орієнтуватимемось на сталеві форми.

Обчислені значення зведених ціни та густини для композиції дозволили отримати вираз для визначення вартості композиції для заготовки з розмірами, адекватними зазначеним розмірами ливарної форми ($k_2 = 0,75$):

$$\begin{aligned} B_{K3} &= 0,785l(1,10D^2 - 0,81d^2)\rho_{36}C_{36} = \\ &= 0,64 \frac{k_1}{k_2^3} d^3 (1,36 - k_2^2) \rho_{36} C_{36} = 572k_1 d^3 \times 10^{-6}, \text{ грн.} \end{aligned} \quad (22)$$

Значний попит на приймання відходів механічного оброблення епоксидних композитів авторам невідомий, тому приймаємо вартість матеріалу відходів $B_{MB} = 0$.

Таким чином, витрати на матеріал $M3$ для втулок, відлитих в сталеві форми становитимуть:

$$B_{M3} = B_{K3} + B_{\phi3} = 632k_1 d^3 \times 10^{-6}, \text{ грн.} \quad (23)$$

Технологія виготовлення виробу з матеріалу $M3$ включає чотири операції ($n = 5$): оброблення композиції температурним полем та механічне оброблення, основні з яких наведено в табл. 2.

При токарній обробці заготовки з матеріалу $M3$ матимемо вирази для основного, штучно-калькуляційного часу та вартості оплати праці робітника на операції 025:

$$t_o = 0,17 \frac{d^2}{k_2^2} (0,3 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-3}, \text{ хв.}; \quad (24)$$

$$T_{шк} = 0,36 \frac{d^2}{k_2^2} (0,3 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-3}, \text{ хв.} \quad (25)$$

$$B_{ОПР4} = 1600 \frac{d^2}{k_2^2} (0,3 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-6}, \text{ грн.} \quad (26)$$

Тоді трудомісткість виготовлення втулки з матеріалу $M3$ становитиме:

$$T_{шк3} = 268 + 0,36 \frac{d^2}{k_2^2} (0,3 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-3}, \text{ хв.} \quad (27)$$

Графіки залежностей (15) та (28) для трудомісткостей виготовлення втулок з аналізованих матеріалів від їх розмірів для поширених на флоті діаметрів гребних валів $d = 40 \dots 120$ мм та $k_1 = 1,0 \dots 3,0$, наведено на рис. 2. Для ілюстрації на рис. 3 порівняно трудомісткість виготовлення для модельної втулки $d = 100$ мм, $D = 132$ мм, $l = 270$ мм: для виробів із матеріалів $M1$ чи $M2$ вона становитиме $T_{шк1,2} = 54$ хв, а для матеріалу $M3$ – $T_{шк3} = 312$ хв, що робить висновки очевидними.

За прийняття тут вже наведених раніше припущень цехові втрати, оплату електроенергії та амортизацію обладнання, вартість втулки з матеріалу $M3$ ($k_2 = 0,75$) становитиме:

$$\begin{aligned} B_{KB3} &= B_M + 1,75 \sum_{j=1}^4 B_{ОПРj} = \\ &= 632k_1 d^3 \times 10^{-6} + 1,75 \left[129 + 1600 \frac{d^2}{k_2^2} (0,3 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-6} \right] = \\ &= 226 + 632d^2 \left[k_1 (d + 25,6) + 2,4 \right] \times 10^{-6}, \text{ грн.} \end{aligned} \quad (28)$$

Графіки залежностей (18), (19) та (27) для вартостей втулок наведено на рис. 4. На цьому графіку видно лінію перетину поверхонь $M2$ та $M3$, тобто в зоні більших діаметрів та довжин за прийнятих умов застосування матеріалу $M3$ може забезпечити нижчу вартість виробів. Втулки з матеріалу $M1$ дешевші за будь-яких умов. Так, вартість виготовлення модельної втулки $d = 100$ мм, $D = 132$ мм, $l = 270$ мм з матеріалу $M1$ буде $B_{KB1} = 1573$ грн (рис. 5), з матеріалу $M2$ – $B_{KB2} = 1877$ грн, а з матеріалу $M3$ – $B_{KB3} = 1829$ грн.

