

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-69>

УДК 621.01

ХАРЖЕВСЬКИЙ В'ЯЧЕСЛАВ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4816-2781>e-mail: kharzhevskiy@khmnu.edu.ua**БОЖЕК РОМАН**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0007-4341-4560>e-mail: bozhekro@khmnu.edu.ua**ПІДГАЙЧУК СВІТЛАНА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9868-6447>e-mail: pidhaichuksv@khmnu.edu.ua

ОПТИМІЗАЦІЙНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЗВАРНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ SOLIDWORKS SIMULATION НА ПРИКЛАДІ СКЛАДСЬКИХ СТЕЛАЖІВ

В роботі розглядається проблема розрахунку на міцність зварних металоконструкцій з використанням чисельного методу скінченних елементів (МСЕ), 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 стелажа. Зокрема, розбиття моделі на скінченні елементи проводилось для балок зі швелеру та з прямокутної труби – як для балочних скінченних елементів (типу beam), а для елементів з листового металу – як для оболонкових скінченних елементів (типу shell), а з'єднання листів металу до балок розглядалось як зварні з'єднання. Навантаження моделювалось шляхом розміщення стандартних європіддонів (1200x800). За результатами розрахунків були запропоновані зміни в конструкцію стелажа, які забезпечили необхідний коефіцієнт запасу міцності.

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

KHARZHEVSKYI VIACHESLAV, BOZHEK ROMAN, PIDHAICHUK SVITLANA

Khmelnytskyi National University

OPTIMIZATION DESIGN OF WELDED METAL STRUCTURES BY MEANS OF SOLIDWORKS SIMULATION ON THE EXAMPLE OF WAREHOUSE RACKS

The paper is dedicated to the problem of the optimization design of welded metal structures using the method of the finite element analysis, using the criteria of maximum von Mises stress for ductile materials and maximum displacement to ensure the stiffness of the model, that are implemented in *SOLIDWORKS Simulation* – Computer-Aided Engineering software. As shown in the paper on the example of strength calculation of a rack for a warehouse, when calculation model has welded metal parts with sheet metal, it has a number of peculiarities.

In particular, the division of the parts of the model into the finite elements was carried out for the channel elements and for the rectangular pipes as finite elements of the type of “beam”, but sheet metal parts must be considered as finite elements of the type of “shell”, and the contact of metal sheets to beams must be considered as welded joints, using the contact type “bonded”. The load on the structure was simulated by placing two standard Euro pallets (1200x800) in the center on each shelf of the rack, and the load was simulated as “Gravity force”.

According to the results of the strength calculations using *SOLIDWORKS Simulation*, which were obtained using the optimization techniques that are available in the engineering software, changes to the construction of the rack were proposed, which provided the required factor of safety. Therefore, the use of a proposed design will allow much more efficient usage of the warehouse area and will prevent critical rack overload.

Key words: *SOLIDWORKS Simulation*, finite elements analysis method, welded metal constructions, beams, sheet metal parts, computer modeling.

Стаття надійшла до редакції / Received 10.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

Постановка проблеми

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 проектування в машинобудуванні (Computer-Aided Design) та комп'ютерних систем інженерного аналізу (Computer-Aided Engineering) стало можливим більш точно вирішувати інженерні задачі оптимального проектування 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 організовувати

багатокритеріальну оптимізацію 3D-моделей деталей машин та машинобудівних конструкцій з використанням різних обмежень та 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.

В цій роботі розглядається задача оптимального проектування зварної металоконструкції стелажа, що використовується у складському приміщенні, яка крім зварної рами включає в себе полки з листового металу.

Мета роботи: за допомогою числових методів системи інженерного аналізу SOLIDWORKS Simulation дослідити вантажопідйомність складських стелажів із заданими розмірами балок зварної металоконструкції, а також зробити необхідні зміни в конструкції для забезпечення заданої вантажопідйомності із наперед заданим коефіцієнтом запасу міцності.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні задачі: 1) розробити твердотільну 3D-модель складського стелажа за заданими розмірами та створити відповідну їй розрахункову модель, яку можна було би розрахувати методом скінченних елементів; 2) розрахувати розподіл напружень в конструкції, максимальні переміщення, що визначають жорсткість моделі, а також розрахувати коефіцієнти запасу міцності – окремо в балках, а також у листовому металі, що використовується в конструкції стелажа як полки. За допомогою числових методів оптимізації розрахувати оптимальне навантаження на конструкцію; 3) визначити оптимальні розміри поперечного перерізу балок для забезпечення заданої вантажопідйомності; 4) запропонувати зміни у конструкцію стелажу, які збільшать її вантажопідйомність без необхідності збільшення металоємності та відповідно вартості виготовлення.

