

Л.М. Самчук, В.М. Франчук, В.А Єрьомін

Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

У статті проаналізовано сучасні та перспективні матеріали для виготовлення електромобілів із урахуванням їхніх фізико-механічних, економічних і екологічних характеристик. Запропоновано використання коефіцієнта матеріальної переваги $K = (\sigma - \rho) / C$ для кількісного порівняння ефективності сталей, сплавів і композитів. Встановлено, що найбільш збалансовані показники мають сталі нового покоління (AHSS), алюмінієві сплави серії 6xxx і полімерні композити. До 2030 року очікується зменшення частки сталі до 25 % і зростання ролі алюмінію та композитів до 28–30 %. Отримані результати відповідають концепціям *lightweighting*, *additivemanufacturing* та *circular economy*, що визначають розвиток сучасного електромобілебудування.

Ключові слова: електромобіль, конструкційні матеріали, легкі сплави, композити, сталі нового покоління.

L. Samchuk, V. Franchuk, V. Yeremin

ANALYSIS OF MODERN AND PROMISING MATERIALS FOR ELECTRIC CAR MANUFACTURING

The article analyzes modern and promising materials for the manufacture of electric vehicles, taking into account their physical, mechanical, economic, and environmental characteristics. The use of the material advantage coefficient $K = (\sigma - \rho) / C$ is proposed for a quantitative comparison of the efficiency of steels, alloys, and composites. It has been established that the most balanced indicators are found in new-generation steels (AHSS), 6xxx series aluminum alloys, and polymer composites. By 2030, the share of steel is expected to decrease to 25%, while the role of aluminum and composites is expected to grow to 28–30%. The results obtained are consistent with the concepts of *light weighting*, *additive manufacturing*, and *circular economy*, which determine the development of modern electric vehicle manufacturing.

Keywords: electric vehicles, structural materials, light alloys, composites, new generation steels.

Постановка проблеми. Перехід до електромобільного транспорту вимагає використання нових конструкційних матеріалів, які поєднують легкість, міцність і екологічну стійкість. Традиційні сталі вже не повністю відповідають вимогам енергоефективності та зниження маси. Водночас широке впровадження алюмінієвих і магнієвих сплавів, високоміцних сталей нового покоління, полімерних та волокнистих композитів супроводжується низкою критичних проблем, зокрема високою енергоємністю виробництва, значною вартістю сировини, складністю з'єднання різномірних матеріалів і обмеженими можливостями їх повторного використання та рециклінгу. Особливої актуальності набуває питання формування багатоматеріальних конструкцій, у яких поєднання металевих і полімерних компонентів часто призводить до технологічних, експлуатаційних і екологічних компромісів. На сьогодні недостатньо систематизованими залишаються наукові підходи до оптимізації структури та складу багатоматеріальних систем з урахуванням не лише механічних і експлуатаційних характеристик, а й повного життєвого циклу виробу — від отримання сировини та виробництва до експлуатації, ремонту та утилізації. В умовах посилення міжнародних екологічних стандартів, вимог до циркулярної економіки та відповідальності виробників постає нагальна потреба у розробленні науково обґрунтованих критеріїв вибору й комбінування матеріалів для конструкцій електромобілів, які забезпечуватимуть оптимальний баланс між механічною ефективністю, економічною доцільністю та екологічною стійкістю.

Наукова новизна роботи полягає у формалізованій аналітично-методичній адаптації підходу вибору матеріалів за Ешбі до умов сучасного серійного електромобільного виробництва, що характеризується жорсткими обмеженнями за масою, вартістю та екологічними показниками. На відміну від більшості існуючих досліджень, у яких аналіз конструкційних матеріалів для електромобілів має переважно якісний або вузькоспеціалізований характер, у даній роботі запропоновано інтегральний інженерний підхід до порівняльного ранжування матеріалів різної природи на основі узагальненого коефіцієнта матеріальної переваги, що поєднує міцнісні, масові та економічні характеристики. Новизна підходу полягає не у введенні нового фундаментального матеріалознавчого критерію, а у практичній інтерпретації та інженерному використанні безрозмірного інтегрального індексу як інструменту первинної оцінки доцільності застосування сталей нового покоління, легких металевих сплавів і полімерних композитів у конструкціях електромобілів. Такий підхід дозволяє перейти від фрагментарного порівняння окремих

властивостей матеріалів до кількісно обґрунтованого аналізу їх збалансованості в контексті масового виробництва.

Додатковим елементом наукової новизни є інтерпретація отриманих результатів у поєднанні з прогнозуванням зміни структури матеріалів у виробництві електромобілів до 2030 року, що дає змогу пояснити збереження провідної ролі сталей нового покоління попри активний розвиток легких металів і композитних систем. Запропонований підхід може бути використаний як аналітична основа для прийняття інженерних рішень на ранніх етапах проектування багатоматеріальних конструкцій електромобілів.

