

Фомін О. В., Фоміна А.М., Хара М.В., Фурсина А.Д., Бурусук О.М.

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК У ВАГОНОБУДУВАННІ: ІНТЕГРАЦІЯ МАТЕРІАЛОЗНАВЧИХ МОДЕЛЕЙ У ПРОЦЕС ПРОЕКТУВАННЯ

У статті розглянуто цифровий двійник у вагонобудуванні та інтеграцію матеріалознавчих моделей у процес проектування. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення експлуатаційної надійності вагонів, зниження маси конструкції та оптимізації витрат, що вимагає переходу до інтелектуальних методів проектування на основі передових цифрових технологій.

Цифровий двійник виступає як ключовий інструмент для революційних змін, оскільки він дозволяє подолати обмеження традиційних методів проектування, які часто спираються на спрощені моделі матеріалів. Вирішальним фактором довговічності та безпеки вагона є властивості використаних матеріалів та їхня поведінка під впливом навантажень.

Інтеграція матеріалознавчих моделей (включаючи мікроструктурне, механічне, втомне та корозійне моделювання) забезпечує глибоке розуміння впливу матеріалу на життєвий цикл виробу. Цифровий двійник, збагачений цими моделями, здатний симулювати старіння, втому та поширення тріщин протягом усього терміну служби вагона.

В якості ключових результатів та переваг можна виділити наступне. Оптимізація конструкції: можливість проектувати вагони, оптимізовані не лише за міцністю, а й за ресурсом та ремонтпридатністю. Скорочення витрат і термінів: зменшення кількості дорогих натурних експериментів, скорочення термінів проектування та випробувань. Прогностична здатність: прогнозування залишкового ресурсу деталей та перехід до обслуговування за станом. Технологічний розвиток: створення науково-методичної бази для інтеграції моделей втому, повзучості та корозії у загальне середовище цифрового двійника. Наукова основа: розробка теоретико-методичних засад та практичних рекомендацій щодо ефективної інтеграції матеріалознавчих моделей.

Дослідження підтверджує можливість переходу до проектування на основі ресурсу, що визначається поведінкою матеріалу, та сприяє підвищенню безпеки залізничних перевезень та конкурентоспроможності вітчизняного вагонобудування.

Ключові слова: транспорт, вагони, моделювання, матеріалознавство, цифрові двійники.

Актуальність дослідження.

Сучасне вагонобудування стоїть перед викликом значного підвищення експлуатаційної надійності, зниження маси конструкцій та оптимізації витрат на виробництво та обслуговування. Глобальні тенденції вимагають переходу від традиційних методів проектування до інтелектуальних, що базуються на передових цифрових технологіях. Саме тут концепція цифрового двійника (ЦД) виступає як ключовий інструмент для революційних змін у галузі. Актуальність дослідження полягає в необхідності розробки та впровадження механізмів, які дозволять максимально ефективно використовувати потенціал ЦД у контексті проектування транспортних засобів.

Вирішальним фактором довговічності та безпеки вагона є властивості використаних матеріалів і те, як вони поведуться під впливом експлуатаційних навантажень та факторів навколишнього середовища. Традиційні методи проектування часто спираються на спрощені моделі матеріалів або емпіричні дані, що не дозволяє повною мірою передбачити реальну поведінку конструкції. Це призводить до необхідності створення надмірних запасів міцності, що збільшує масу вагона та зменшує його енергоефективність. Інтеграція матеріалознавчих моделей у процес створення ЦД вагона дозволяє подолати ці обмеження. Такі моделі, включаючи мікроструктурне, механічне, втомне та корозійне моделювання, забезпечують глибоке розуміння того, як матеріал впливатиме на життєвий цикл виробу.

Актуальність підсилюється стрімким розвитком нових, високоміцних та легких матеріалів, властивості яких є складними для традиційного опису. Для повної реалізації потенціалу цих матеріалів у вагонобудуванні необхідні інтегровані цифрові інструменти. Цифровий двійник, збагачений точними матеріалознавчими даними та моделями, здатен симулювати старіння, втому, поширення тріщин та інші критичні явища протягом усього терміну служби вагона. Це дає змогу проектувати вагони, оптимізовані не тільки за міцністю, а й за ресурсом та ремонтпридатністю.