Аналіз літературних джерел

Як відомо, ефективним засобом для прискорення процесу проектування сучасних машин та конструкцій, а також в процесі підготовки інженерів-механіків у закладах вищої освіти, є використання сучасних технологій комп'ютерного моделювання. Зокрема, такими ефективними інструментами є сучасні CAD/CAM/CAE-системи. Як зазначено в статті [1], практика використання систем автоматизованого проектування в навчальному процесі Хмельницького національного університету показала, що оптимальним засобом комп'ютерного моделювання технічних об'єктів з метою розв'язання машинобудівних задач є система SOLIDWORKS, яка містить всі необхідні інструменти для реалізації технічних ідей. Проте очевидно, що така інтегрованість системи SOLIDWORKS є перевагою не тільки при виборі CAD/CAM/CAE-системи для навчального процесу, але й при використанні її в умовах реального виробництва. Одним з модулів SOLIDWORKS, що використовується для дослідження кінематики та динаміки технічних систем, є SOLIDWORKS Motion [2]. Зокрема, в роботі [4] розглядається основних функціонал системи інженерного аналізу SOLIDWORKS Motion, де наведено ряд прикладів та моделей, що використовуються при проектуванні у сучасному машинобудуванні.

Іншим потужним модулем SOLIDWORKS для проведення інженерних розрахунків є SOLIDWORKS Simulation, що використовується, зокрема, для розрахунків на міцність, жорсткість, проведення термічного та частотного типів аналізу, а також ряду інших досліджень з використанням чисельних методів. Опис методів, що використовуються в цій системі, детально наведено в роботах [3, 7, 8, 10]

Питанням дослідження зварних металоконструкцій на міцність методами комп'ютерного моделювання, зокрема з використанням SOLIDWORKS Simulation, присвячено ряд наукових робіт [6, 9, 11]. Огляд сучасних методів симуляції зварних з'єднань для порівняно великих деталей наведено в роботі [6]. В роботі [9] розглядається питання розробки методичних рекомендацій з оцінювання ресурсу зварних вузлів грохоту типу ГВЧ-31С з використанням програмного комплексу SOLIDWORKS Simulation. Розроблена в зазначеній роботі методика дозволяє визначати динамічні зусилля, що виникають у конструкціях під час здійснення коливального руху та визначати напружено-деформований стан зварних швів, оцінювати їх ресурс з використанням технології Hot Spot Stress. В роботі [11] детально розглядаються чисельні методи SOLIDWORKS Simulation, що реалізовані в цій системі для розрахунку зварних з'єднань, причому зазначено, що для цього там існує три різних підходи для їх моделювання та аналізу.

В цій роботі розглянемо проектування зварних металоконструкцій з використанням SOLIDWORKS Simulation на прикладі складських стелажів, що є задачею, для розв'язання якої доцільно використати як методи 3D-моделювання та інженерного аналізу методом скінченних елементів, так і чисельні оптимізаційні методи для визначення їх оптимальної конструкції та характеристик.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 показана твердотільна модель (складання) стелажа для складського приміщення, яку і будемо досліджувати в цій роботі. 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 [5].

