

УДК 539.3

О. П. Єфімов

студент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5440-6207>

Кафедра будівельних і дорожніх машин

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002

Л. В. Гапонова

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6038-2624>

Кафедра комп'ютерної графіки

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: nagitator13@gmail.com

Алгоритмічна еволюція конструкцій та шлях від моноліту до біонічного дизайну через топологічну оптимізацію

Цитувати як:

Єфімов, О. П., Гапонова, Л. В. (2026). Алгоритмічна еволюція конструкцій та шлях від моноліту до біонічного дизайну через топологічну оптимізацію. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 377-385. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-28](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-28)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті представлено результати дослідження ефективності сучасних методів проектування будівельних конструкцій, зокрема технологій топологічної оптимізації та генеративного дизайну. Сьогодні галузь стикається з потребою знизити витрати металу, не ризикуючи при цьому стійкістю та довговічністю споруд. В умовах дефіциту сировини та жорстких екологічних вимог, перехід до раціонального розподілу матеріалів стає ключовим завданням для сучасної інженерної спільноти. Для порівняльного аналізу було обрано три різні типи конструкцій: стандартну суцільну сталеву балку, класичну ферму та інноваційну біонічну структуру, що імітує природні принципи формування опор. Весь цикл чисельного моделювання виконувався в середовищі Autodesk Fusion 360. Основний фокус дослідження спрямований на алгоритмічне проектування, де фінальна геометрія виникає не як суб'єктивне бачення інженера, а як прямий результат математичного розрахунку полів напружень. Проведені розрахунки довели, що біонічна модель, сформована через відсікання ненавантажених зон, забезпечує найбільш логічну передачу внутрішніх зусиль. Експериментальні дані підтвердили, що генеративний дизайн дозволяє полегшити конструкцію на цілих 80% відносно монолітного прототипу. При цьому важливо, що необхідний коефіцієнт запасу міцності зберігається в повному обсязі. Такі результати наочно демонструють, що відмова від масивних форм на користь складних алгоритмічних структур – це логічна еволюція інженерії в бік ресурсозбереження. Висновки дослідження мають цінність для проектування легких металоконструкцій нового

типу. Впровадження автоматизованих систем такого рівня в освітній процес та реальне виробництво дозволить не лише зекономити на матеріалах і логістиці, а й закласти фундамент для екологічно стійкого будівництва, де кожна деталь працює на межі своїх фізичних можливостей.

Ключові слова: топологічна оптимізація, генеративний дизайн, метод скінченних елементів, фермові конструкції, вага, міцність, розвиток.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У сучасному будівництві та машинобудуванні однією з ключових проблем є пошук балансу між масою конструкції та її міцністю. Надлишкова вага не лише призводить до підвищення бюджету на проект, а й до негативного впливу на навколишнє середовище через підвищення викидів CO₂ при виробництві металу. Зараз для перекриття великих прольотів зазвичай використовують фермові конструкції, які здатні зменшити використання металу на 30-50% порівняно зі звичайними балками. Проте класичні розрахунки фермових конструкцій часто залишають великий запас матеріалу, який не використовується ефективно.

Сьогодні в сучасному розвитку інженерії найперспективнішим шляхом оптимізації конструкції є топологічна оптимізація та генеративний дизайн. В основі цих методів лежить математичний підхід, що реалізований за допомогою комп'ютерних алгоритмів, та дозволяє перерозподілити або прибрати матеріал для забезпечення найвищої міцності при мінімальній вазі. Серед існуючих підходів найпопулярнішим є SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), який розбиває об'єкт на сітку скінченних елементів (рис. 1). Підґрунтям методу SIMP є використання закону штрафування жорсткості. Це необхідно, бо пряма робота зі значеннями 0 або 1 створює обчислювальне навантаження, тому вводиться параметр відносної щільності ρ_i , де 1 відповідає суцільному матеріалу, а 0 – порожнечі:

$$E_i = \rho_i^p * E_0$$

У даному рівнянні через E_i ми позначаємо модуль Юнга окремого елемента, тоді як E_0 відображає показник усієї конструкції на виході. Через ρ_i ми позначаємо щільність елемента, а p (зазвичай $p = 3$) допомагає алгоритму приймати значення лише 0 або 1, і елементи з низькою щільністю стають невідгідними для системи через низьку жорсткість при великій вазі, тому алгоритм прибирає проміжні значення з фінального результату. Але без фільтрації після алгоритму фінальний результат мав би вигляд точок, які не мають зв'язку між собою. Фільтр аналізує щільність сусідніх елементів і з'єднує їх у цілісну та гладку структуру. Саме завдяки такому математичному аналізу ми отримуємо складні

біонічні структури, які візуально нагадують природні об'єкти, але є результатом суворого відбору.