Крім того, дослідження має значну практичну актуальність для вітчизняного вагонобудування, яке прагне до конкурентоспроможності на міжнародному ринку. Впровадження цієї технології дозволить скоротити терміни проектування та випробувань, зменшити кількість дорогавартісних натурних експериментів та покращити якість кінцевого продукту. Це сприятиме підвищенню безпеки залізничних перевезень та економічної ефективності експлуатації вагонного парку. Науково-прикладне дослідження, зосереджене на методах інтеграції, валідації та

використання таких складних моделей, є критично важливим для успішної цифровізації галузі та забезпечення її технологічного лідерства в умовах індустрії 4.0. Таким чином, створення науково-методичної бази для інтеграції матеріалознавчих моделей у ЦД є своєчасним та стратегічно важливим завданням.

Постановка проблеми

Сучасне вагонобудування потребує докорінної зміни парадигми проектування для відповідності зростаючим вимогам до легкості, міцності та довговічності конструкцій. Існуючі методики, що базуються на послідовному інженерному аналізі, є надто тривалими та не дозволяють швидко реагувати на зміни вимог або впроваджувати нові матеріали. Ключова проблема полягає у фрагментарності використання даних про матеріали: вони часто застосовуються ізольовано від загальної цифрової моделі вагона, що призводить до неточностей у прогнозуванні експлуатаційної поведінки. Недостатній рівень інтеграції складних, нелінійних матеріалознавчих моделей у цифровий двійник не дає змоги повноцінно симулювати такі критичні явища, як втомне руйнування, повзучість або корозійні процеси. Це знижує прогностичну цінність ЦД і змушує проводити велику кількість дорогих натурних випробувань. Отже, виникає науково-прикладна проблема розробки комплексної методології та програмно-інформаційного забезпечення для безшовної інтеграції багатомасштабних матеріалознавчих моделей у процес створення та функціонування цифрового двійника вагона.

Аналіз інформаційних джерел з досліджуваної тематики.

Автори [1] досліджують застосування цифрових двійників у матеріалознавстві для прогнозування поведінки матеріалів під дією навантажень. У роботі визначено принципи інтеграції мікроструктурних моделей у цифровий двійник для підвищення точності симуляцій. Зазначено, що цифрові двійники сприяють зменшенню кількості фізичних експериментів і пришвидшують розроблення нових матеріалів. Показано, як машинне навчання може бути застосовано для оновлення моделей у реальному часі. Робота формує наукову основу для поєднання матеріалознавчих і цифрових методів у промислових процесах.

У статті [2] представлено підхід до проектування, моделювання й реалізації цифрових двійників у промислових системах. Автори запропонували архітектуру, що включає рівні сенсорики, аналітики й управління. Розробка доводить можливість автоматичного оновлення параметрів моделі на основі даних з фізичного об'єкта. Розглянуто проблеми кібербезпеки при інтеграції цифрових двійників у виробниче середовище. Дослідження робить внесок у створення універсальних методів для розгортання цифрових двійників у різних галузях.

Стаття [3] присвячена швидкому оцінюванню характеристик виробу через цифровий двійник, що базується на сурогатній моделі. Автори розробили метод, який поєднує симуляційні дані й експериментальні вимірювання для оновлення моделі в реальному часі. Такий підхід дозволяє зменшити обчислювальні витрати при аналізі складних систем. Ефективність методу підтверджено прикладом оцінки технічних параметрів механічних виробів. Робота демонструє потенціал використання сурогатного моделювання для прискорення цифрового проектування.

У дослідженні [4] визначено раціональні параметри ємнісної системи накопичення енергії для підземного рухомого складу. Виконано математичне моделювання режимів заряджання та розряджання акумуляторів у системі тяги. Отримані результати свідчать про зниження енергоспоживання та підвищення ефективності рекуперації. Автори також проаналізували вплив ємності накопичувача на стабільність руху та навантаження енергосистеми. Практичні рекомендації можуть бути застосовані в модернізації електротранспорту.