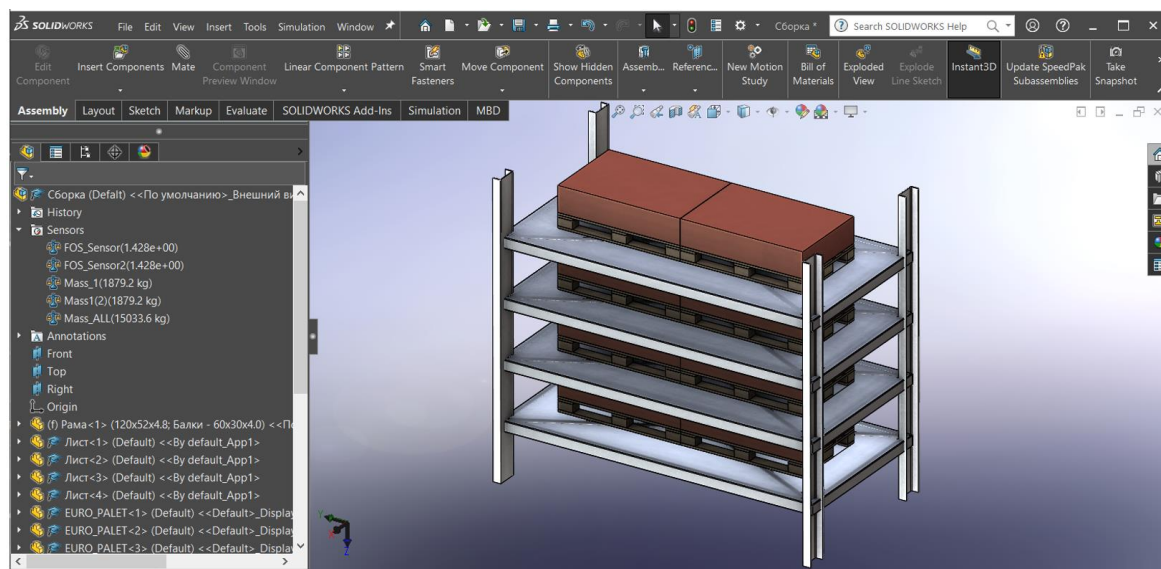


Рис. 1. Модель складського стелажа, виконана в SOLIDWORKS

Розроблені у SOLIDWORKS твердотільні моделі можна використовувати для проведення різних видів інженерних розрахунків. Зокрема, для проведення необхідних 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 точок елементів і мінімальний коефіцієнт запасу міцності конструкції. В основі розрахунків на міцність лежить метод скінченних елементів (MCE), який реалізований в багатьох програмних системах автоматизованого проектування, зокрема і в SOLIDWORKS Simulation. Основи MCE описані в роботах [3, 7, 8, 10], основна ідея якого полягає в тому, що тривимірна твердотільна модель деталей, вузлів або конструкцій розбивається на сітку скінченних елементів, після чого формуються матриці жорсткості та розраховуються значення напружень і переміщень у всіх вузлових точках скінченних елементів. При створенні розрахункової моделі слід враховувати, що в SOLIDWORKS Simulation можна використовувати кілька типів скінченних елементів, такі як: 1) об'ємні тетраедри: для твердотільних моделей, тип скінченних елементів – “solid”; 2) балкові елементи: для елементів зварних металоконструкцій (швелер, прямокутні труби тощо), тип скінченних елементів – “beam”; 3) тонкостінні елементи (зокрема, для деталей з листового металу та оболонкових конструкцій), тип скінченних елементів – “shell”.

Як видно з рис. 2, а, в розробленій тривимірній моделі були використані всі зазначені типи скінченних елементів: балкові елементи для вертикальних опор і балок, що утворюють полиці стелажа; оболонкові елементи для металевих листів, які приварені до балок полиць, а також скінченні елементи у вигляді об'ємних тетраедрів для стандартних європіддонів і вантажу на них.

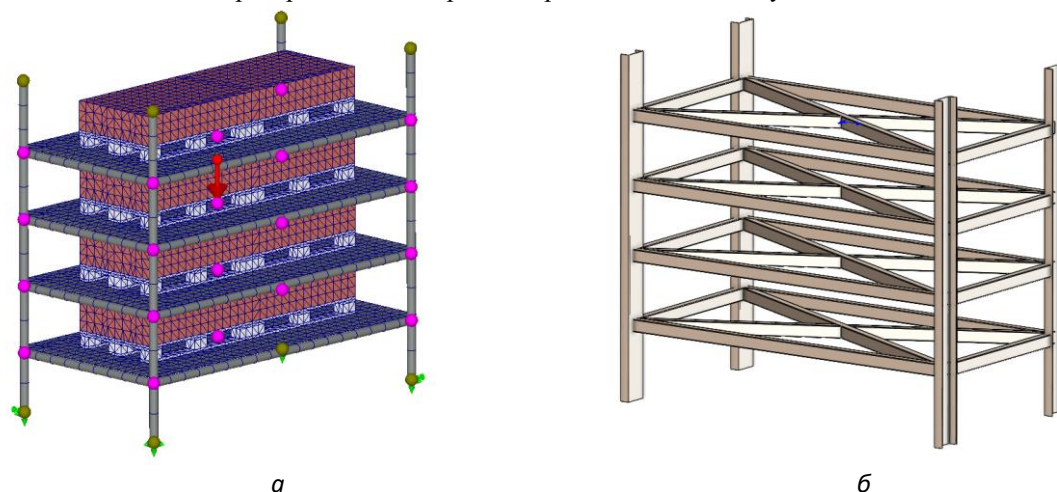


Рис. 2. Розроблена модель стелажа: а) скінченно-елементна сітка; б) зварна рама стелажа