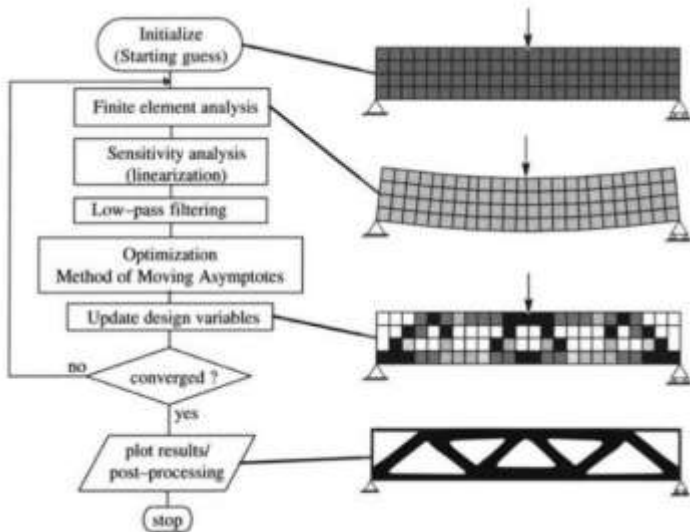


Рис. 1. Алгоритм оптимізації топології методом розподілу матеріалу з використанням MMA [1]

Важливо не плутати топологічну оптимізацію з генеративним дизайном. Хоча вони і мають спільну мету – мінімізація ваги та оптимізація форми за допомогою алгоритмів, топологічна оптимізація має фокус на видаленні зайвого матеріалу з уже існуючої форми. Натомість генеративний дизайн здатний створювати сотні варіантів конструкцій з нуля, спираючись лише на задані цілі та обмеження. Це дає інженерам та дизайнерам можливість обирати найкращий варіант за балансом ваги, міцності та естетики.

Реальні кейси в індустрії лише підтверджують, наскільки ефективним може бути подібний підхід. До прикладу, бразильський стартап None Structures [2] під супроводом Маркоса Сільвейра розпочав роботу над створенням пішохідного моста, використовуючи методи алгоритмів для оптимізації залізобетонних конструкцій. Алгоритм аналізує навантаження та відсікає бетон у зонах, які не працюють. Це дозволило створити балку, яка потребує на 45% менше матеріалу порівняно зі стандартними методами. Складні біонічні форми таких конструкцій реалізуються за допомогою 3D-друку, що не тільки зберігає матеріал, а й знижує викиди CO₂. Виконано чисельний експеримент поведінки конструктивно-анізотропних конструкцій при впливі на них рівномірно-

розподіленого 1600 Па/м^2 та зосередженого навантаження 1 т/м^2 . Для вивчення напружено-деформованого стану елементів запропоновано безпечний простір у вигляді конструктивно-анізотропної оболонки розміром $9 \text{ м} \times 9 \text{ м}$ з кроком бетонних ребер 1 м з полістирольними вкладишами та конструктивно-анізотропна оболонка розміром $9 \text{ м} \times 9 \text{ м}$ з металевим листом у нижньому поясі [3, 4, 5].

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є порівняльний аналіз напружено-деформованого стану суцільної металевої балки, традиційної фермової конструкції та фермової конструкції, змодельованої з використанням топологічного аналізу, для підтвердження ефективності зниження ваги без втрати несучої здатності.

Матеріали та методи

Для проведення порівняльного аналізу та верифікації ефективності топологічної оптимізації було обрано метод чисельного моделювання (FEA) у середовищі Autodesk Fusion 360 [6].