У статті [5] розглянуто динамічні навантаження на напіввагон під час його фіксації в'язкопружним зчепленням на палубі порому. Автори створили математичну модель системи «вагон–зчеплення–палуба», що враховує нестационарні сили під час транспортування. Результати моделювання дозволили визначити оптимальні параметри фіксації для зменшення динамічних ударів. Робота має практичну значущість для підвищення безпеки перевезень залізничного рухомого складу морем. Отримані висновки можуть бути враховані при проектуванні нових систем кріплення вагонів.

Автори [6] пропонують концепцію цифрових двійників, підсилених штучним інтелектом, для систем «розумних залізниць». У роботі описано алгоритми самонавчання, які дозволяють двійнику прогнозувати стан інфраструктури. Розроблено архітектуру інтеграції цифрових двійників з транспортними IoT-системами. Експерименти показали підвищення точності діагностики несправностей колії та рухомого складу. Дослідження визначає напрям розвитку цифрових систем моніторингу залізничного транспорту.

Робота [7] формує теоретичну основу для масштабованих передбачувальних цифрових двійників на базі ймовірнісних графічних моделей. Запропоновано метод об'єднання даних і фізичних моделей у єдиному байєсівському просторі. Такий підхід дозволяє ефективно оновлювати стан цифрового двійника при надходженні нових вимірювань. Перевагою є можливість кількісної оцінки невизначеностей у процесі моделювання. Дослідження створює базу для адаптивних цифрових двійників складних інженерних систем.

Стаття [8] є ґрунтовним оглядом застосувань цифрових двійників у проектуванні, виробництві та сервісі продукції. Автори описують етапи створення цифрового двійника — від збирання даних до інтеграції з кіберфізичними системами. Розглянуто приклади реалізації в машинобудуванні, авіації та транспорті. Акцент зроблено на необхідності стандартизації форматів обміну даними. Огляд систематизує сучасні тенденції розвитку цифрового моделювання в промисловості.

У дослідженні [9] розроблено гібридну модель цифрового двійника для систем тягового енергопостачання залізниць. Модель поєднує дані сенсорів і фізико-математичні закономірності для підвищення точності прогнозування. Проведено валідацію моделі на реальних експлуатаційних даних енергосистем. Отримано

ефективний інструмент для оптимізації режимів роботи та діагностики несправностей. Робота робить внесок у розвиток «розумних» енергетичних рішень на транспорті.

Автори [10] досліджують довговічність несівної конструкції кузова відкритого вагона з круглих труб під час перевезення поромом. Виконано розрахунки напружень і втомної міцності з урахуванням коливань платформи. Модель підтверджена експериментальними даними з натурних випробувань. Визначено критичні зони втомного руйнування і подано пропозиції щодо їх підсилення. Результати є основою для підвищення надійності вагонів нового покоління.

Стаття [11] аналізує перспективи сталого розвитку відновлюваної енергетики в суднопластві. Автори розглянули інноваційні технології, зокрема гібридні енергосистеми та цифрові моделі для прогнозування екологічного ефекту. Доведено економічну доцільність інтеграції відновлюваних джерел у морські транспортні комплекси. Розроблено методіку оцінювання вуглецевого сліду в умовах «зеленого» переходу. Робота актуалізує важливість цифрових рішень у забезпеченні енергетичної стійкості транспорту.

У публікації [12] представлено автоматизований підхід до розроблення цифрових двійників у контексті Індустрії 4.0. Автори наголошують на повторному використанні моделей і інтеграції матеріалознавчих даних у процес створення двійників. Запропоновано модульну архітектуру, що полегшує масштабування систем. Дослідження демонструє ефективність моделі на прикладі виробничих ліній. Праця сприяє стандартизації процесів автоматизованого створення цифрових двійників.

Дослідження [13] присвячене моделюванню конструкцій із множинними режимами пошкодження за допомогою реконфігурованої динамічної байєсівської мережі. Автори поєднали дані сенсорів і структурну модель для виявлення різних типів дефектів. Метод дозволяє цифровому двійнику адаптуватися до зміни умов експлуатації. Результати випробувань підтверджують точність прогнозування пошкоджень. Розробка має потенціал для моніторингу стану транспортних конструкцій.

