

## ВИКОРИСТАННЯ SOLIDWORKS ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

Харжевський В. О.<sup>1</sup>, Божек Р. О.<sup>2</sup>, Підгайчук С. Я.<sup>3</sup>, Марченко М. В.<sup>4</sup>

<sup>1-3</sup>Хмельницький національний університет

E-mail: <sup>1</sup>kharzhevskiyi@khnmu.edu.ua, <sup>2</sup>bozhekro@khnmu.edu.ua

<sup>3</sup>pidhaichuksv@khnmu.edu.ua, <sup>4</sup>max@solidworks.net.ua

**Анотація.** В роботі розглядається проблема розрахунку на міцність зварних металоконструкцій з використанням чисельного методу скінченних елементів, реалізованого в системі інженерного аналізу SOLIDWORKS Simulation. Показано, що проведення розрахунків моделей зварних металоконструкцій сумісно з листовим металом має ряд особливостей, які продемонстровано в роботі на прикладі розрахунку на міцність складського стеблажа. Навантаження моделювалось шляхом розміщення стандартних сворпіддонів (1200×800). За результатами розрахунків були запропоновані зміни в конструкцію, які забезпечили необхідний коефіцієнт запасу міцності.

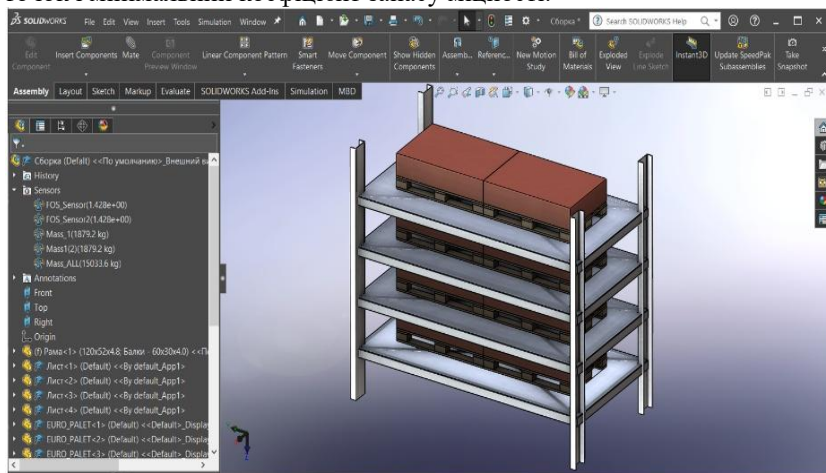
**Ключові слова:** SOLIDWORKS Simulation, метод скінченних елементів, зварні металоконструкції, балки, листовий метал, комп'ютерне моделювання.

Проблема оптимального проектування деталей машин, механізмів та різноманітних машинобудівних конструкцій є важливою в сучасному машинобудуванні, оскільки використання сучасних методів дозволяє зменшити матеріаломісткість проєктованих деталей і конструкцій, використовувати їх оптимальні геометричні форми, зокрема мінімально можливий поперечний переріз деталей, забезпечуючи при цьому задані експлуатаційні характеристики, зокрема вантажопідйомність, коефіцієнт запасу міцності, мінімальні або наперед задані геометричні розміри тощо.

З розвитком програмного забезпечення автоматизованого проєктування в машинобудуванні (Computer-Aided Design) та комп'ютерних систем інженерного аналізу (Computer-Aided Engineering) стало можливим більш точно вирішувати інженерні задачі оптимального проєктування деталей машин та конструкцій, використовуючи інтегровані в ці системи числові методи інженерного аналізу. При цьому важливо не тільки проводити розрахунки з використанням сучасних числових методів, але й організувати багатокритеріальну оптимізацію 3D-моделей деталей машин та машинобудівних конструкцій з використанням різних обмежень і цільових функцій. Відомо, що використання зазначених методів, базуючись на фундаментальних принципах опору матеріалів, дозволяє оптимально використовувати форму поперечного перерізу деталей, забезпечити більший коефіцієнт запасу міцності навіть тоді, коли металоємність такої оптимальної конструкції може бути меншою.