Метою роботи – є аналіз сучасних та перспективних матеріалів для виготовлення автомобілів, оцінка їхніх властивостей і можливостей застосування, а також визначення оптимальних рішень для підвищення надійності, безпеки, енергоефективності та екологічності сучасних транспортних засобів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У статті [1] систематизовано підходи до вибору конструкційних матеріалів у машинобудуванні з урахуванням критеріїв міцності, густини, технологічності та вартості. Автор запропонував універсальні методики оцінювання ефективності матеріалів, які стали основою для порівняльного аналізу сталей, легких сплавів та композитів у даному дослідженні.

У статті [2] розглянуто актуальні тенденції у використанні легких матеріалів для електромобілів та їхній вплив на енергоефективність транспортних систем. Автор робить акцент на сталях нового покоління, алюмінієвих і магнієвих сплавах, а також полімерних композитах, зазначаючи, що до 2035 року частка сталей у конструкціях електромобілів зменшиться майже вдвічі. Особливу увагу приділено проблемі балансу між механічними характеристиками та екологічними матеріалами.

Дослідження [3] присвячене розробленню принципів сталого матеріалознавства для електромобільного транспорту. У роботі запропоновано методологію «Sustainable Material Index» — інтегрального показника, який поєднує механічну ефективність і вуглецеву інтенсивність виробництва. Автори доводять, що полімерні композити нового покоління, особливо із частковим біовмісним компонентом, можуть зменшити викиди CO₂ на 40 % у порівнянні з традиційною сталлю.

У праці [4] здійснено порівняльний аналіз алюмінієвих і композитних конструкцій у контексті проектування електромобілів. Дослідження показує, що використання алюмінієвих сплавів серії бxxx дозволяє зменшити масу кузова до 40 %, тоді як композити забезпечують ще більший потенціал у легких несучих елементах. Автори наголошують, що висока собівартість наразі стримує їхнє широке промислове застосування.

Стаття [5] узагальнює світовий досвід впровадження принципів циркулярної економіки в автомобілебудуванні. Автори підкреслюють, що вторинна переробка алюмінію та сталі досягає 95–98 %, тоді як композити залишаються складними у рециклінгу. У роботі описано сучасні технології піролізу, хімічного відновлення волокон і виробництва біокомпозитів на основі лляних і конопляних волокон.

У дослідженні [6] проведено екологічний та економічний аналіз традиційних методів зварювання. Автори визначили, що автоматизовані варіанти зварювання зменшують енергоспоживання до 25 % і викиди CO₂ на 15–18 % порівняно з ручними процесами, що робить їх перспективними для виробництва корпусів і рам електромобілів.

Авторами роботи [7] розглянуто сучасні шляхи підвищення ефективності процесів TIG-зварювання (використання інертного захисного газу) шляхом оптимізації полярності, геометрії шва та теплового режиму. Отримані результати свідчать про можливість інтеграції TIG-зварювання у виробництво легких алюмінієвих і магнієвих сплавів без втрати якості з'єднань.

Стаття [8] описує технологічні переваги гібридного лазерно-плазмового зварювання, яке поєднує високу точність лазерної обробки з глибиною проплавлення плазмового процесу. Автори зазначають, що цей метод дає змогу ефективно поєднувати різні матеріали — наприклад, алюміній і сталь, що є важливим для створення багатоматеріальних кузовів електромобілів.

У роботі [9] досліджено вплив промислових факторів на якість контактного точкового зварювання. Робота має практичне значення для оцінки експлуатаційної надійності електричних з'єднань у легких металевих конструкціях.

Стаття [10] присвячена розробленню автоматизованого технологічного процесу зварювання металевих виробів у контексті Індустрії 4.0. Запропоновано комп'ютерно-інтегровану систему

контролю параметрів зварювання, яка може бути адаптована до виробництва алюмінієвих та композитних компонентів електромобілів.

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених вибору матеріалів для електромобілів, більшість робіт зосереджені або на аналізі окремих груп матеріалів, або на якісному описі тенденцій без формалізованої кількісної оцінки їх ефективності. У наявних публікаціях недостатньо уваги приділено поєднанню механічних характеристик матеріалів з економічними показниками та екологічними обмеженнями в межах єдиного аналітичного підходу. У даній роботі запропоновано інтегральний підхід до порівняльної оцінки конструкційних матеріалів електромобілів, який базується на використанні коефіцієнта матеріальної переваги, адаптованого до умов електромобільного виробництва. На відміну від існуючих досліджень, у роботі виконано узагальнений кількісний аналіз сталей нового покоління, легких металевих сплавів та полімерних композитів із урахуванням вартості матеріалу та прогнозованих змін структури матеріального складу електромобілів до 2030 року.

