

ХАРЖЕВСЬКИЙ АНТОН
Хмельницька гімназія №1 ім. В.Красицького
<https://orcid.org/0000-0003-0911-7881>
e-mail: a.kharzhevskiy@gmail.com

ГОРЯЩЕНКО Сергій
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0001-6623-2523>
e-mail: gsl7@ukr.net

ХАРЖЕВСЬКИЙ В'ячеслав
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0003-4816-2781>
e-mail: kharzhevskiy@khmnu.edu.ua

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПАРАМЕТРІВ КОЛІС ПРИ ПРОЄКТУВАННІ ШАСІ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ ЗАСОБАМИ SOLIDWORKS SIMULATION

В роботі розглядаються питання проектування роботизованої платформи для ближньої розвідки територій, зокрема – питання вдосконалення конструкції коліс та науково-обґрунтований вибір їх параметрів. Задача була розв'язана шляхом перевірки запропонованої в роботі конструкції на міцність, що для випадку деталей з пластику вимагає проведення нелінійного статичного аналізу та попереднього визначення величин сил, що діють на колеса у випадку падіння машинки з певної висоти. Показано забезпечення коефіцієнту запасу міцності за критерієм максимальних нормальних напружень. Конструкція реалізована у вигляді комп'ютерної 3D-моделі та виготовлена на 3D-принтері.

Ключові слова: роботизована платформа, розвідка територій, автоматизоване проектування, комп'ютерне моделювання, нелінійний аналіз.

KHARZHEVSKYI Anton
Khmelnitskyi Gymnasium No. 1 named after V. Krasyskyi
HORIASHCENKO Serhiy, KHARZHEVSKYI Viacheslav
Khmelnitskyi National University

JUSTIFICATION OF THE DESIGN AND PARAMETERS OF THE WHEELS DURING THE DESIGN PROCESS OF THE CHASSIS OF A ROBOTIC PLATFORM USING SOLIDWORKS SIMULATION

The design of robotic platform for close reconnaissance of territories is a topical scientific and engineering task, that obviously has a dual purpose – both civilian and military. Despite the fact that leading global companies are engaged in the development of such technical systems, it is important to ensure operation in difficult conditions, in particular in the conditions of the need for increased passability that requires the development of an improved design of wheels and a scientifically based choice of their parameters – which was an aim of the paper. The problem was solved by calculating the strength of the design proposed in the work, that for plastic parts requires to conduct a non-linear static analysis, determination of the forces acting on the wheels in case of its falling from a certain height. It was established that the safety factor is sufficient according to the criterion of maximum normal stresses.

The developed new design of wheels for a robotic machine differs from existing designs by an increased diameter and the presence of a tread that significantly increases the passability compared to known prototypes. As a result of the conducted research, it is shown that the cellular structure of the wheel generally increases the strength and rigidity of the wheels. It was also established that despite the increase in the mass of the wheels to ensure the increased passability of the robotic vehicle, the stress value during impact (falling from a height) is reduced due to the proposed rational design of the wheels, while the minimum safety factor according to the criterion of maximum normal stresses is increased. The design is implemented as a computer 3D model and was manufactured using a 3D printer.

Key words: robotic platform, reconnaissance of territories, automated design, computer modeling, nonlinear analysis.

Постановка проблеми

Розробка роботизованих технічних систем, безпілотних апаратів, є безперечно актуальною задачею в нашому сьогоденні в Україні – як для військового, так і цивільного призначення. Одним із таких напрямків є розробка роботизованих машинок. Очевидно, що цілий ряд задач можна розв'язувати за допомогою таких апаратів – пошук у завалах, патрулювання територій, розвідка тощо. Очевидно, що розробкою таких технічних систем займаються в тому числі кращі світові компанії, проте власні розробки можуть бути спрямовані для роботи в конкретних умовах, наприклад – в умовах бездоріжжя, по ґрунтовим дорогам, для чого потрібно забезпечити не тільки задані технічні характеристики, але й забезпечити міцність та відповідну функціональність усіх деталей та вузлів. Проте забезпечення цих характеристик вимагає не тільки проведення конструювання, але й відповідних наукових досліджень, які би обґрунтовували вибір тих чи інших конструктивних рішень.