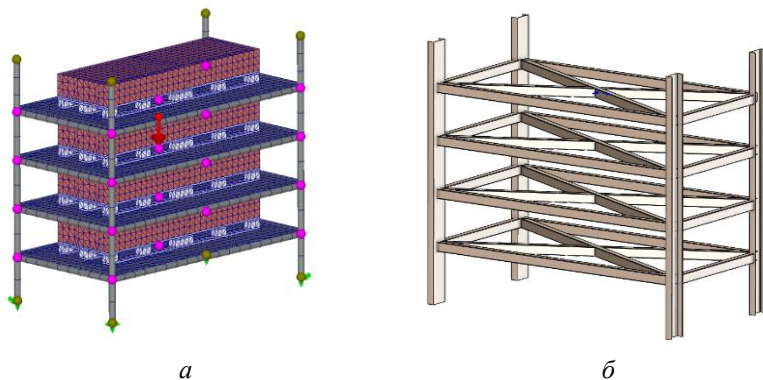
Розглянемо задачу оптимального проектування зварної метало-конструкції стелажа, що використовується у складському приміщенні, яка крім зварної рами включає в себе полицки з листового металу, яка показана на рис. 1. Модель була розроблена в CAD-системі SOLIDWORKS з використанням інструментів моделювання зварних металоконструкцій (Weldments) та листового металу (Sheet Metal). Відповідні методи створення твердотільної геометрії в SOLIDWORKS детально описані в роботі [1]. Проведення оптимізації конструкції з врахуванням результатів розрахунків на міцність розглядалось нами також в роботі [2].

Розроблені у SOLIDWORKS твердотільні моделі можна використовувати для проведення різних видів інженерних розрахунків, як показано в роботах [3, 4]. Зокрема, для проведення розрахунків складських стелажів на міцність, жорсткість та вантажопідйомність, на базі конструкторської моделі в SOLIDWORKS Simulation була розроблена розрахункова модель, за допомогою якої були визначені основні характеристики конструкції, такі як розподіл напружень, переміщення різних точок і мінімальний коефіцієнт запасу міцності.



**Рис. 1. Модель стелажа, виконана в SOLIDWORKS**

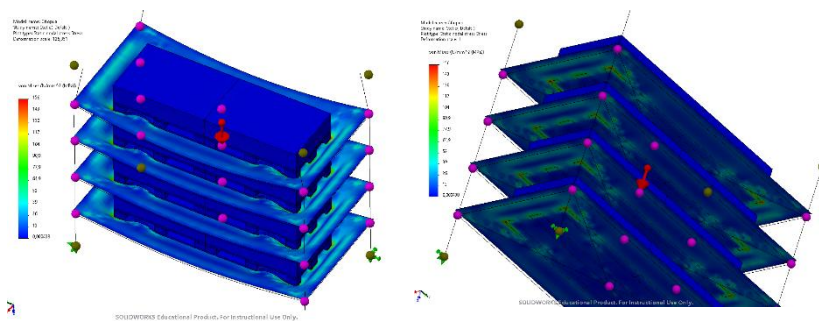
Як видно з рис. 2, а, в розробленій моделі були використані різні типи скінченних елементів: балкові елементи для вертикальних опор і балок; оболонкові елементи для металевих листів, які приварені до балок полиць, а також скінченні елементи у вигляді об'ємних тетраedrів для моделювання стандартних європіддонів та вантажу.



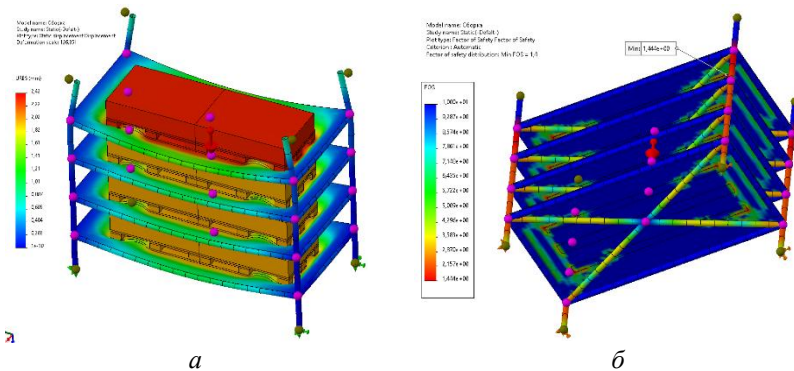
**Рис. 2. Модель стелажа: а) скінченно-елементна сітка; б) зварна рама**

Стелаж містить 4 полиці розміром 3000×1500 мм, загальна висота – 2500 мм, відстань між полицями по висоті – 560 мм. Стелаж призначений для зберігання матеріалів на стандартних європіддонах, на кожній полиці планується розмістити по 2 таких піддони, а всього – 8. Вертикальні опори стелажа – стандартний швеллер розміром 120×52×4,8 мм, а полиці – стандартні прямокутні труби перерізом 60×30 мм, з товщиною стінки 4 мм. Матеріал опор і балок – Сталь 3.