Викладення основного матеріалу. Автомобільна промисловість сьогодні переживає масштабну трансформацію, спричинену переходом до електромобільного транспорту, глобальними вимогами енергоефективності, декарбонізації та екологічної відповідальності. У центрі цієї трансформації перебуває матеріалознавча основа конструкцій електромобілів, адже саме вибір матеріалів визначає масу, безпеку, довговічність, собівартість і навіть стратегічну придатність технологій до циркулярної економіки. Кожен кілограм зменшення маси транспортного засобу впливає на запас ходу, споживання енергії та кількість шкідливих викидів, тому оптимізація конструкцій через використання легких, міцних і стійких матеріалів стала одним із ключових напрямів розвитку автомобілебудування. Сучасні тенденції матеріалознавства орієнтовані на пошук оптимального балансу між густиною, питомою міцністю, технологічністю та екологічною стійкістю. Якщо традиційна автомобільна сталь десятиліттями залишалася основним конструкційним матеріалом, то сьогодні відбувається перехід до багатоматеріальних платформ, у яких сталі нового покоління поєднуються з алюмінієвими, магнієвими, титановими й композитними елементами. Такий підхід забезпечує зниження маси кузова електромобіля на 30–50 % без втрати жорсткості та безпеки, а також сприяє підвищенню енергоефективності на 10–15 %.

Дослідження має аналітично-методичний характер і ґрунтується на поєднанні порівняльного аналізу властивостей матеріалів, елементів методології відбору матеріалів за Ешбі та прогнозування розвитку електромобільної галузі. Методика дослідження включає: формування репрезентативних груп матеріалів, що застосовуються або розглядаються для використання в електромобілях; узагальнення фізико-механічних, економічних та екологічних параметрів на основі сучасних літературних джерел; кількісну оцінку ефективності матеріалів із використанням інтегрального коефіцієнта матеріальної переваги; аналітичне порівняння отриманих результатів та їх інтерпретацію з позицій масового і перспективного електромобільного виробництва.

Метою такого аналізу є комплексна оцінка ефективності конструкційних матеріалів для електромобілів із урахуванням фізико-механічних, економічних і екологічних аспектів, а також визначення їх перспектив розвитку до 2030 року. Дослідження має аналітично-оглядовий характер і базується на узагальненні даних провідних наукових баз Scopus, ScienceDirect та SpringerLink за 2020–2025 роки. Для аналізу обрано п'ять типових груп матеріалів: сталі нового покоління (AHSS), алюмінієві та магнієві сплави, титан і полімерні композити. Основними критеріями оцінки виступають густина, міцність на розтяг, модуль пружності, собівартість і обсяг викидів CO₂ під час виробництва. Для кількісної оцінки ефективності використано коефіцієнт матеріальної переваги (K), який інтегрує три основні параметри — міцність, густину та вартість матеріалу. Його застосування ґрунтується на підході Ешбі, рекомендованому для порівняння конструкційних матеріалів різної природи. Формула має вигляд:

$$K = (\sigma - \rho) / C \quad (1)$$

де: σ – нормалізована міцність матеріалу; ρ – нормалізована густина; C – нормалізована вартість матеріалу.

Базові значення для нормалізації:

$$\sigma_n = 1000 \text{ МПа};$$

$$\rho_n = 7,8 \text{ г/см}^3;$$

$$C_n = 1 \text{ €/кг};$$

1. Сталь AHSS;

$$\sigma_n = 1000 / 1000 = 1,00;$$

$$\rho_n = 7,8 / 7,8 = 1,00;$$

$$C_n = 1,0 / 1,0 = 1,00;$$

$$K_{AHSS} = (1,00 - 1,00) / 1,00 \approx 0,128.$$

2. Алюмінієвий сплав бxxx

$$\sigma_n = 350 / 1000 = 0,35;$$

$$\rho_n = 2,7 / 7,8 \approx 0,35;$$

$$C_n = 2,8 / 1,0 = 2,8;$$

$$K_{Al} = (0,35 - 0,35) / 2,8 \approx 0,046.$$

Отримані значення коефіцієнта матеріальної переваги свідчать, що сталі нового покоління мають найвищий інтегральний показник ефективності серед розглянутих матеріалів. Незважаючи на більшу густину, AHSS компенсують масові недоліки високою міцністю та низькою вартістю. Алюмінієві сплави, попри значно меншу густину, демонструють нижче значення коефіцієнта K через обмежену міцність і вищу собівартість. Такий приклад розрахунку підтверджує доцільність використання коефіцієнта K як інженерного інструменту первинного ранжування матеріалів для електромобілебудування та пояснює збереження провідної ролі сталей AHSS у масовому виробництві електромобілів.

Запропонований у роботі підхід відрізняється від класичних карт матеріального вибору Ешбі тим, що орієнтований не на оптимізацію окремої механічної властивості, а на інтегральну оцінку матеріалів у контексті серійного електромобільного виробництва. На відміну від традиційних діаграм «міцність – густина» або «жорсткість – маса», у даному дослідженні враховано економічний фактор, який суттєво обмежує практичне впровадження високоефективних, але дорогих матеріалів. Таким чином, підхід, використаний у роботі, дозволяє перейти від абстрактного матеріалознавчого порівняння до інженерно обґрунтованого вибору матеріалів для реальних конструкцій електромобілів.