В межах чисельного експерименту ми порівнювали три типи конструкцій: спочатку суцільна сталева балка, потім стандартна ферма та наостанок її оптимізований варіант. Усі три типи конструкцій мають однакові розміри – $1200 \times 200 \times 25 \text{ мм}$. Для трьох моделей було призначено матеріал Steel (Сталь), вибір якої обумовлений її стабільними характеристиками, зокрема модуль Юнга у 210 ГПа , коефіцієнт Пуассона у $0,30$ та межа текучості у 207 МПа .

Для створення реалістичних умов роботи конструкції було застосовано такі параметри симуляції:

1. Тип кріплення: жорстке защемлення (Fixed) лівої торцевої грані конструкції та для стабільності чисельного розрахунку, до правої торцевої грані застосовано тип кріплення Frictionless. Це дозволило обмежити обертальне переміщення конструкції, при цьому зберігаючи можливість вільного ковзання вздовж правої осі, що відповідає умовам роботи реальних опорних вузлів;
2. Навантаження прикладалося рівномірно-розподілене: сила величиною 5000 Н (510 кг), прикладена перпендикулярно до верхньої площини. Також враховано дію власної ваги конструкції для підвищення точності розрахунків.

Результати та обговорення

На першому етапі було проведено статичний аналіз сталевий балки. Результати показали, що при заданому навантаженні конструкція має критично високий запас міцності $18,9$ одиниць, що свідчить про значну перевитрату матеріалу. Поля розподілу напружень (рис. 2) демонструють,

що центральна частина балки практично не сприймає навантаження, залишаючись у темно-синій та світло-синій зонах низьких напружень.

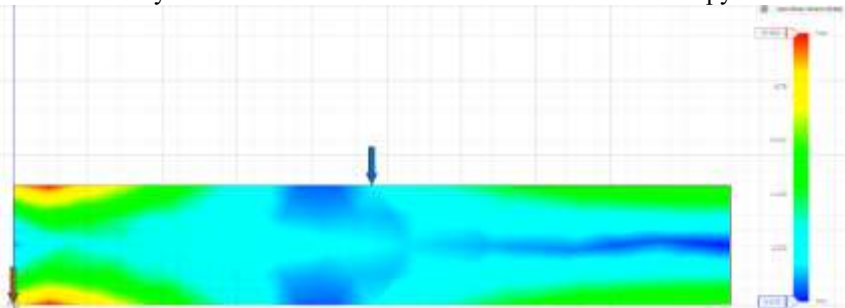


Рис. 2. Розподіл напружень у суцільній балці, маса 47,1 кг (сформовано авторами у програмному комплексі Autodesk Fusion 360)

На другому етапі була змодельована класична фермова конструкція. Вона повторює габарити першої моделі, але замість суцільного заповнення має решітчасту структуру. Поля розподілу напружень (рис. 3) демонструють, що конструкція працює набагато ефективніше, ніж суцільна балка. Аналіз результатів фермової моделі показав наступне: запас міцності знизився до значення 3,0. Це є оптимальним показником для сталевих конструкцій у будівництві, що забезпечує надійність без зайвої металомісткості. Максимальний прогин збільшився лише на 0,5 мм порівняно з сталевією балкою, що є несуттєвим для конструкції такої довжини. Маса конструкції зменшилася з 47,1 кг до 10,1 кг.

На третьому етапі ми застосували Generative Design. Головна відмінність від класичного підходу полягає в тому, що алгоритм зробив біонічну геометрію внутрішніх стержнів самостійно. При збереженні тієї ж рами, вага знизилася до 9,6 кг, а от запас міцності, навпаки, піднявся до 3,7. Це прямий доказ того, що цифрові алгоритми знаходять значно ефективніші геометричні форми, ніж це можливо при традиційному ручному проектуванні.

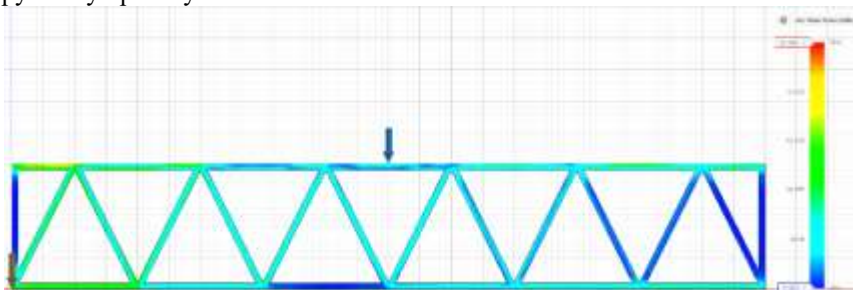


Рис. 3. Розподіл напружень у класичній фермовій конструкції, маса 10,1 кг (сформовано авторами у програмному комплексі Autodesk Fusion 360)