Сумісне розв'язання рівнянь (19) та (27) дало можливість побудувати графік (рис. 6) лінії рівної вартості виробів із матеріалів $M2$ та $M3$, що є лінією перетину відповідних поверхонь вартостей на графіку рис. 4.

Таблиця 2 – Технологічний маршрут виготовлення втулки з матеріалу $M3$

№ операції та її короткий зміст (кількість одночасно оброблюваних заготовок)		Основний / штучно- калькуляційний час t_o / $T_{шк}$, хв	Заробітна плата робітника, грн/міс. / оплата праці робітника за операцію на один виріб B_{opr} , грн
005 Термічна ($n_6 = 5$)		60 / 72	20000 / 42
	1. Нагріти смолу до $T = 353...373$ К і витримати при цій температурі	30	
	2. Підготувати та зважити компоненти композиції	{10}	
	3. Ввести наповнювачі в смолу та піддати змішуванню	10	
	4. Етерифікувати компаунд при $T = 333...353$ К.	20	
	5. Охолодити компаунд до кімнатної температури	{120}	
010 Вакуумна ($n_6 = 5$)		50 / 70	15000 / 31
	1. Ввести твердники	1	
	2. Залити композицію у форми	4	
	3. Вакуумувати композицію	45	
Витримка на повітрі 24 год		{1440}	—
015 Термічна ($n_6 = 5$)		120 / 126	15000 / 56
	Підігріти композицію до $T = 393$ К і витримати	120	
Охолодити (2 год) та витримати на повітрі 24 год		{1442}	—
025 Токарно-гвинторізна ($n_6 = 1$)		за виразом (24) / за виразом (25)	30000 / за виразом (26)
	1. Підрізати торець		
	2. Точити циліндр D		
	3. Розточити отвір d		
	4. Підрізати торець		
Сумарна трудомісткість за виразом (27)		За виразом (28)	
Примітка: у фігурних дужках наведено час, який перекривається іншим часом, або який не потребує участі та оплати праці робітника			

Отримані результати можна пояснити тим, що втулки з матеріалів $M1$ та $M2$ тут передбачено точити з прутків, через що при великих діаметрах d зростає витрата матеріалу у відходи (свердління отвору). При виготовленні втулок із матеріалів $M1$ та $M2$ литтям трубчастих заготовок, забезпечити нижчу вартість виробів із матеріалу $M3$ буде важко.

Специфіка роботи суден, де передбачається встановлення у дейдвудних підшипниках втулок з аналізованих матеріалів, передбачає їх докування, у тому числі для заміни втулок, тому основним функціональним критерієм для втулок є довговічність, а для їхніх матеріалів – зносостійкість. Відтак, кількість ремонтів із докуванням судна для заміни втулок дейдвудних підшипників за строк служби судна у роботі [15] запропоновано визначати за виразом (29).

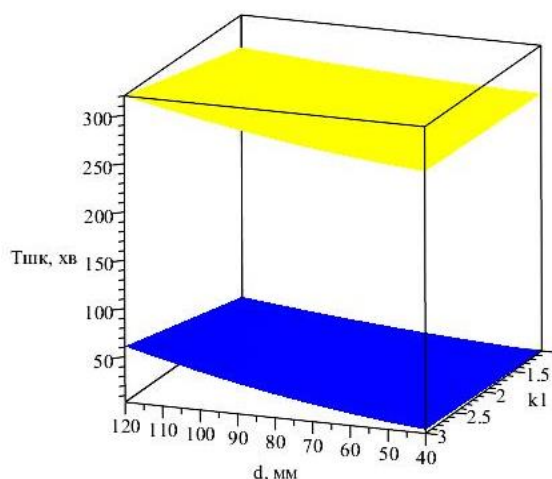


Рисунок 2 – Графіки залежності трудомісткості виготовлення виробів із матеріалів *M1* та *M2* (синій), а також *M3* (жовтий) від їх розмірів