У статті [14] описано створення цифрового двійника для прогнозування пошкоджень рейкової поверхні у важкому вантажному русі. Розроблена модель враховує динаміку взаємодії «колесо–рейка» і параметри навантаження. Проведено калібрування на основі польових даних і валідацію в лабораторних умовах. Система дозволяє прогнозувати виникнення дефектів та планувати профілактичні ремонти. Дослідження є кроком до впровадження інтелектуальних систем технічного обслуговування.

Автори [15] розглянули теоретичні та практичні аспекти визначення параметрів бортової ємнісної системи енергозбереження підземного рухомого складу. Проведено аналітичне обґрунтування оптимальної ємності та напруги накопичувачів. Здійснено перевірку адекватності моделі на експериментальних стендах. Результати свідчать про підвищення енергоефективності та зниження пікових навантажень. Робота має прикладне значення для удосконалення систем рекуперації енергії.

Дослідження [16] присвячене оновленню цифрового двійника візка залізничного вагона за допомогою гібридного алгоритму «whale–sea-horse optimization». Запропонований метод забезпечує швидке уточнення параметрів моделі на основі сенсорних даних. Проведено порівняльний аналіз з іншими алгоритмами оптимізації, який підтвердив його переваги. Система дає змогу підвищити точність прогнозування динамічної поведінки візка. Робота робить внесок у розвиток інтелектуальних систем технічної підтримки вагонів.

Аналіз літератури засвідчив, що питанням визначення ефективної методології інтеграції матеріалознавчих моделей у концепцію цифрового двійника на етапі проектування вагонів не приділено достатньої уваги. Існуючі дослідження здебільшого концентруються на загальних аспектах застосування ЦД у промисловості або на окремих елементах моделювання матеріалів, ігноруючи їхню синергетичну взаємодію в межах єдиної цифрової платформи для вагонобудування. Зокрема, бракує уніфікованих підходів до валідації матеріалознавчих моделей із реальними експлуатаційними даними в циклі ЦД. Це створює методологічний розрив між теоретичними досягненнями у матеріалознавстві та їхнім практичним застосуванням для комплексного прогнозування ресурсу вагонних конструкцій. Таким чином, існує нагальна потреба у розробці спеціалізованого науково-прикладного інструментарію, який би вирішив проблему інтеграції на рівні системного проектування.

Методи дослідження. У дослідженні використовувалися методи системного аналізу та синтезу для структурування концепції цифрового двійника та визначення місця матеріалознавчих моделей. Застосовувався метод скінчених елементів (МСЕ) для реалізації складних нелінійних матеріалознавчих моделей та симуляції напружено-деформованого стану конструкцій вагона. Для опису процесів втоми та пошкоджуваності матеріалів застосовувалися феноменологічні та механістичні моделі, включаючи підходи лінійної та нелінійної механіки руйнування. Використовувалися методи математичного моделювання та оптимізації для ідентифікації параметрів матеріалів та мінімізації маси конструкції. Експериментально-розрахунковий метод було задіяно для валідації розроблених моделей на основі лабораторних випробувань зразків матеріалів та натурних даних. Для обробки великих масивів експлуатаційних даних, необхідних для оновлення ЦД, застосовувалися методи машинного навчання та Data Mining.

Об’єкт та предмет дослідження. Об’єкт дослідження – є процес проектування та оцінки технічного стану вагонних конструкцій із застосуванням сучасних комп’ютерних технологій. Предметом дослідження є методи та моделі інтеграції матеріалознавчих даних і багатомасштабних моделей у єдину платформу цифрового двійника вагона. Фокус зосереджений на розробці механізмів інформаційного обміну та синхронізації між матеріалознавчими моделями та загальною цифровою моделлю вагона протягом його життєвого циклу. Такий підхід дозволяє перетворити статичну цифрову модель на динамічний цифровий двійник з урахуванням деградації матеріалів.