Коефіцієнт матеріальної переваги $K = (\sigma - \rho) / C$ використовують саме тому, що він дає можливість поєднати три ключові параметри — міцність, густину та вартість — в один інтегральний показник, придатний для порівняння матеріалів різної природи. Такий підхід відповідає ідеї Ешбі: максимізувати експлуатаційну здатність при мінімізації маси й витрат. На відміну від питомої міцності чи відносної жорсткості, які враховують лише співвідношення механічних характеристик, коефіцієнт K дозволяє одночасно оцінити і технічні, і економічні аспекти, тому є більш придатним для швидкого ранжування матеріалів у практичних інженерних задачах. Наприклад, матеріал може мати високу питому міцність, але бути настільки дорогим, що його застосування стає нерациональним — коефіцієнт K одразу це відображає.

Попри універсальність, модель має суттєві обмеження. Формула є спрощенням і не враховує поведінку матеріалу в реальних умовах роботи, зокрема корозійну стійкість, повзучість, чутливість до ударних навантажень чи температурних змін. Модуль пружності у формулі відсутній, тому для конструкцій, де жорсткість є визначальною, критерій K може дати не чітку оцінку. Крім того, значення σ і ρ для композитів залежать від орієнтації волокон, що не відображається в моделі. Показник K також не враховує екологічних параметрів, таких як енергомісткість виробництва, вибір технології, зварюваність, придатність до переробки чи викиди CO_2 , тому сам по собі не може бути критерієм стійкого матеріального вибору. Він також не відображає реальної собівартості конструкції, оскільки ціна за кілограм не враховує труднощі обробки чи контроль якості. Тому коефіцієнт K доцільно використовувати як первинний орієнтовний індикатор, який надалі доповнюється екологічним та технологічним аналізом, а також розглядом експлуатаційних властивостей матеріалу. В таблиці 1 наведено порівняння основних матеріалів для електромобілів.

Сталі нового покоління (AHSS) залишаються найбільш ефективним матеріалом для масового виробництва електромобілів завдяки поєднанню високої міцності, технологічної сумісності з існуючими процесами зварювання, доступної вартості. Вони використовуються для виготовлення силових елементів кузова, дверних рам, енергопоглинаючих зон і підсилювачів безпеки. У моделей Volkswagen ID.4 та Ford Mustang Mach-E частка AHSS перевищує 45 % каркаса кузова, що забезпечує високу пасивну безпеку при зниженні маси до 15 % порівняно з традиційними сталями. Крім того, сталі цієї категорії мають один із найнижчих показників викидів CO_2 серед усіх металів (близько 2 кг/кг продукції), що робить їх найбільш екологічно раціональними для серійного виробництва.

Алюмінієві сплави серії бxxx демонструють оптимальний баланс між питомою жорсткістю, легкою вагою та технологічністю лиття. Вони забезпечують зниження маси кузова до 40 % і активно використовуються у технології Giga Casting, впровадженій компаніями Tesla, Volvo для

виготовлення великих несучих елементів кузова, підрамників та інтегрованих секцій батарейних платформ. Алюміній характеризується високим рівнем переробності (до 98 %) і стабільністю властивостей при вторинному плавленні, що відповідає принципам економіки. Його застосування дозволяє не лише підвищити енергоефективність, але й скоротити загальний життєвий вуглецевий слід автомобіля. Магнієві сплави, зокрема AZ91, відзначаються найнижчою густиною серед конструкційних металів, що дає можливість зменшити масу окремих вузлів на 60–70 %. Їх активно використовують у виробництві легких корпусів електронних модулів, кронштейнів, елементів рульового управління та опор двигунів, як це реалізовано в BMW та Nissan Leaf. Основною перевагою магнієвих сплавів є висока питома жорсткість, однак недоліками залишаються підвищена схильність до корозії та складність у зварюванні. Для усунення цих обмежень застосовуються полімерно-керамічні покриття та комбіновані технології термічного напилення, які подовжують термін служби деталей у 1,5–2 рази.

Титанові сплави, зокрема Ti-6Al-4V, демонструють високу міцність і корозійну стійкість, що робить їх незамінними у вузлах із підвищеними навантаженнями — елементах підвіски, болтах акумуляторних модулів, кріпленнях силових компонентів. Їх застосування характерне для високотехнологічних моделей, де пріоритетом є довговічність і мінімальна маса при максимальній жорсткості. Однак надвисока собівартість (≈ 18 €/кг) обмежує масове впровадження титану в серійне виробництво.