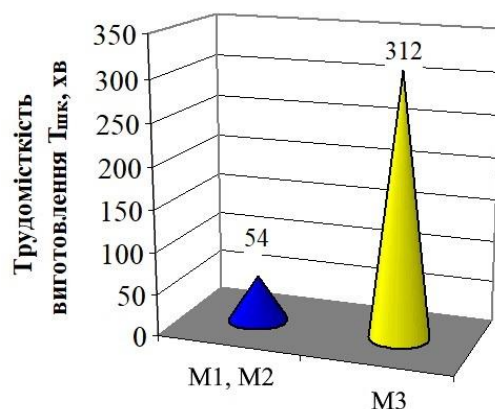


Рисунок 3 – Діаграма трудомісткості виготовлення модельної втулки з матеріалів *M1*, *M2* та *M3*

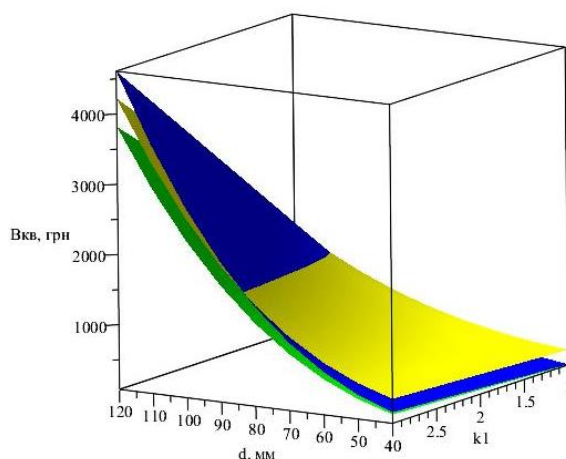


Рисунок 4 – Графіки залежності вартості виробів із матеріалів *M1* (зелений), *M2* (синій) та *M3* (жовтий) від їх розмірів

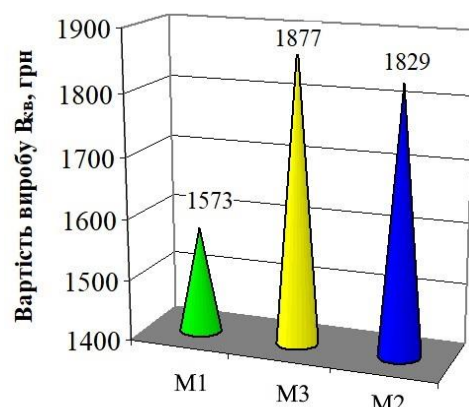


Рисунок 5 – Діаграма вартості модельної втулки з матеріалів *M1*, *M2* та *M3*

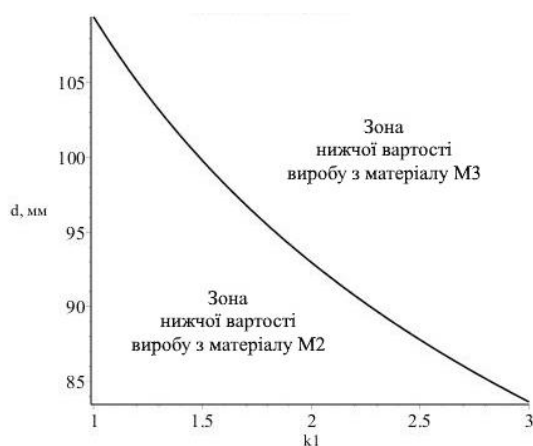


Рисунок 6 – Співвідношення розмірів, що забезпечують рівну вартість виробів з матеріалів *M2* та *M3*