Стелаж, призначений для складського приміщення, містить 4 полиці розміром 3000x1500 мм, загальна висота стелажа – 2500 мм, відстань між полицями по висоті – 560 мм. Стелаж призначений

для зберігання матеріалів на стандартних європіддонах розміром 1200x800 мм. Як видно з рис. 1, а, на кожній полиці планується розмістити по 2 таких піддони, а всього на чотирьох полицях – 8. Для виготовлення вертикальних опор стелажа було запропоновано використовувати стандартний швелер розміром 120x52x4,8 мм, для виготовлення полиць – стандартні прямокутні труби перерізом 60x30 мм, з товщиною стінки 4 мм. Матеріал опор і балок – Сталь 3, яка характеризується фізико-механічними характеристиками, що наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні фізико-механічні характеристики Сталі 3

Модуль пружності, МПа	Коефіцієнт Пуассона	Модуль зсуву, МПа	Густина а, кг / м ³	Межа міцності на розрив, МПа	Межа текучості, МПа	Тип моделі
2,1×10 ⁵	0,29	7,9×10 ⁴	7830	440	225	Лінійно-пружна ізотропна

Як видно з табл. 1, матеріал для виготовлення стійки (Сталь 3) будемо вважати лінійно-пружним ізотропним, тобто таким, що підпорядковується закону Гука до досягнення границі текучості ($\sigma_T = 225$ МПа). При виконанні розрахунків прийемо, що критерієм руйнування за замовчуванням буде – “Максимальне напруження по Мізесу”, що використовується для пружних матеріалів, в межах лінійної ділянки діаграми «напруження-деформація». Відношення значення границі текучості матеріалу до значення максимального робочого напруження в моделі визначатиме коефіцієнт запасу міцності (FOS – Factor of Safety): для забезпечення достатньої міцності конструкції значення FOS має бути більшим за 1, але рекомендується, щоб воно знаходилося в наступних межах: $FOS \geq 1.25...1.5$.

Результати дослідження та обговорення. Як зазначено вище, для проведення необхідних розрахунків на міцність моделі складського стелажа був використаний чисельний метод скінченних елементів, розрахункова модель якого включає різні типи елементів: твердотільні, тонкостінні і балкові. Особливістю балкових елементів є те, що їх закріплення та прикладання навантаження проводиться по вузловим точкам (nodes), яких для кожної балки в загальному випадку є дві (на кінцях балки). Проте розділивши твердотільну конструкцію балки на декілька елементів перед створенням розрахункової моделі, можна отримати додаткові вузлові точки. Отже, закріплення моделі типу Fixed (нерухоме) проводилось по 4-м нижнім вузлам зварної рами. Додаткові сили чи навантаження на модель не задавались, враховувалась тільки вага конструкції разом з вантажем, для чого було визначено навантаження типу Gravity Force (сила тяжіння).

В результаті розрахунків, які були проведені для розробленої моделі, були отримані наступні результати: розподіл напружень в елементах моделі (рис. 2); максимальне переміщення точок моделі (рис. 3, а), яке може характеризувати жорсткість зварної рами стелажа, а також розподіл коефіцієнта запасу міцності (рис. 3, б).