Полімерні композити на основі вуглеволокна займають місце серед конструкційних матеріалів майбутнього. Вони забезпечують зниження маси кузова на 60–65 % без втрати жорсткості, мають високі вібраційні характеристики та сумісні з адитивними технологіями. У преміальних електромобілях, таких як BMW використовується для виготовлення дахових панелей, капотів, каркасів дверей. Головним викликом залишається висока вартість виробництва й обмежена переробність — сьогодні лише 15–20 % композитів підлягають вторинному використанню. Проте впровадження методів піролізу та хімічного рециклінгу поступово дозволяє зберігати механічні властивості вуглеволокна і повторно використовувати їх у нових матеріалах. Метою проведеного аналізу є не відкриття нових матеріалів, а кількісне обґрунтування доцільності їх використання в конструкціях електромобілів з позицій сучасних економічних і технологічних обмежень. Навіть для добре відомих матеріалів отримані результати дозволяють виявити закономірності, які не є очевидними при якісному аналізі, зокрема пояснити причини збереження високої частки сталей нового покоління у масовому виробництві електромобілів.

Табл. 1.

**Порівняння основних матеріалів для електромобілів
(узагальнено за Yan, 2025; Ghoshetal., 2025)**

Матеріал	Густина, г/см ³	Міцність, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Ціна, €/кг	Викиди CO ₂ , кг/кг	Коеф. К, ум. од.
Сталь AHSS	7,8	1000	210	1,0	2,1	0,128
Алюміній bxxx	2,7	350	70	2,8	12,0	0,046
Магній AZ91	1,8	250	45	3,5	26,0	0,040
Титан Ti-6Al-4V	4,5	950	110	18,0	40,0	0,012
Вуглепластик	1,6	600	80	20,0	30,0	0,019

Отримані результати свідчать, що ефективність матеріалів для електромобілів визначається не максимальними значеннями окремих параметрів, а їх збалансованим поєднанням. Зокрема, матеріали з мінімальною густиною не завжди демонструють найвищу конструкційну ефективність через обмеження міцності або високу собівартість. Водночас матеріали із середніми значеннями густини, але високою міцністю та доступною вартістю, забезпечують більш сприятливе співвідношення параметрів для масового виробництва. Такий результат пояснює збереження домінуючої ролі сталей нового покоління у конструкціях електромобілів, попри активний розвиток легких металів і композитів. Таким чином, перехід до багатоматеріальних платформ слід розглядати не як заміну одного матеріалу іншим, а як раціональний розподіл функцій між матеріалами відповідно до їхніх сильних сторін.

Вплив густини матеріалу на узагальнену конструкційну ефективність проілюстровано на рис. 1, де наведено залежність коефіцієнта матеріальної переваги K від густини ρ . Рис. 1 демонструє, що зменшення густини матеріалу не приводить автоматично до підвищення ефективності. Незважаючи на мінімальну густину магнієвих сплавів і полімерних композитів, їх значення

коефіцієнта K залишаються нижчими порівняно зі сталями нового покоління, що свідчить про нелінійний характер залежності $K(\rho)$ та необхідність врахування комплексу параметрів.

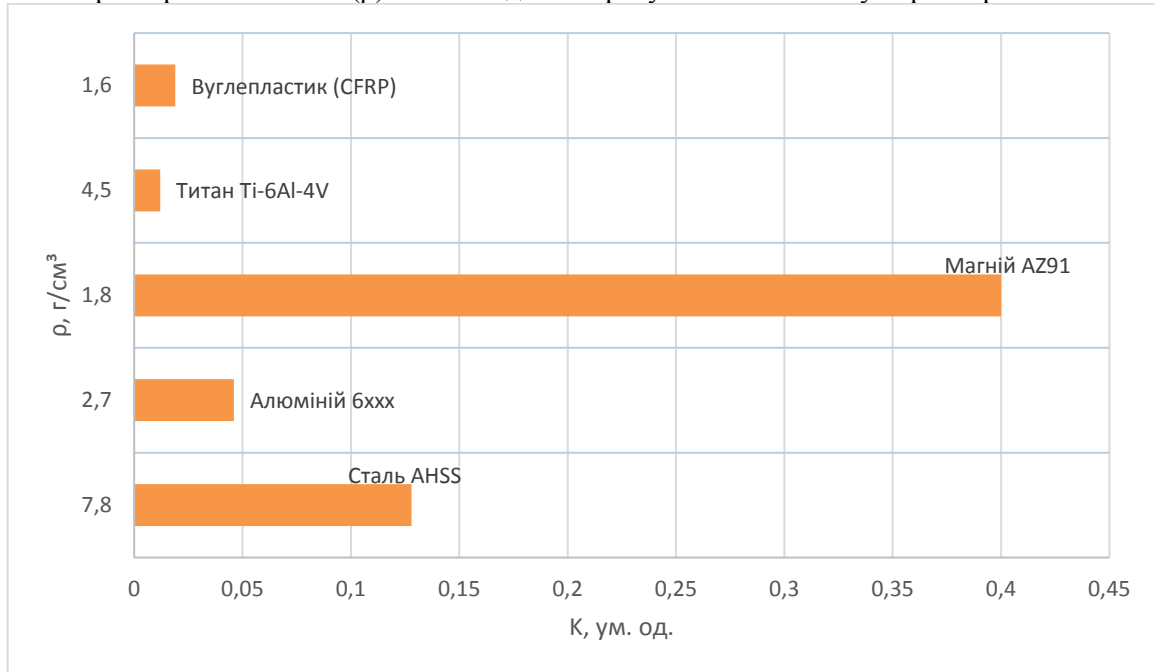


Рис. 1. Залежність K від густини (ρ)