В результаті проведених розрахунків, які були проведені для розробленої моделі, були отримані наступні результати: розподіл напружень в елементах моделі (рис. 3); максимальне переміщення точок моделі (рис. 4, а), яке може характеризувати жорсткість зварної рами стелажа, а також розподіл коефіцієнта запасу міцності (рис. 4, б).



**Рис. 3. Результати розрахунків: розподіл напружень у моделі, МПа**



**Рис. 4. Результати розрахунків: а) розподіл переміщень; б) розподіл коефіцієнта запасу міцності, мінімальне значення FOS = 1,44**

Отримані результати можуть бути використані для прогнозування вантажопідйомності стелажа. Рекомендується, щоб коефіцієнт запасу міцності моделі знаходився в межах  $FOS > 1.25 \dots 1.5$ , тому задача полягає в тому, щоб знайти таке оптимальне значення навантаження, яке буде задовольняти цьому критерію. Для цього було використано процедуру оптимізації, яка реалізована в програмному забезпеченні SOLIDWORKS Simulation під назвою “Design Study”.

Під час оптимізації одним із змінних параметрів є висота  $H$  вантажу на піддоні, яка змінювалась від 50 мм до 250 мм, таким чином загальна маса вантажу  $m$  змінювалась відповідно від 3 до 15 т. Було встановлено обмеження, що FOS має бути більшим за 1, а цільовою функцією була максимізація маси вантажу на піддоні. Результати процедури оптимізації наведені в таблиці 1, де рекомендований програмою оптимізації сценарій позначений зеленим кольором (сценарій № 3), для якого FOS знаходиться в рекомендованих межах.

Таблиця 1

**Результати оптимізації для початкового варіанта конструкції**

Параметр	Номер сценарію								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H$ , мм	50	75	100	125	150	175	200	225	250
FOS	2,5	1,7	1,29	1,04	0,9	0,75	0,66	0,59	0,53
$m$ , кг	3007	4510	6013	7517	9020	10524	12027	13531	15034

Для підвищення вантажопідйомності конструкції розміри поперечних перерізів балок (труб прямокутного поперечного перерізу) були

збільшені до 100×70 мм (товщина стінки – 5 мм), розміри швелерів (вертикальних опор) були також збільшені до 200×76×5,2. Процедура оптимізації конструкції зварної рами із зазначеними розмірами балок проводилась за тих самих умов, що й у попередньому випадку. Результати розрахунків наведені у таблиці 2, де рекомендований варіант (сценарій № 9) виділено зеленим кольором.

Таблиця 2

**Результати оптимізації для покращеного варіанта конструкції**

Параметр	Номер сценарію								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>H</i> , мм	50	75	100	125	150	175	200	225	250
FOS	5,58	4,04	3,16	2,59	2,19	1,9	1,7	1,5	1,36
<i>m</i> , кг	3007	4510	6013	7517	9020	10523	12027	13531	15034

Як видно з отриманих результатів, такий тип стелажа може витримувати 15 тон (замість 6 тон у початкового варіанті), при цьому максимальна висота вантажу на піддоні – 250 мм, а мінімальний коефіцієнт запасу міцності (FOS) буде достатнім – 1,36. Очевидно, що збільшення розмірів поперечного перерізу балок збільшує вагу конструкції, її металоємність, що відповідно підвищує вартість. Однак слід зазначити, що використання конструкції з посиленими балками є вигідним з наступних причин:

- 1) при збільшенні маси конструкції в 1,92 рази збільшення вантажопідйомності є більш ніж пропорційне – в 2,5 рази;
- 2) економія місця на складі в результаті розміщення більшої маси вантажу на одиницю площі;
- 3) уникнення ймовірності завантаження на стелаж вантажу такої маси, яка б призвела до поломки всієї конструкції, оскільки посилена конструкція стелажа витримає вагу вантажу, який може туди геометрично поміститись, на відміну від початкового варіанту конструкції.

Дослідження планується продовжити в напрямку проведення багатокритеріальної оптимізації за додатковими критеріями.

**Список використаних джерел**

1. Howard W., Musto J. Introduction to Solid Modeling Using SOLIDWORKS 2022 [18 ed.]. McGraw Hill. 432 p.
2. Харжевський В., Божек Р., Підгайчук С. Оптимізаційне проектування зварних металоконструкцій з використанням SOLIDWORKS Simulation на прикладі складських стелажів // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, № 3 (350), 2025. С. 534–541.

3. Kurowski P. Finite Element Analysis for Design Engineers. Third edition. SAE International, 2023. 287 p.
4. Nudehi S., Steffen J. Analysis of Machine Elements Using SOLIDWORKS Simulation 2024. SDC Publications. 2024. 558 p.