Власне, такий підхід дає змогу отримати конструкцію, де кожен грам металу працює в максимально напруженому режимі. Програма просто вичистила матеріал із зон з нульовим навантаженням, перекинувши його туди, де він критично необхідний для цілісності структури (рис. 4). На графіку ми бачимо переважання зеленого кольору – це показник того, що матеріал завантажений оптимально. Цікаво, що асиметрія деталі, яку ми бачимо на візуалізації, пояснюється фізикою – основний потік енергії йде до лівої опори, тому алгоритм логічно посилив саме цю ділянку.

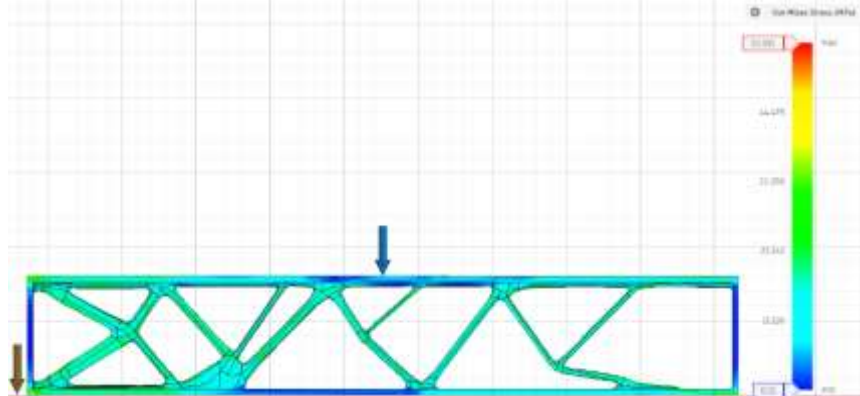


Рис 4. Розподіл напружень у біонічній фермовій конструкції, створеної за допомогою комп'ютерних алгоритмів, маса 9,6 кг (сформовано авторами у програмному комплексі Autodesk Fusion 360)

Для наочності порівняння основних параметрів результати зведено у таблицю 1.

Таблиця 1. Порівняльні характеристики моделей

Показник	Суцільна балка	Традиційна ферма	Оптимізована ферма	Ефект
Маса, кг	47,1	10,1	9,6	-79,6%
Запас міцності	18,9	3,0	3,7	-80,4%
Макс. зміщення, мм	0,1	0,6	0,46	+78,2%

Висновки

Підбиваючи підсумки, проведений аналіз наочно ілюструє неминучий перехід від громіздких монолітних рішень до принципів інтелектуального проектування. Практика показує, що використання суцільних балок під великим навантаженням – це неякісно та неефективно. Понад 70% металу там просто не працює в зонах низьких напружень, створюючи зайвий баласт для опор. Натомість впровадження класичної ферми дало колосальний стрибок. Ми зменшили масу з 47,1 кг до 10,1 кг. Це економія майже 78% матеріалу при стабільному запасі міцності. Такий результат лише підкреслює, що геометрія в інженерії важливіша за тонни металу. Проте справжній прорив забезпечують саме алгоритми топологічної оптимізації. Навіть при малих масштабах комп'ютер зміг знизити вагу з 10,1 кг до 9,6 кг, а міцність водночас підскочила до 3,7. Окрім чистої економіки, ми маємо й екологічний наслідок. Зниження ваги на 70-80% автоматично тягне за собою менші викиди CO₂ та легшу логістику. Для України в майбутній відбудові використання таких методів – це реальний шанс будувати швидше, дешевше та надійніше.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

(Або вказати офіційні вихідні дані теми державної науково-дослідної роботи, гранту тощо)

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Bendsoe M. P., Sigmund O. (2013) Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. 5-14.
<https://books.google.com.ua/books?id=ZCjsCAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
2. Turney D. (2020) Concrete sustainability improves with generative design. Autodesk Articles. <https://www.autodesk.com/design-make/articles/sustainable-concrete>