Аналіз показує відсутність прямої лінійної залежності між густиною матеріалу та значенням коефіцієнта K . Зменшення густини матеріалу саме по собі не призводить до зростання ефективності, що особливо характерно для магнієвих сплавів і полімерних композитів. Таким чином, графік підтверджує нелінійний характер залежності $K(\rho)$ та свідчить про необхідність урахування комплексу параметрів при виборі матеріалів для електромобілів.

Не менш показовим є вплив вартості матеріалу, який відображено на рисунку 2, де наведено залежність коефіцієнта матеріальної переваги від ціни. Рисунок 2 чітко демонструє визначальну роль економічного чинника: сталі AHSS займають домінуючу позицію завдяки найнижчій вартості при високих механічних характеристиках. Алюмінієві та магнієві сплави забезпечують лише помірні значення коефіцієнта K , що обмежує їх застосування вузлами, де мінімізація маси є критичною. Значне зниження коефіцієнта K для титанових сплавів підтверджує, що, попри унікальні експлуатаційні властивості, їх використання економічно виправдане лише у спеціалізованих або преміальних сегментах.

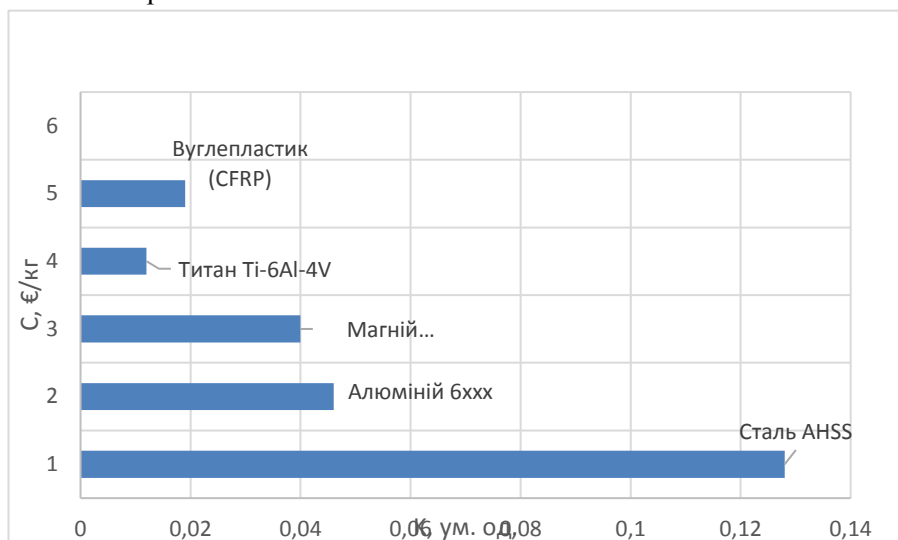


Рис. 2. Залежність K від вартості

Аналіз залежності коефіцієнта матеріальної переваги від вартості матеріалу свідчить про наявність чітко вираженої оберненої тенденції: зі зростанням ціни матеріалу значення коефіцієнта K суттєво зменшується. Залежність демонструє визначальну роль економічного чинника при

порівнянні різнорідних матеріалів. Зокрема, навіть матеріали з високими механічними характеристиками, такі як титанові сплави, характеризуються низькою ефективністю в межах запропонованого критерію через високу собівартість. Отриманий результат підтверджує доцільність використання коефіцієнта K для інженерного ранжування матеріалів у контексті масового електромобілебудування.

Побудовані графіки залежності коефіцієнта матеріальної переваги K від густини та вартості матеріалів дозволяють провести комплексне порівняння конструкційної ефективності п'яти типових груп матеріалів, що застосовуються в електромобілебудуванні. Отримані залежності демонструють наявність чітко виражених закономірностей, які визначають доцільність використання того чи іншого матеріалу в контексті масового виробництва електромобілів. По-перше, аналіз залежності K від густини показує, що низька густина сама по собі не гарантує високої конструкційної ефективності. Незважаючи на мінімальну густина, полімерні композити та магнієві сплави демонструють менший коефіцієнт K порівняно зі сталлю AHSS. Це зумовлено тим, що їхня міцність на розтяг недостатньо висока для повної компенсації в масі, а в окремих випадках додаткове обмеження накладає висока собівартість. Таким чином, залежність $K(\rho)$ має нелінійний характер: матеріали легкої групи дають переваги лише за умов високої міцності або низької вартості, а оптимальний баланс параметрів спостерігається саме у сталей нового покоління.