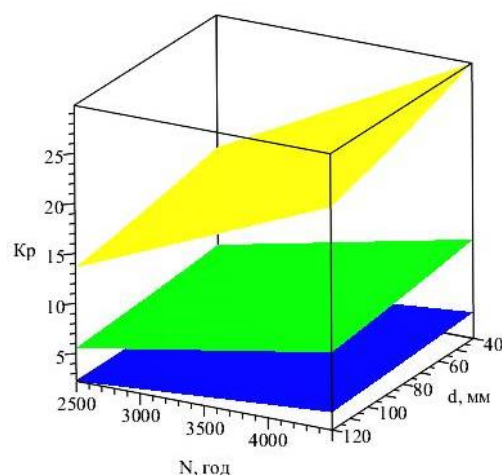


Рисунок 7 – Графік залежності періодичності ремонту (докування) вантажних суден за строк служби залежно від діаметра гребного вала та матеріалу втулки дейдвудного підшипника: *M1* (зелений), *M2* (синій) та *M3* (жовтий)

$$K_p = 25 \frac{k_{cc} N_{ход.}}{[2z] - 2z_{уст.}} I_{\Sigma} = 25 \frac{k_{cc} N_{ход.}}{0,0055d + 1,8} I_{\Sigma}, \quad (29)$$

де 25 років – проєктований строк служби судна;

k_{cc} – коефіцієнт строку служби судна до морального чи фізичного зносу (1 – для крупнотонажних транспортних суден, 2 – для крупнотонажних пасажирських суден);

$N_{ход.}$ – річна кількість ходових годин судна, (год)/рік;

$[2z] = 0,0120d + 1,8$ – гранично допустимий в експлуатації зазор у підшипнику (для дейдвудних підшипників зі втулками з неметалевих матеріалів діаметром до 600 мм), мм (формула Регістра);

$2z_{уст.} = 0,0065d$ – установчий (монтажний чи першопочатковий) зазор у підшипнику, мм [15];

I_{Σ} – сумарна інтенсивність зношування для вала та втулки (мм/1000 год) (табл. 3).

Таблиця 3 – Триботехнічні властивості порівнюваних матеріалів

Позначення матеріалу	Коеф. тертя f при мащенні водою	Інтенсивність зношування I_z				
		вала		втулки		сумарна для деталей підшипника
$M1$ ($V = 1,3$ м/с, $p = 2,6$ МПа) [15]	0,020	мг/ (км·см ²)	мм/1000 год	мг/ (км·см ²)	мм/1000 год	мм/1000 год
		*0,003	*0,018	0,005	0,200	0,218
$M2$ [16]	0,016	–	*0,007	–	0,080	0,087
$M3$ ($V = 1,0$ м/с, $p = 2,7$ МПа) [17]	0,038	–	**0,025	мг/км	мм/1000 год	0,535
				0,05	0,51	

Примітка: *у дослідях [15] для матеріалів на основі капролону контртіло було виготовлено з нержавіючої сталі 10X18H9T, з якої виготовляють гребні вали суден; **у дослідях [17] контртіло для матеріалу $M3$ було виготовлено зі сталі 45 (45...48 HRC), знос контртіла тут не фіксувався, тому для роботи зі втулкою з матеріалу $M3$ інтенсивність зношування вала взято близько 5% від інтенсивності зношування втулки, у запас довговічності (знижено, насправді вал буде зношуватись інтенсивніше).

Графіки залежності (29), побудовані для суховантажного судна у випадку застосування втулок з аналізованих матеріалів (табл. 3) при $N = 2500...5000$ год/рік наведено на рис. 7. Очікувано, найменшу кількість замін втулок забезпечить їх виготовлення з матеріалу $M2$. Наприклад, при $N = 4000$ год/рік для втулки з $d = 100$ мм із матеріалу $M1$ – $K_p = 9$, для матеріалу $M2$ – $K_p = 4$, для матеріалу $M3$ – $K_p = 23$ (або докування майже щороку).