3. Gaponova, L. V., Arkhipov, O. V., & Suminov, A. V. (2025). Computer modeling of anisotropic shells in "AUTODESK INVENTOR" software. Bulletin of Kharkiv National Highway University. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.218>

4. Bugaievskiy, S. O., Gaponova, L. V., Nazarko, O. O., & Bugaievskiy, V. O. (2024). History of bridge architecture until the 18th century. Bulletin of Kharkiv National Highway University. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.100>

5. Aleksandrovych, V. A., Havryliuk, O. V., Atinian, A. O., Pustovoitova, O. M., & Gaponova, L. V. (2025). Influence of dynamic load parameters on the deformation of the soil base. Bulletin of Kharkiv National Highway University. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.105>

6. Autodesk Fusion 360: Integrated CAD, CAM, CAE, and PCB software. Official website. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

Література

1. Bendsoe M. P., Sigmund O. (2013) Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. 5-14. <https://books.google.com.ua/books?id=ZCjsCAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

2. Turney D. (2020) Concrete sustainability improves with generative design. Autodesk Articles. <https://www.autodesk.com/design-make/articles/sustainable-concrete>

3. Гапонова Л. В., Архіпов О. В., Сумінов А. В. Комп'ютерне моделювання анізотопних оболонок у ПК «AUTODESK INVENTOR». <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.218>

4. Бугаєвський С. О., Гапонова Л. В., Назарько О. О., Бугаєвський В. О. Історія архітектури мостів до XVIII століття. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.100>

5. Александрович В. А., Гаврилюк О. В., Атинян А. О., Пустовойтова О. М., Гапонова Л. В. Вплив параметрів динамічного навантаження на деформацію ґрунтової основи. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.105>

6. Autodesk Fusion 360. Integrated CAD, CAM, CAE, and PCB software. Official website. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 14.05.2026	Received 14.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2026	Received in revised form 23.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

O. P. Yefimov

Student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5440-6207>

Department of Construction and Road Machines

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho St., Kharkiv, Ukraine, 61002

L. V. Gaponova

PhD. in Technical Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Department of Computer Graphics

*corresponding author, e-mail: nagitator13@gmail.com

Algorithmic evolution of structures from monoliths to bionic design via topology optimization

How to Cite:

Yefimov, O. P., Gaponova. (2026). Algorithmic evolution of structures from monoliths to bionic design via topological optimization. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 377-385. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-28](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-28)

Abstract. The article presents the results of advanced digital design methods, focusing on topology optimization and generative design within the construction industry. Currently, the sector faces a critical challenge – achieving a significant reduction in metal consumption without compromising the stability or durability of structures. In an era of resource scarcity and stringent environmental regulations, shifting toward the rational distribution of materials has become a primary objective for the engineering community. For the comparative analysis, three distinct structural configurations were selected: a standard solid steel beam, a conventional truss, and an innovative bionic structure that mimics natural load-bearing principles. The entire numerical modeling cycle was conducted using the Autodesk Fusion 360 environment. The core focus of the study is directed at algorithmic design – a process where the final geometry emerges not from an engineer’s subjective vision, but as a direct result of the mathematical calculation of stress fields. The performed calculations demonstrated that the bionic model, shaped by stripping away non-loaded zones, ensures the most logical transfer of internal forces. Experimental data confirmed that generative design allows for a structural weight reduction of up to 80% compared to the monolithic prototype. Crucially, the required safety factor remains fully intact. Furthermore, the study highlights that such weight optimization directly correlates with a reduced carbon footprint, as less raw material extraction and energy-intensive smelting are required. These results clearly illustrate that moving away from massive forms in favor of complex algorithmic structures represents a logical evolution of engineering toward resource efficiency. The integration of these geometries with additive manufacturing (3D printing) further expands the horizons of architectural freedom. The study’s findings hold direct practical value for the design of next-generation lightweight metal structures. Implementing such high-level automated systems into educational programs and industrial workflows will not only save on materials and logistics but also lay the foundation for sustainable construction where every component operates at its physical limit. Ultimately, this approach transforms the structural engineer from a traditional draughtsman into a curator of algorithmic processes.

Keywords: topological optimization, generative design, Finite Element Analysis, truss structures, weight, strength, development.