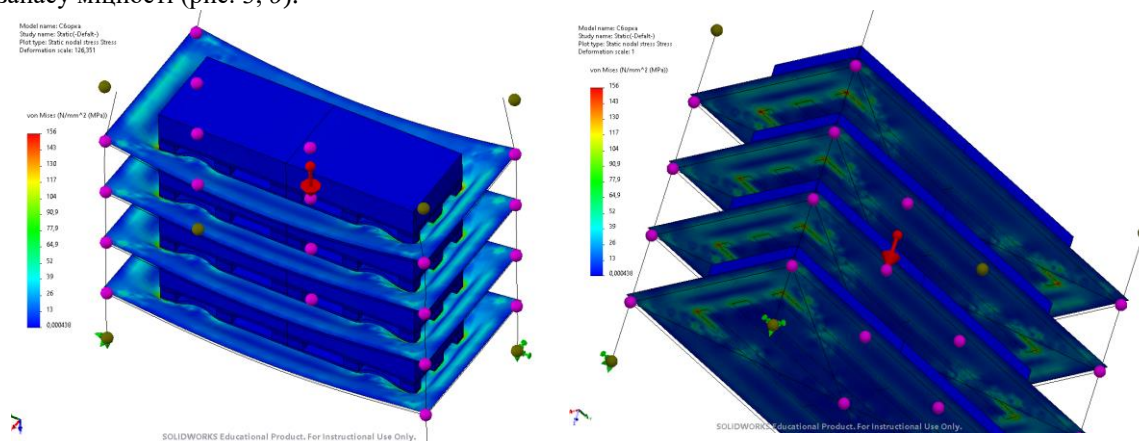


Рис. 3. Результати розрахунків: розподіл напружень у моделі, по Мізесу

Отримані результати можуть бути використані для прогнозування вантажопідйомності стелажа. Як було зазначено вище, рекомендується, щоб коефіцієнт запасу міцності моделі знаходився в межах $FOS > 1.25...1.5$, тому задача полягає в тому, щоб знайти таке оптимальне значення навантаження, яке буде задовольняти цьому критерію. Для цього можна використати процедуру оптимізації, яка реалізована в програмному забезпеченні SOLIDWORKS Simulation під назвою “Design Study”. Під час оптимізації одним із змінних параметрів була висота вантажу на піддоні, яка змінювалась від 50 мм до 250 мм, таким чином загальна маса вантажу змінювалась відповідно від 3 до 15 тон (в якості вантажу – листовий метал зі Сталі 3).

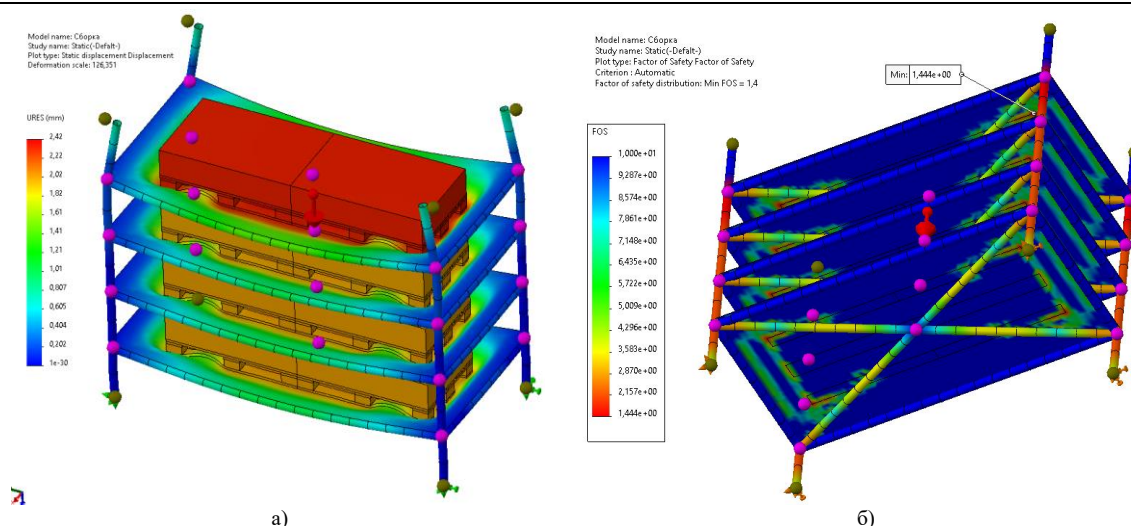


Рис. 4. Результати розрахунків: а) розподіл переміщень під дією ваги, мм; б) розподіл коефіцієнта запасу міцності, мінімальні значення FOS = 1,44

Також було встановлено обмеження, що FOS має бути більшим за 1, а цільовою функцією була максимізація маси вантажу на піддоні. Результати процедури оптимізації для складського стелажа з початковими розмірами конструкції наведені в табл. 2. Зазначимо, що рекомендований програмою оптимізації сценарій позначений зеленим кольором (сценарій №3), для якого коефіцієнт запасу міцності знаходиться в рекомендованих межах.