Аналіз останніх джерел

Загальні питання прикладної робототехніки, що лежать в основі методів побудови сучасних роботів та робототехнічних систем, досить ґрунтовно описані в роботі [1]. В результаті проведеного аналізу літератури з цього напрямку та огляду відомих роботизованих машинок, що розробляються провідними світовими компаніями, встановлено, що проектування роботизованих машинок для роботи в умовах

бездоріжжя є важливою актуальною науково-технічною задачею. Розглянемо приклади сучасних роботизованих машинок.

“**Sand Flea**” (робот–«піщана блоха»). Для потреб армії США компанією Boston Dynamics було створено колісного робота-машинку з унікальними характеристиками. Робот має назву “*Sand Flea*” – “Піщана блоха” [2] (рис. 1, а), що несе на борту відеокамеру, рухається та контролюється як звичайний іграшковий автомобіль з дистанційним керуванням, його унікальна функція – стрибати вгору на висоту до 10 метрів –перетворює його на ефективний та зручний апарат для розвідки. Спочатку машинка “встає дибки”, а потім стрибає, відштовхуючись поршнем у своїй задній частині: оператор може регулювати кут старту і висоту стрибка. Для стрибка ця машинка використовує поршень зі стиснутим вуглекислим газом. Бортова система стабілізації тримає її в рівновазі під час польоту, а також для орієнтування в просторі.



Рис. 1. Приклади відомих роботизованих машинок: “*Sand Flea*”, розробка Boston Dynamics (а), машинка RHex, Boston Dynamics (б), робот-тарган, розробка Каліфорнійського університету (в)

На машинці встановлена камера, яка оснащена видимим та інфрачервоним підсвічуванням і робить знімки з роздільною здатністю 1280x960 пікселів, а також передає відео в реальному часі. На одній зарядці вона може стрибнути 25 разів. Головний плюс машинки: за допомогою своїх маленьких габаритів робот-блоха може пролізти в невеликі щілини, що допомагає їй досліджувати територію або навіть використовувати її для порятунку людей. Під час руху та посадки, рухи контролюються системою стабілізації. Головний мінус: одного заряду акумулятора вистачає лише приблизно на 2 години, тому на даний момент вона не зможе брати участь у довгих спецопераціях або розслідуваннях. Розробники у компанії Boston Dynamics вважають, що окрім військового призначення, машинка також може використовуватись в поліцейських операціях, може працювати для служб надзвичайних ситуацій, а також брати участь в археологічних дослідженнях.

Машинка RHex (робот-тарган) [2]. Машинка RHex розроблялась на замовлення військових для ведення розвідки та прихованого спостереження. Робот представляє собою розвідника, який може працювати в радіусі 700 метрів від оператора та має повністю герметичний корпус (рис. 1, б). Незалежно від місця приземлення, йому вдається тримати баланс, стабільність – це найважливіша характеристика таких роботів. Сучасні роботи компанії Boston Dynamics, як і раніше, переміщуються на шести лапках-педалях, що підтверджує те, що RHex став важливим прикладом для наступних поколінь роботизованих машинок. Робот RHex допомагає проводити дослідження за допомогою вбудованої камери, яка дозволяє бачити те саме, що і робот в режимі реального часу. Від часу створення, цей робот завжди був популярним і вважався однією з найкращих розробок компанії Boston Dynamics. Існує також «амфібійна» (плаваюча) модифікація RHex, що відрізняється наявністю ніг з вуглепластику, які можуть гнутись на 120 градусів, за рахунок чого досягається більша швидкість. До недоліків такої конструкції слід віднести не тільки збільшене енергоспоживання, але також ускладнення систем керування та програмного забезпечення.