На відміну від табличних даних, графічне представлення результатів дозволяє виявити характер впливу окремих параметрів на інтегральну ефективність матеріалів, а також візуалізувати тенденції, які не є очевидними при дискретному порівнянні окремих значень. Слід зазначити, що отримане ранжування матеріалів не є універсальним і може змінюватися залежно від зовнішніх умов. Зокрема, за умов істотного зниження вартості вуглепластиків або впровадження масштабних технологій їх рециклінгу, коефіцієнт K для композитів може зрівнятися або перевищити показники сталей нового покоління. Аналогічно, посилення регуляторних вимог щодо вуглецевого сліду виробництва може зменшити відносну ефективність металевих матеріалів на користь полімерних і біокомпозитних систем.

Таким чином, візуалізація обох залежностей підтверджує, що сталеві AHSS залишаються найбільш збалансованим матеріалом для масового виробництва завдяки оптимальному співвідношенню міцності, густини та вартості. Легкі метали (Al та Mg) демонструють перспективи лише при зниженні їх собівартості. З екологічної точки зору, сталі та алюміній залишаються лідерами за показниками утилізації (95–98 %), тоді як полімерні композити потребують подальших досліджень у сфері замкненого циклу переробки. Найменші викиди CO_2 за життєвим циклом спостерігаються у сталей нового покоління, тоді як виробництво титану характеризується найвищою енергоемністю. У цьому контексті саме розвиток технологій рециклінгу, енергоефективного плавлення та відновлення волокон стане визначальним фактором для переходу до екологічно збалансованого електромобілебудування.

Прогнозування зміни структури матеріалів у виробництві електромобілів ґрунтується на трендовому аналізі числових даних, взятих із технічних звітів IEA (2023–2024), аналітичних оглядів McKinsey (2023), а також матеріалознавчих досліджень Yan (2025) та Ghoshetal. (2024–2025). Для побудови прогнозування застосовано метод композитного тренду, який поєднує екстраполяцію темпів зростання ринку легких металів і композитів, аналіз часток використання матеріалів у сучасних моделях електромобілів, а також зіставлення з вимогами щодо декарбонізації. На основі цих джерел сформовано діаграму (рис. 2), що демонструє очікуване зростання частки композитів та алюмінію, скорочення домінування AHSS і поява сегменту біополімерів.

Методологічною основою прогнозування є підхід, який поєднує екстраполяцію наявних тенденцій використання матеріалів у сучасних моделях електромобілів та експертну оцінку впливу регуляторних і технологічних факторів. Для кожної групи матеріалів аналізувалися середньорічні темпи зміни частки застосування на основі відкритих галузевих звітів та статистичних даних за період 2015–2024 років. Отримані тренди екстраполювалися до 2030 року з урахуванням обмежень, пов'язаних із технологічною готовністю матеріалів та економічною доцільністю їх масового впровадження.

Слід зазначити, що запропонований прогноз не має характеру детермінованого моделювання та не враховує можливих технологічних проривів, змін у законодавстві або різких коливань вартості сировини. Його доцільно розглядати як орієнтовну сценарну оцінку, яка відображає найбільш імовірний напрям розвитку матеріальної структури електромобілів за умов збереження сучасних тенденцій. Такий підхід широко застосовується у матеріалознавчих і техніко-економічних дослідженнях на ранніх етапах аналізу.

Слід підкреслити, що наведені значення часток матеріалів до 2030 року мають інтервальний характер. З огляду на невизначеність економічних, технологічних та регуляторних факторів, похибка прогнозування може становити $\pm 5-7\%$ для окремих груп матеріалів. Тому отримані результати слід трактувати не як точні значення, а як орієнтовні діапазони найбільш імовірного розвитку матеріальної структури електромобілів.



Рис. 3. Прогнозування структури матеріалів у виготовленні електромобілів на 2030 рік

Представлений прогноз свідчить не про витіснення традиційних матеріалів, а про їх функціональну трансформацію в межах багатоматеріальних платформ. Зменшення частки сталей нового покоління супроводжується зростанням використання алюмінію та композитів у тих елементах конструкції, де мінімізація маси має критичне значення. Водночас сталі зберігають ключову роль у силових і енергопоглинаючих зонах, що підтверджує доцільність еволюційного, а не революційного сценарію розвитку матеріалів електромобілів.

Така динаміка свідчить про поступовий перехід галузі від традиційної металомісткої парадигми до інтегрованих багатоматеріальних платформ, де ключову роль відіграють екологічність, переробність і цифровізація виробничих процесів. Очікується, що до 2030 року понад 70 % компонентів електромобіля виготовлятимуться з матеріалів, придатних до повторного використання. Прогноз побудовано на основі аналізу з використанням екстраполяції галузевих даних за 2015–2024 р.