Для даного типу стелажа ми використовували перерізи балок 60x30 мм (товщина стінки – 4 мм), розміри швелерів (вертикальних опор) – 120x52x4,8 мм. Отже, як видно з табл. 2, встановлено, що для існуючої конструкції стелажа оптимальне безпечне навантаження становить 6000 кг на весь стелаж (1500 кг на кожну полицю), з коефіцієнтом запасу міцності 1,29. При цьому, як видно, максимальна висота вантажу на піддоні повинна бути не більше 100 мм. Однак існуючі геометричні розміри стелажа допускають значно більші значення (до 250 мм), тому виникає необхідність посилення конструкції з метою підвищення її вантажопідйомності та надійності. Крім того, як видно з отриманих результатів (табл. 2), значне збільшення товщини металевих листів для полиць (від 1 до 4 мм) не призводить до суттєвого збільшення коефіцієнту запасу міцності стелажа (відбувається збільшення власної ваги конструкції), тому надалі товщину листа металу в 1 мм будемо вважати достатньою.

Таблиця 2

Результати оптимізації для початкового варіанту конструкції

Параметр оптимізації	Номер сценарію								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Висота вантажу, мм	50	75	100	125	150	175	200	225	250
FOS, при товщині листа 1 мм	2,459	1,69	1,29	1,04	0,871	0,7493	0,6577	0,586	0,5284
FOS, при товщині листа 4 мм	2,53	1,785	1,375	1,118	0,9419	0,8140	0,7168	0,6404	0,5787
Загальна маса вантажу на стелажі, кг	3006,72	4510,08	6013,44	7516,8	9020,16	10523,52	12026,88	13530,6	15033,6

Для підвищення вантажопідйомності конструкції розміри поперечних перерізів балок (труб прямокутного поперечного перерізу) були збільшені до 100x70 мм (товщина стінки – 5 мм), розміри швелерів (вертикальних опор) були також збільшені до 200x76x5,2. Процедура оптимізації конструкції зварної рами із зазначеними розмірами балок проводилась за тих самих умов, що й у попередньому випадку. Результати розрахунків наведені у табл. 3, де рекомендований варіант (сценарій 9) виділено зеленим кольором.

Як видно з отриманих результатів, такий тип стелажа може витримувати 15 тон (замість 6 тон у попередньому випадку), при цьому максимальна висота вантажу на піддоні – 250 мм, а мінімальний коефіцієнт запасу міцності (FOS) буде достатнім – 1,36, при рекомендованій товщині листового металу для полиць – 1 мм. При збільшеній товщині листів металу на полицях (4 мм), коефіцієнт запасу міцності збільшиться незначно – 1,44.

Таблиця 3

Результати оптимізації для покращеного варіанту конструкції

Параметр оптимізації	Номер сценарію								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Висота вантажу, мм	50	75	100	125	150	175	200	225	250
FOS, при товщині листа 1 мм	5,58	4,039	3,155	2,586	2,189	1,899	1,675	1,5	1,36
FOS, при товщині листа 4 мм	5,991	4,345	3,383	2,765	2,337	2,024	1,784	1,6	1,44
Загальна маса ван-тажу на стелажі, кг	3006,72	4510,08	6013,44	7516,8	9020,16	10523,52	12026,88	13530,6	15033,6

Слід зазначити, що збільшення вантажопідйомності стелажа в 2,5 рази можливе лише за рахунок збільшення розмірів поперечного перерізу балок і вертикальних опор, що також збільшує вагу конструкції, її металоємність, що відповідно підвищує вартість її виготовлення. Для порівняння: у першому випадку вага конструкції становить 563 кг, а у варіанті конструкції стелажу з посиленними балками – 1082 кг.

Однак слід зазначити, що використання конструкції з посиленними 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.

Однак розглянемо також актуальну задачу збільшення вантажопідйомності складського стелажу без суттєвого збільшення його металоємності, що відповідно дозволило б зробити це без суттєвого збільшення вартості виготовлення. Для вирішення цієї задачі скористаємось відомими принципами опору матеріалів: 1) для ефективної роботи балок прямокутного перерізу на згин під дією вертикальної сили, необхідно орієнтувати їх вертикально; 2) для ефективного зменшення напружень в моделі, що виникають під дією навантажень, які спричиняють згин, необхідно обмежити максимальні переміщення деталі шляхом введення в конструкцію додаткових опор, які будуть працювати на стиск. Таким чином, це дозволяє замінити напруження згину в деталі на напруження стиску, що є доцільним; 3) в місцях концентрації напружень доцільно вводити в конструкцію додаткові балки – для більш рівномірного розподілу цих напружень в моделі.