Для випадку застосування модельних втулок $d = 100$ мм, $D = 132$ мм, $l = 270$ мм із різних матеріалів, з метою порівняння, отримані результати розрахунків зведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Основні характеристики модельних втулок дейдвудних підшипників з аналізованих матеріалів

Позначення матеріалу	Коеф. тертя f при мащенні водою	Трудомісткість виготовлення $T_{шк}, хв$	Тривалість виготовлення, $хв$	Вартість виготовлення $B_{кв}, грн$	Кількість ремонтів K_p
$M1$	0,020	54	54	1573	9
$M2$	0,016	54	54	1877	4
$M3$	0,038	312	3314	1829	23

Дані табл. 4 свідчать, що застосування для виготовлення втулок матеріалу *M3* забезпечить найбільшу кількість ремонтів, а відтак завдяки найбільшій тривалості простоювання та витрат на ремонт, найбільші питомі витрати на тонну перевезеного судном вантажу, що знизить прибутки від експлуатації судна оснащеного такими втулками. Втулки з матеріалу *M3* забезпечать найбільші втрати на тертя в дейдвудному підшипнику, а відтак витрати на паливо, що додатково підвищить вартість перевезень. Трудомісткість виготовлення втулок із матеріалу *M3* майже в 6 разів більше ніж для втулок з матеріалів *M2* та *M3* (а тривалість виготовлення більше в понад 60 разів). Отримані результати роблять вибір матеріалу для втулок дейдвудних підшипників більш обґрунтованим і переконливо свідчать на користь застосування матеріалів *M1* чи *M2*. Авторами [15, 16] близько 40 років досліджувалось застосування різноманітних матеріалів для виготовлення втулок дейдвудних підшипників, найкращі результати отримано для капролонографіту та капролону наповненому графітом та дисульфідом молібдену, причому дані лабораторних дослідів добре узгоджувались з практикою експлуатації суден, що дає підстави їм довіряти. Спроби застосування епоксидних композитів для виготовлення втулок підшипників також відомі з 60-х років XX ст., проте в практиці судноремонту вони не прижились. Слід також відзначити, що за даними [18], найменшу інтенсивність зношування мають епоксидні композити зі вмістом графіту близько 10% проти близько 30% використаних у матеріалі *M3*. Це формує резерви для подальших досліджень епоксидних композитів триботехнічного призначення і пошуку сфер їх застосування, оскільки як реальну альтернативу термопластам типу наповненого антифрикційними добавками, капрону для виготовлення втулок дейдвудних підшипників, що змащуються водою, наразі їх розглядати важко.

Висновки:

- обґрунтовано структуру собівартості виробів із композиційних матеріалів, що включає віднесені до одиниці виробу вартості матеріалів та оброблення стаціонарними чи змінними фізичними полями, а також механічного оброблення. Вартість матеріалів включає вартість складових композиту (матриці, твердників, наповнювачів), армування тощо. Вартість оброблення на кожній операції залежить від оплати праці робітника, вартості електричної енергії, амортизації обладнання, експлуатаційних та інших цехових витрат;
- наведені вирази для обчислення основних витрат, що формують собівартість таких виробів, уможливають виконання практичних розрахунків;
- на прикладі втулок дейдвудних підшипників суден, обчислено вартість виготовлення виробів для трьох матеріалів та обґрунтовано рішення про застосування одного з них, ураховуючи такі критерії як трудомісткість виготовлення, вартість та довговічність;
- у нових дослідженнях, що стосуються розроблення та вивчення властивостей нових матеріалів чи технологій рекомендується виконувати якісне порівняння отриманих технічних рішень з аналогічними дослідженнями інших авторів за технічними та економічними показниками з метою оцінки доцільності використання отриманих результатів.