Виконаний аналіз підтверджує, що сталі нових генерацій (AHSS) на даний час лишаються основним конструкційним складником у розробці електромобілів завдяки їхньому ідеальному балансу міцності, ціни та можливостей обробки. Водночас напрямки розвитку сфери вказують на поступовий рух до багатоскладових структур майбутнього, де метали, композити та біополімери з'єднуються у цілісну гнучку конструкційну основу. Такі системи гарантують зниження ваги, зростання енергозбереження та збільшення робочих властивостей частин кузова і ходової частини. Таким чином, результати, узагальнені в таблиці 1 та проілюстровані на графіках 1–3, підтверджують, що ефективність конструкційних матеріалів електромобілів визначається не окремими властивостями, а їх комплексним поєднанням механічних, економічних та екологічних параметрів. Запропонований інтегральний підхід до оцінювання матеріалів дозволяє перейти від інтуїтивного або емпіричного вибору до кількісно обґрунтованих інженерних рішень, спрямованих на зменшення маси електромобіля, підвищення його енергоефективності та зниження собівартості без втрати міцності й рівня безпеки. Отримані результати можуть бути безпосередньо використані на ранніх етапах проектування електромобілів для формування раціональної матеріальної структури кузова та несучих елементів, а також слугувати основою для подальших досліджень, пов'язаних з оптимізацією багатоматеріальних платформ, розвитком технологій рециклінгу та зменшенням вуглецевого сліду транспортних засобів. У більш широкому контексті представлений підхід сприяє формуванню науково обґрунтованих рішень у галузі сталого транспортного машинобудування та підвищенню конкурентоспроможності електричного транспорту на глобальному ринку.

Висновки. Отримані закономірності дозволяють сформулювати узагальнене бачення перспектив розвитку матеріальної структури електромобілів. Очікувану зміну часток основних груп матеріалів у виробництві електромобілів до 2030 року відображено на рисунку 3. Представлене прогнозування свідчить про поступове зменшення домінування сталей AHSS при одночасному зростанні використання алюмінію, полімерних композитів і появи біополімерних матеріалів. Така динаміка зумовлена розвитком технологій рециклінгу, підвищенням вимог до декарбонізації та впровадженням цифрових і адитивних методів виробництва. Водночас прогнозування не передбачає повної відмови від сталей, а вказує на їх інтеграцію в багатоматеріальні платформи відповідно до функціонального призначення елементів конструкції.

У межах запропонованого критерію встановлено, що при вартості матеріалу понад 5 €/кг коефіцієнт матеріальної переваги K різко знижується незалежно від рівня міцності. Це визначає економічну межу доцільності застосування титанових сплавів і вуглепластиків у масовому електромобілебудуванні. Показано, що зменшення густини матеріалу нижче 2 г/см³ не забезпечує автоматичного підвищення конструкційної ефективності без відповідного зростання міцності або зниження вартості, що принципово важливо при оцінці перспектив магнієвих сплавів і композитів. Запропонований підхід демонструє, що ефективний вибір матеріалів для електромобілів визначається не максимізацією окремих властивостей, а пошуком збалансованого компромісу між масою, вартістю, міцністю та умовами серійного виробництва.

Список використаних джерел

1. Ashby M. F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 6th ed. Elsevier, 2017. — P. 110–145.
2. Yan H. *Lightweight Materials for Electric Vehicles: Trends and Sustainability Challenges*. *Journal of Advanced Manufacturing*, 2025, Vol. 38. — P. 24–39.
3. Ghosh P., Lee J., Zhang T. *Sustainable Material Design for Electric Mobility*. *Materials Today*, 2024, Vol. 56. — P. 112–128.
4. Singh A., Patel R. *Comparative Study of Aluminum and Composite Structures in Electric Vehicle Design*. *Renewable Energy Engineering*, 2023, Vol. 18, No. 2. — P. 201–215.
5. Müller S., Reiter M. *Circular Economy in Automotive Manufacturing: A Review of Recyclable Composites*. *Journal of Cleaner Production*, 2022, Vol. 370. — P. 135–149.
6. -González C., Los Santos-Ortega J. *Environmental and Economic Analyses of TIG, MIG, MAG and SMAW Welding Processes*. University of La Rioja, Spain, 2023. — P. 55–70.
7. Zhao H., Zhang S., Chen H., Li Y. *Methods to Improve TIG Welding Efficiency*. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2024, Vol. 77. — P. 2231–2245.
7. Коржик В. М., Хаскін В. Ю. та ін. Гібридне лазерно-плазмове зварювання: ефективність і нові можливості. *Автоматичне зварювання*, № 12, 2023. — С. 22–30.
8. Советченко Я. В. *Оптимізація технології контактного точкового зварювання в умовах дії промислових факторів*. Київ, 2021. — С. 64–80.
9. Максимов Д. М. *Розробка автоматизованого технологічного процесу зварювання металевих виробів*. Харків: ХНУРЕ, 2025. — С. 48–95.