Проаналізувавши результати попередніх розрахунків, які наведені на рис. 2 та рис. 3, можна зазначити, що якщо кожен полицю стелажа розглядати як балку на двох опорах, на яку діє розподілене навантаження, то в цьому випадку найбільші переміщення під дією сили будуть в центрі балок (в місці перетину діагональних балок кожної полицки), тому введення ще однієї додаткової опори в центрі стелажа дозволить обмежити максимальні переміщення під дією ваги вантажу, тим самим замінивши напруження згину на напруження стиску. Слід зазначити, що таку додаткову опору можна вводити тільки в тому випадку, якщо ширина вантажу не перевищує ширину європіддону, на якому він розміщується. В іншому випадку доцільним варіантом збільшення вантажопідйомності стелажа є варіант посилення балок, який був розглянутий вище.

Крім цього, аналіз результатів розрахунку на міцність показує, що максимальні напруження в моделі діють вздовж лівого та правого країв піддонів, на яких розміщено вантаж (рис. 2). Крім того, в цих же зонах спостерігаються і найменші значення коефіцієнта запасу міцності (рис. 3, б). Тому, розмістивши додатково по дві балки на кожній полиці, ми можемо посилити їх конструкцію і розподілити напруження в моделі більш рівномірно. Запропонована конструкція стелажа з додатковою опорою та балками показана на рис. 4, а. Для розміщення там вантажу зі збільшеною висотою (до 500 мм) відстань між полицями було збільшено до 700 мм, а висоту вертикальних опор збільшено до 3000 мм. Результати проведеної оптимізації наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Результати оптимізації для покращеної конструкції (з додатковою опорою)

Оптимізація параметр	Номер сценарію											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Висота вантажу, мм	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
FOS, товщина листа – 1 мм.	2.301	2.075	1.889	1.734	1.603	1.489	1.391	1.305	1.229	1.162	1.101	1.046
Загальна маса вантажу, кг	13530	15033	16536	18040	19543	21047	22550	24053	25557	27060	28563	30067

Таким чином, отримані результати оптимізації показують, що оптимальною висотою вантажу є 400 мм, це відповідає загальній масі вантажу на стелажі – 24 тони (по 3 тони на кожний піддон), що в 4 рази перевищує вантажопідйомність вихідної конструкції (див. табл. 2). Зазначимо також, що розрахунок фундаменту конструкції не входив в задачі дослідження.

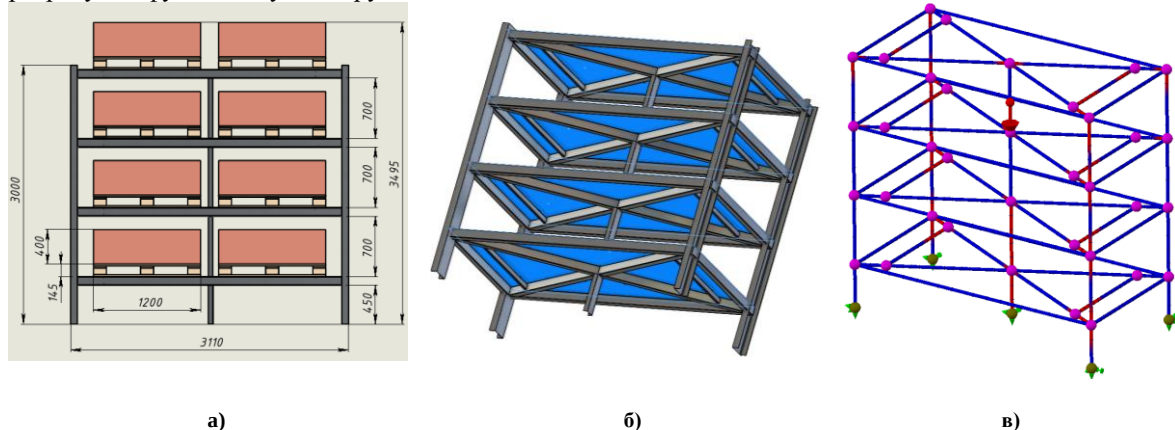


Рис. 4. Удосконалена конструкція стелажа: а) габаритні розміри стелажа; б) додаткова опора в центрі та додаткові балки полиць; в) розподіл коефіцієнту запасу міцності (FOS) окремо у балках моделі: червоним кольором позначено елементи з $FOS < 3$, синім – інші.