Напрямки подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення критеріїв якості виробів із композитних матеріалів, що ураховують ступінь вдосконалення виконання ними своїх функцій, вартість і трудомісткість виготовлення, витрати ресурсів на експлуатацію і т.д. За результатами цих досліджень можуть бути розроблені системи автоматизованого проектування виробів з таких матеріалів, у тому числі із застосуванням засобів штучного інтелекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Emin A. How Composite Materials Influence Sustainable Development: Array. EuroEconomica. 40(2): 2021. <https://dj.univ-danubius.ro/index.php/EE/article/view/1459>.
2. Барановська О. В. Особливості структуроутворення та властивості спечених металоматричних композитів та епоксиполімерів з дисперсним наповнювачем на основі системи Ti-Fe-Si-Mn-C(B): дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 – матеріалознавство / О. В.

Барановська; Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. К., 2025. 254 с.

3. Protsenko V., Rusanov S., Babii M., Nastasenکو V. The influence of operating factors on the ram-type steering gear elements force interaction / *Journal of maritime research*. Vol. 22. No. 1.: 2025. 349–354. <https://www.jmr.unican.es/index.php/jmr/article/view/1112/993>.

4. Protsenko V., Nastasenکو V., Babii M., Protasov R. Marine ram-type steering gears maintainability increasing. *Journal of Mechanical Engineering – Strojnícky časopis*. Vol. 72, №2: 2022. 149–160. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0025>.

5. Camilleri M. A. Aircraft operating costs and profitability. *Travel Marketing, Tourism Economics, and the Airline product*. Vol. 12. Springer Nature, Cham, Switzerland: 2017. 191–204. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49849-2_12.

6. Mofokeng T., Mativenga P.T., Marnewick A. Analysis of aircraft maintenance processes and cost. *Procedia CIRP* 90: 2020. 467–470.

7. Lopes I., Senra P., Vilarinho S., Sá V., Teixeira C., Lopes J., Alves A., Oliveira J., Figueiredo M. Requirements specification of a computerized maintenance Management System – A Case Study. *Procedia CIRP* 52: 2016. 268–273.

8. Achouch M., Dimitrova M., Ziane K. et al. On predictive maintenance in industry 4.0: overview, models, and challenges. *Appl Sci* 12: 2022. 8081.

9. Karadimas G., Ioannou A., Kolios A. et al. Techno-Economic analysis of ceramic matrix composites integration in remaining useful Life Aircraft Engine Hot Section Components. *Int J Adv Manuf Technol* 135: 2024. 4189–4203. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14743-w>.

10. Nosov P., Zinchenko S., Nahrybelnyi Y., Onyshko D., Polishchuk V. Development and 3D printing of vessel models with automated traffic control systems. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*. No. 26–27: 2023. 70–81. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.070-081>.

11. Горбацевич О. Ф. Курсове проектування з технології машинобудування: навчальний посібник / О. Ф. Горбацевич, В. А. Шкред. Мінськ: Вища школа, 1983. 256 с.

12. Руденко П. О. Проектування технологічних процесів у машинобудуванні / П. О. Руденко. К.: Вища школа, 1993. 414 с.

13. Технологія машинобудування (дипломне проектування) / І. О. Григурко, М. Ф. Брендуля, С. М. Доценко. Львів: «Новий Світ – 2000», 2020. 744 с.

14. Сидоренко В. Н. Економічна ефективність механізації наплавлення / В. Н. Сидоренко, В. А. Шихальов, О. М. Портняжкіна // У зб. "Виробництво великих машин". Під. ред. А. І. Волконського, С. Є. Полякова (Праці НІИТЯЖМАШ Уралмашзаводу). Вип. 20, 1971. С. 124–138.

15. Бузков В. А. Підвищення службових властивостей матеріалів для розвитку суднових дейдвудних пристроїв та захисту моря: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 – матеріалознавство / В. А. Бузков; Одеський державний морський університет. Одеса, 1998. 448 с.