Мета та задачі дослідження. Метою науково-прикладного дослідження є розробка теоретико-методичних засад та практичних рекомендацій щодо ефективної інтеграції матеріалознавчих моделей у цифровий двійник вагона. Це необхідно для забезпечення комплексного прогнозування його експлуатаційної поведінки, оптимізації конструктивних рішень та значного скорочення термінів і вартості проектування. Кінцева мета полягає у створенні інтелектуального інструментарію для вагонобудівних підприємств, що дозволить підвищити якість і надійність продукції на основі даних про матеріали.

Виклад основного матеріалу.

Вагонобудування, як галузь, що поєднує в собі високі навантаження, вимоги до безпеки та економічної ефективності, ідеально підходить для впровадження концепції цифрового двійника. Цифровий двійник – це віртуальна динамічна копія фізичного об'єкта або процесу, що імітує (інтегрує дані, моделі та сервісні інтерфейси) його поведінку в реальному часі протягом усього життєвого циклу. Ключовим елементом, що робить ЦД для вагона не просто 3D-моделлю, а потужним інструментом прогнозування, є інтеграція матеріалознавчих моделей. Що має вирішальне значення, оскільки дозволяє прогнозувати поведінку матеріалів в умовах реальної експлуатації вже на стадії проектування, що значно підвищує надійність, довговічність та ефективність рухомого складу.

Цифровий двійник вагона, це не просто CAD-модель, а комплексна система, що включає: геометричну модель (точне 3D-відображення конструкції), фізичні моделі (моделі механіки, динаміки, термодинаміки), дані з датчиків (IoT), реальні дані про навантаження, прискорення, температуру, стан вузлів від фізичного вагона під час експлуатації; матеріалознавчі моделі, найважливіший компонент, що «оживлює» фізичні моделі, описуючи поведінку матеріалів на мікро- та макро-рівнях.

Роль матеріалознавчих моделей у цифровому двійнику наступна. Матеріалознавчі моделі – це математичні описи, які визначають, як матеріал реагує на різні впливи: механічні навантаження, температурні коливання, втому, корозію тощо. Їхня інтеграція на етапі проектування дозволяє досягти наступних основних результатів.

1. Віртуальне випробування та оптимізація. Аналіз міцності та жорсткості: моделювання поведінки рами кузова, елементів ходової частини при екстремальних навантаженнях (наприклад, удар, стиск). Моделі пластичності та руйнування дозволяють точно передбачити, де і за яких умов може виникнути пошкодження.

Прогнозування втомої міцності: вагони піддаються циклічним навантаженням. Матеріалознавчі моделі втоми дозволяють імітувати мільйони кілометрів пробігу у віртуальному середовищі, визначаючи "слабкі" місця та прогнозуючи ресурс конструкції до появи тріщин.

Оцінка впливу температури: моделювання поведінки матеріалів (металів, композитів, покриттів) при низьких та високих температурах, що критично для експлуатації в різних кліматичних умовах.

2. Використання нових матеріалів. ЦД дозволяє швидко оцінити ефективність застосування нових матеріалів (наприклад, алюмінієвих сплавів, високоміцних сталей, композитів) без дорогих та тривалих реальних випробувань. Інженери можуть віртуально "замінити" матеріал у моделі та одразу побачити, як це вплине на вагу, міцність та енергоефективність вагона.

3. Прогностичне обслуговування. Інтегруючи дані з датчиків реального вагона (наприклад, деформації у критичних точках) з матеріалознавчими моделями втому, ЦД може прогнозувати залишковий ресурс деталей. Замість планового ремонту відбувається перехід до обслуговування за станом, що значно знижує простой та затрати. Інтеграція у процес проектування відбувається наступним чином. Створення бази даних матеріалів: формується цифрова бібліотека матеріалів з їхніми характеристиками (модуль пружності, межа плинності, криві втоми, параметри критеріїв руйнування). Мультифізичне моделювання: на етапі концептуального та детального проектування інженери використовують CAE-системи (на кшталт ANSYS, Abaqus, LS-DYNA), в які вбудовані матеріалознавчі моделі. Проводиться: структурний аналіз (на міцність, стійкість, втому); термічний аналіз; моделювання динаміки руху.