Важливим параметром конструкції є її металоємність, яка прямо пропорційна вартості її виготовлення. Вище вже зазначалось, що маса початкового варіанту стелажа становить 563 кг (оптимальний варіант у табл. 2), а оптимальний варіант зі збільшеним перерізом балок – 1082 кг (табл. 3). Для порівняння також було визначено, що оптимальний варіант стелажа з додатковою опорою та балками (табл. 4) становить 657 кг. Таким чином, використання додаткової опори і балок дозволяє збільшити вантажопідйомність стелажа в 1,6 рази (порівняно з другим варіантом), і при цьому загальна металоємність оптимізованої конструкції буде на 39% меншою.

Висновки

В результаті проведених досліджень було визначено вантажопідйомність складського стелажа за допомогою методу скінченних елементів (MCE), який реалізований в системі інженерного аналізу SOLIDWORKS Simulation. Встановлено, що для початкової конструкції стелажа оптимальне безпечне навантаження для всієї конструкції становить 6000 кг (1500 кг на кожну полицю), що забезпечує достатній коефіцієнт запасу міцності – 1,29. Для проектування удосконаленого стелажа, з метою збільшення його вантажопідйомності порівняно з початковим варіантом, було розраховано варіант зі швелером для опор – 200x76x5,2 (замість 120x52x4,8), а також балками зі збільшеним прямокутним поперечним перерізом – 100x70x5 (замість 60x30x4), що дозволило збільшити загальну вантажопідйомність спроектованої конструкції в 2,5 рази – до 15 тон. Відповідно до проведених розрахунків, при цьому буде забезпечено достатній коефіцієнт запасу міцності – 1,36. Таким чином, використання такої конструкції дозволить значно ефективніше використовувати площу складу та запобігатиме критичному перевантаженню стелажів. Також було встановлено, що у випадку, коли ширина вантажу не перевищує ширину піддона, можна використовувати початковий варіант стелажа з додатковою опорою по центру і двома додатковими балками на кожній полиці: в цьому випадку вантажопідйомність може бути збільшена в 4 рази (до 24 тон) порівняно з початковим варіантом, що стало можливим завдяки перерозподілу навантаження на додаткову опору, яка працює на стиск. При цьому забезпечується допустиме значення коефіцієнту запасу міцності – 1,305.

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

Хмельницький національний університет висловлює подяку компанії Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp. за надане програмне забезпечення в рамках грантового фінансування, що дозволяє використовувати в навчальному процесі найсучасніші версії SOLIDWORKS, а також компанії Softico (м. Київ) – за технічну підтримку.

Література

1. Kharzhevskiy V., Marchenko M. The usage of SOLIDWORKS CAD/CAM/CAE technologies in Khmelnytskyi National University // Actual problems of modern science : [collective monograph]. UTP University of Science and Technology, Bydgoszcz, Poland, 2021. P. 347–355.
2. Kharzhevskiy V., Marchenko M., Tkachuk V. The solution of problems of kinematics and dynamics in the theory of mechanisms and machines by means of SOLIDWORKS Motion // Actual Problems of Modern Science : [collective monograph]. UTP University of Science and Technology, Bydgoszcz, Poland, 2024. P. 366–375

3. Kurowski P. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2022. CRC Press. 2022. 582 p. ISBN: 978-1-63057-469-7.
4. Kuang-Hua Chang. Motion Simulation and Mechanism Design with SOLIDWORKS Motion: SDC Publications, 2021, ISBN: 978-1-63057-388-1. 220 p.
5. Howard W., Musto J. Introduction to Solid Modeling Using SOLIDWORKS 2022 [18 ed.]. McGraw Hill. 432 p.
6. Liu S., Wu Z. [et al.] A review of welding simulation methods for large components. Progress in Natural Science: Materials International, Vol. 33, Issue 5, 2023. P. 551-568.
7. Mustapha K. Practical Finite Element Simulations with SOLIDWORKS 2022: An illustrated guide to performing static analysis with SOLIDWORKS Simulation. Packt Publishing. 2022. 480 p.
8. Nudehi S., Steffen J. Analysis of Machine Elements Using SOLIDWORKS Simulation 2022. SDC Publications. 2017. 550 p.
9. Shkut A. A methodological approach to assessing the durability of welded structures of screens using SOLIDWORKS Simulation software. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2023, № 6. P.79-85.
10. Verma G. SolidWorks Simulation 2021 Black Book. CAD/CAM/CAE Works. 2020. 436 p.
11. Zdravski F., Bogatinoski Z., Trajanoska B. Modeling of single-fillet lap joint in SOLIDWORKS Simulation, 2016, 14 (349). P. 21-27.