16. Сторожев В. П. Причини та закономірності поступових відмов основних триботехнічних об'єктів енергетичної системи судна та підвищення їх ресурсу: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.02 – машинознавство / В. П. Сторожев; Одеський державний морський університет. Одеса, 2002. 381 с.

17. Браїло М. В. Розроблення епоксикомпозитів з комплексом дисперсних і поліамідного наповнювачів для деталей вузлів тертя: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 – матеріалознавство / М. В. Браїло; Херсонська державна морська академія. Херсон, 2015. 227 с.

18. Smoleń J., Stepień K., Mikuśkiewicz M., Myalska-Głowacka H., Koziół, M., Godzierz M., Janeczek H., Czakiert J. Tribological Properties of Composites Based on Single-Component Powdered Epoxy Matrix Filled with Graphite. *Materials* 17: 2024. 3054. <https://doi.org/10.3390/ma17133054>.

REFERENCES

1. Emin, A. (2021). How Composite Materials Influence Sustainable Development: Array. *EuroEconomica*. 40(2). <https://dj.univ-danubius.ro/index.php/EE/article/view/1459>.
2. Baranovska, O. V. (2025). *Features of structure formation and properties of sintered metal matrix composites and epoxy polymers with dispersed filler based on the Ti-Fe-Si-Mn-C(B) system*. : dys. ... d-ra tekhn. nauk: spets. 05.02.01 – Materials Science / O. V. Baranovska; I. M. Frantsevych Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv. 254.
3. Protsenko, V., Rusanov, S., Babii, M., Nastasenکو, V. (2025). The influence of operating factors on the ram-type steering gear elements force interaction / *Journal of maritime research*. Vol. 22. No. 1. 349–354. <https://www.jmr.unican.es/index.php/jmr/article/view/1112/993>.
4. Protsenko, V., Nastasenکو, V., Babii, M., Protasov, R. (2022). Marine ram-type steering gears maintainability increasing. *Journal of Mechanical Engineering – Strojnicky časopis*. Vol. 72, №2. 149-160. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0025>.
5. Camilleri, M. A. (2017). Aircraft operating costs and profitability. *Travel Marketing, Tourism Economics, and the Airline product*. Vol. 12. Springer Nature, Cham, Switzerland. 191–204. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49849-2_12.
6. Mofokeng, T., Mativenga, P. T., Marnewick, A. (2020). Analysis of aircraft maintenance processes and cost. *Procedia CIRP* 90. 467–470.
7. Lopes, I., Senra, P., Vilarinho, S., Sá, V., Teixeira, C., Lopes, J., Alves, A., Oliveira, J. (2016). Figueiredo M. Requirements specification of a computerized maintenance Management System – A Case Study. *Procedia CIRP* 52. 268–273.
8. Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K. et al. (2022). On predictive maintenance in industry 4.0: overview, models, and challenges. *Appl Sci* 12. 8081.
9. Karadimas, G., Ioannou, A., Kolios, A. et al. (2024). Techno-Economic analysis of ceramic matrix composites integration in remaining useful Life Aircraft Engine Hot Section Components. *Int J. Adv. Manuf. Technol.* 135. 4189–4203. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14743-w>.
10. Nosov, P., Zinchenko, S., Nahrybelnyi, Y., Onyshko, D., Polishchuk, V. (2023). Development and 3D printing of vessel models with automated traffic control systems. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*. No. 26–27: 2023. 70–81. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.070-081>.
11. Horbatsevych O. F. (1983). *Kursove proektuvannia z tekhnolohii mashynobuduvannia: navchalnyi posibnyk* / O. F. Horbatsevych, V. A. Shkred. Minsk: Vyshcha shkola. 256 s.
12. Rudenko, P. O. (1993). *Design of technological processes in mechanical engineering* / P.O. Rudenko. Kyiv: Vyshcha Shkola. 414.
13. Hryhurko, I. O., Brendulya, M. F., Dotsenko, S. M. (2020). *Mechanical engineering technology (Diploma design)* / I. O. Hryhurko, M. F. Brendulya, S. M. Dotsenko. Lviv: Novyi Svit – 2000. 744.
14. Sydorenko V. N. (1971). *Ekonomichna efektyvnist mekhanizatsii naplavlennia* / V. N. Sydorenko, V. A. Shykhlov, O. M. Portniashkina // U zb. "Vyrobnystvo velykykh mashyn". Pid. red. A. I. Volkonskoho, S. Ye. Poliakova (Pratsi NYTYTiaZhMASH Uralmashzavodu). Vyp. 20. S. 124–138.
15. Buzkov, V. A. (1998). *Improving the service properties materials for the development of ship stern tube devices and sea protection*: dis. ... Dr. Sci. (Eng.): 05.02.01 – Materials Science / V.A. Buzkov; Odesa State Maritime University. Odesa. 448.
16. Storozhev, V. P. (2002). *Causes and regularities gradual failures of main tribotechnical objects a ship's power system and increasing their service life*: dis. ... Dr. Sci. (Eng.): 05.02.02 – Machine Science / V. P. Storozhev; Odesa State Maritime University. Odesa. 381.
17. Brailo, M. V. (2015). *Development epoxy composites with complex of dispersed and polyamide fillers for parts of friction*: dis. ... Cand. Sci. (Eng.): 05.02.01 – Materials Science / M. V. Brailo; Kherson State Maritime Academy. Kherson. 227.