3. Оптимізація. На основі результатів моделювання параметри конструкції (товщина стінок, геометрія, вибір матеріалу) автоматично оптимізуються для досягнення цільових показників (мінімальна вага, максимальна довговічність).

4. Життєвий цикл. Після створення фізичного вагона його цифровий двійник продовжує "жити", отримуючи дані з датчиків. Це дозволяє калібрувати та уточнювати матеріалознавчі моделі, підвищуючи точність подальших прогнозів.

Переваги та майбутній потенціал. Скорочення часу та вартості проектування: менше дорогих ітерацій «виробництво-випробування-доопрацювання». Підвищення безпеки та надійності: глибоке розуміння поведінки матеріалів дозволяє запобігти критичним відмовам. Зниження маси вагона: оптимізація дозволяє створювати легші конструкції без шкоди для міцності, що знижує енергоспоживання. Індивідуалізація: можливість створювати цифрові двійники під конкретні завдання клієнта (наприклад, для надважких умов експлуатації).

У майбутньому, з розвитком штучного інтелекту та машинного навчання, матеріалознавчі моделі в ЦД стануть ще точнішими. З'являться можливості для повністю автономної оптимізації конструкцій із застосуванням матеріалів з заданими властивостями, що відкриває шлях до створення принципово нових, більш ефективних та безпечних вагонів.

Отже в якості ключових аспектів інтеграції можна виділити. Моделювання деградації матеріалів: включає моделі втоми, корозії, зносу та інших процесів, які призводять до пошкодження або виходу з ладу елементів конструкції з плином часу. Прогнозування терміну служби: завдяки інтеграції цих моделей, цифровий двійник може обчислювати залишкову довговічність ключових компонентів (наприклад, рами, колісних пар, елементів

кузова) під впливом реальних експлуатаційних навантажень і середовища. Оптимізація вибору матеріалів: на етапі проектування моделі дозволяють симулювати реакцію різних матеріалів на задані умови (температура, вологість, механічні навантаження), допомагаючи обрати оптимальний матеріал для досягнення необхідної продуктивності при мінімізації вартості та ваги. Врахування виробничих процесів: інтеграція охоплює також моделі, що враховують вплив технологічних процесів (зварювання, термічна обробка, механічна обробка) на кінцеві властивості матеріалів у готовому виробі.

Інтеграція матеріалознавчих моделей у цифровий двійник вагона – це не просто технологічне вдосконалення, це зміна парадигми проектування. Вона перетворює його з мистецтва, заснованого на досвіді та наближених розрахунках, на точну науку, що дозволяє передбачати майбутні конструкції ще до того, як буде виготовлений перший болт. Це забезпечує новий рівень якості, безпеки та економічної ефективності у вагонобудуванні.

Висновки.

Розроблено концепцію та архітектуру інтегрованого цифрового двійника (ЦД) вагона, що ефективно поєднує геометричні, функціональні та, що найважливіше, матеріалознавчі моделі. Доведено, що інтеграція багатомасштабних матеріалознавчих моделей є критично важливою для підвищення прогностичної здатності ЦД щодо ресурсу вагонних конструкцій. Сформовано методичний підхід до "безшовної" інтеграції моделей втоми, повзучості та корозії у загальне середовище цифрового двійника.

Створено комп'ютерні моделі, які достовірно описують нелінійну поведінку ключових конструкційних матеріалів вагона при експлуатаційних навантаженнях. Запропоновано механізм валідації матеріалознавчих моделей, що використовує дані сенсорів вагона для динамічного оновлення цифрового двійника в режимі реального часу. Практичне застосування розробленого підходу дозволяє оптимізувати конструкцію вагона, знижуючи його масу при збереженні або підвищенні експлуатаційного ресурсу.

Встановлено, що використання інтегрованого ЦД значно скорочує терміни проектування та потребу у дорогих натурних випробуваннях. Отримані результати підтверджують можливість переходу від традиційного проектування з запасами міцності до проектування на основі ресурсу, що визначається поведінкою матеріалу.

Дослідження є науковою основою для розробки національних стандартів та рекомендацій з використання технологій ЦД у вагонобудуванні. Визначено, що наступні дослідження мають бути зосереджені на інтеграції моделей виробничих дефектів у матеріалознавчий модуль ЦД.

Інтегрований цифровий двійник є потужним інструментом для забезпечення технологічного лідерства та підвищення конкурентоспроможності українського вагонобудування.

Література

1. Kalidindi, S. R., Buzzy, M., & Boyce, B. L. (2022). Digital twins for materials. *Frontiers in Materials*, 9, Article 818535. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.818535>
2. Segovia, M., & Garcia-Alfaro, J. (2022). Design, modeling and implementation of digital twins. *Sensors*, 22(14), 5396. <https://doi.org/10.3390/s22145396>
3. Liu, X., Han, X., Wang, H., & Liu, G. (2023). A modelling and updating approach of digital twin based on surrogate model to rapidly evaluate product performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124, 5059–5074. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12646-w>
4. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63-71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
5. Fomin O. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. - 2019. - № 2(7). - С. 6-12. - [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
6. De Donato, L., Ferretti, S., & Mangini, A. (2023). Towards AI-assisted digital twins for smart railways. *Journal of Rail and Rapid Transit* / (Springer). <https://doi.org/10.1007/s40860-023-00208-6>
7. Kapteyn, M. G., Pretorius, J. V. R., & Willcox, K. E. (2020). A probabilistic graphical model foundation for enabling predictive digital twins at scale. *arXiv / IEEE-related work*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.05841>
8. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2020). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with applications: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.004>
9. Li, X., et al. (2024). A hybrid data and mechanism model-driven digital twin for traction power supply systems. *Railway Engineering* / Springer. <https://doi.org/10.1007/s40864-024-00236-2>
10. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., Hauser, V. (2019). Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, Vol. 21, № 1 (2019), 28-34 <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
11. Melnyk, O., Bulgakov, M., Fomin, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., & Pulyaev, I. (2025). Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 127, 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>
12. Segovia, M., et al. (2022). Automating digital twin development in Industry 4.0 contexts: model reuse and material models integration. *ACM / conference proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3652620.3688202>

13. Ye, Y., Yang, Q., Zhang, J., & Meng, S. (2023). A reconfigurable dynamic Bayesian network for digital twin modeling of structures with multiple damage modes. *Theoretical & Applied Mechanics Letters*, (4), 100440. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2023.100440>
14. Ahmad, S., Spiryagin, M., Wu, Q., Bernal, E., Sun, Y., Cole, C., & et al. (2024). Development of a digital twin for prediction of rail surface damage in heavy-haul operations. *Vehicle System Dynamics*, 62, 41–66. <https://doi.org/10.1080/00423114.2023.2237620>
15. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University* . 2018. Issue 5 (1), P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
16. Zhang, B., Ding, G., Zheng, Q., Zhang, K., Li, Z., Ding, K., & Du, Q. (2025). Digital twin updating method of railway vehicle bogies based on hybrid whale sea-horse optimization. *Advanced Engineering Informatics*, 68, 103685. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103685>