18. Smole' n, J., Stepie' n, K., Miku' skiewicz, M., Myalska-Głowacka, H., Koziół, M., Godzierz, M., Janeczek, H., Czakiert, J. (2024). Tribological Properties of Composites Based on Single-Component Powdered Epoxy Matrix Filled with Graphite. *Materials* 17. 3054. <https://doi.org/10.3390/ma17133054>.

Protsenko V. O., Kasyan O. A. NEW COMPOSITE MATERIALS MADE PRODUCTS DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION FEATURES

The article deals with the techno-economic feasibility of using products made from new composite materials. The proposed cost structure of composite products includes the cost of materials, fillers, reinforcement, processing with stationary or variable physical fields, and mechanical processing by cutting, pressure, or other methods. The costs of performing each operation to manufacture a composite product are proposed to be calculated using a comprehensive approach. These include workers' wages, electricity expenses, equipment depreciation, costs of operating cutting tools and equipment, machine programming, and other shop costs—in particular, payment for the operation of production areas, ventilation, heating, etc. Ratios are introduced that can be used in practice to determine the specified components of the cost of a composite product. For illustration, calculations and comparisons of the manufacture of deadwood-bearing bushings from graphite-filled caprolon, caprolon filled with graphite and molybdenum disulfide, as well as from an epoxy composite filled with graphite and polyamide, are presented. The expressions for calculating the labor intensity and cost of manufacturing bushings from these materials, depending on their sizes and the relationships between them, were obtained. The calculation results showed that the cost of bushings made from all three analyzed materials are comparable in magnitude—values of the same order—making the manufacturing costs for all options equivalent under unit production conditions at a ship repair enterprise. By determining wear, it is shown that in the case of using bushings from caprolon filled with graphite and molybdenum disulfide, the number of repairs with docking of the vessel during its service life will be almost six times less than when using bushings made from epoxy composite (9 and 23 dockings over 25 years, respectively). The set of results obtained is key for choosing a material, as the greater wear resistance of the bushings reduces the number of vessel downtimes in the dock and the cost of transporting a ton of cargo. The presented calculation method can be used by engineers when justifying the choice of material and is helpful for graduate students to compare the results obtained with studies by other authors. This could be one step toward adhering to the principles of open science and reducing the amount of research conducted merely for the sake of research.

Key words: composite material; cost price; processing; economic feasibility; quality.

© Проценко В. О., Касян О. А.

Статтю прийнято до редакції 02.06.2025