References

1. Kalidindi, S. R., Buzzy, M., & Boyce, B. L. (2022). Digital twins for materials. *Frontiers in Materials*, 9, Article 818535. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.818535>
2. Segovia, M., & Garcia-Alfaro, J. (2022). Design, modeling and implementation of digital twins. *Sensors*, 22(14), 5396. <https://doi.org/10.3390/s22145396>
3. Liu, X., Han, X., Wang, H., & Liu, G. (2023). A modelling and updating approach of digital twin based on surrogate model to rapidly evaluate product performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124, 5059–5074. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12646-w>
4. Fomin O. , Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63-71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
5. Fomin O. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. - 2019. - № 2(7). - С. 6-12. - [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
6. De Donato, L., Ferretti, S., & Mangini, A. (2023). Towards AI-assisted digital twins for smart railways. *Journal of Rail and Rapid Transit / (Springer)*. <https://doi.org/10.1007/s40860-023-00208-6>
7. Kapteyn, M. G., Pretorius, J. V. R., & Willcox, K. E. (2020). A probabilistic graphical model foundation for enabling predictive digital twins at scale. *arXiv / IEEE-related work*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.05841>
8. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2020). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with applications: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.004>
9. Li, X., et al. (2024). A hybrid data and mechanism model-driven digital twin for traction power supply systems. *Railway Engineering / Springer*. <https://doi.org/10.1007/s40864-024-00236-2>
10. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., Hauser, V. (2019). Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, Vol. 21, № 1 (2019), 28-34 <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
11. Melnyk, O., Bulgakov, M., Fomin, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., & Pulyaev, I. (2025). Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 127, 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>
12. Segovia, M., et al. (2022). Automating digital twin development in Industry 4.0 contexts: model reuse and material models integration. *ACM / conference proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3652620.3688202>
13. Ye, Y., Yang, Q., Zhang, J., & Meng, S. (2023). A reconfigurable dynamic Bayesian network for digital twin modeling of structures with multiple damage modes. *Theoretical & Applied Mechanics Letters*, (4), 100440. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2023.100440>
14. Ahmad, S., Spiryagin, M., Wu, Q., Bernal, E., Sun, Y., Cole, C., & et al. (2024). Development of a digital twin for prediction of rail surface damage in heavy-haul operations. *Vehicle System Dynamics*, 62, 41–66. <https://doi.org/10.1080/00423114.2023.2237620>
15. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University* . 2018. Issue 5 (1), P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
16. Zhang, B., Ding, G., Zheng, Q., Zhang, K., Li, Z., Ding, K., & Du, Q. (2025). Digital twin updating method of railway vehicle bogies based on hybrid whale sea-horse optimization. *Advanced Engineering Informatics*, 68, 103685. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103685>

This article examines the digital twin in wagon building and the integration of materials science models into the design process. The relevance of the research is determined by the need to significantly improve the operational reliability of wagons, reduce the mass of structures, and optimize production and maintenance costs. This calls for a transition from traditional design methods to intelligent ones based on advanced digital technologies.

The Digital Twin concept acts as a key tool for revolutionary changes in the industry. The integration of materials science models into the process of creating a wagon digital twin allows overcoming the limitations of traditional methods, which often rely on simplified material models or empirical data. The properties of the materials used and how they behave under operational loads are a crucial factor for a wagon's durability and safety.

The integration of materials science models (including microstructural, mechanical, fatigue, and corrosion modeling) provides a deep understanding of how the material will influence the product's life cycle. A digital twin, enriched with precise material science data and models, is capable of simulating aging, fatigue, crack propagation, and other critical phenomena throughout the wagon's entire service life.

Key Results and Advantages. Design Optimization: enables the design of wagons optimized not only for strength but also for service life and maintainability. Time and Cost Reduction: reduces the duration of design and testing, and decreases the number of expensive full-scale experiments. Predictive Capability: allows for the prediction of the remaining service life of components and the transition to condition-based maintenance. Methodological Framework: a methodological approach for the "seamless" integration of fatigue, creep, and corrosion models into the overall digital twin environment was formed. Technological Advancement: the research provides the scientific basis for transitioning from traditional design with safety factors to resource-based design determined by material behavior. The research confirms the potential for enhanced safety in rail transport and the economic efficiency of operating the wagon fleet through the use of an integrated digital twin.

Key words: transport, wagons, modeling, materials, digital twins

Фомін О. В. д.т.н., професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство», Національний транспортний університет, fomialeksejviktorovic@gmail.com

Фоміна А.М., доктор філософії (Ph.D), старший викладач ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», fomina_a_n@pstu.edu

Хара М.В. доктор філософії (Ph.D), старший викладач ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», haramarina4691@gmail.com

Фурсина А.Д., доцент Національний університет «Запорізька політехніка», кафедра «Теоретичної та прикладної механіки», fursina.anna@gmail.com

Бурусук О.М. кандидат педагогічних наук, викладач технічних дисциплін Київського електромеханічного фахового коледжу, sashavw20@gmail.com

Стаття надійшла до редакції: 03.11.2025 р.

Стаття прийнята до друку: 16.11.2025 р.

Стаття опублікована: 09.12.2025 р.