Робот-тарган – розробка Каліфорнійського університету [3]. Інженери з Каліфорнійського університету виготовили мініатюрного робота, який може долати перешкоди, не використовуючи додаткових датчиків для аналізу оточення. Взвзявши за приклад справжнього таргана, дослідники забезпечили робота овальним «панциром», який дозволяє йому виплутуватись із важких ситуацій (рис. 1, в). «Розумних» роботів, що долають перешкоди зазвичай оснащують різними датчиками, камерами, далекомірами та інтелектуальними системами побудови картини навколишнього простору, а складні алгоритми визначають найкращий шлях, яким можна пройти через місцевість. Але, як пояснюють автори роботи [3], за наявності великої кількості перешкод, розмір яких можна порівняти з розмірами самого робота, такий підхід починає викликати серйозні труднощі. Робот має обтічну форму, що не дає їм зачепитися за перешкоди – в результаті без будь-яких додаткових датчиків і змін у алгоритмі, він досить ефективно пробивається крізь сторонні предмети, на відміну від звичайних повільних роботів, які вмюють пересуватись поверхнею.

Мета роботи полягає в розробці вдосконаленої конструкції роботизованої платформи для ближньої розвідки території та знаходження технічних рішень, що дозволили би їй працювати в умовах бездоріжжя, а також проведення науково-обґрунтованого вибору її параметрів, зокрема – конструкції коліс.

Виклад основного матеріалу

Проведення комп’ютерного моделювання колеса роботизованої машинки. В якості прототипу для проведення досліджень та відповідно удосконалень конструкції вибрано роботизовану машинку «*Sand*

Flea» (робот-блоха), що описана вище. Для проектованої платформи в майбутньому планується забезпечити функціональність стрибання, що є важливою з практичної точки зору, проте використання існуючої робомашинки у важких умовах, що вимагають її підвищеної прохідності, є обмеженим, зважаючи на конструкцію коліс. Отже, у даній роботі буде проведено розробку нової конструкції коліс, що дозволить збільшити прохідність, зберігаючи ті позитивні характеристики, що вже закладені в конструкцію прототипа.

Розглядаючи конструкцію стандартного колеса «робота-блохи», слід відзначити, що воно не має протектора, а представляє собою практично гладку пластмасову поверхню. Для підвищення прохідності пропонується максимально збільшити їх діаметр, а до того ж – сформувати на їх поверхні протектор. До цікавих відомих конструктивних рішень коліс «робота-блохи», на які ми звернули увагу, слід віднести наступне: 1) колеса мають бокову підтримку у вигляді шипів, що дозволяє машинці прийняти горизонтальне положення у випадку падіння на бік; 2) колеса мають комірчасту структуру, що дозволяє ефективно перерозподіляти напруження, що виникають у колесі під час динамічних навантажень (ударів).

Отже, поряд зі збереженням відомих переваг конструкції коліс «робота-блохи», вона була удосконалена, зокрема – нами була розроблена наступна модель колеса машинки (рис. 2).

В якості матеріалу моделі було призначено пластик «ABS», що використовувався під час 3D-друку для виготовлення коліс. Моделювання проведено у системі SOLIDWORKS, з використанням методів, описаних у [4]. Для визначення маси спроектованого колеса було використано вбудований інструмент SOLIDWORKS – Evaluate, Mass Properties. Крім маси колеса у 102,24 г., було визначено також інші його параметри – об’єм, площу поверхні, центр мас, головні осі та моменти інерції деталі. Зазначені параметри можуть використовуватись при проведенні кінематичних та динамічних розрахунків. Розроблене колесо було виготовлено шляхом аддитивного друку – з використанням 3D-принтера, в якості матеріалу було використано пластик ABS. Виготовлену модель колеса показано на рис. 3.

Для порівняння, розглянемо також колесо, що стандартно використовується у роботизованих машинках, які проектується у навчальних цілях: 3D-модель цього стандартного колеса було знайдено на інтернет-ресурсі <http://grabcad.com> та показано на рис. 6, а. На відміну від розробленої нами конструкції, зовнішній діаметр цього колеса складає 70 мм (наша модель – 100 мм), бокова підтримка тут відсутня, протектор не призначений для роботи у важких умовах.

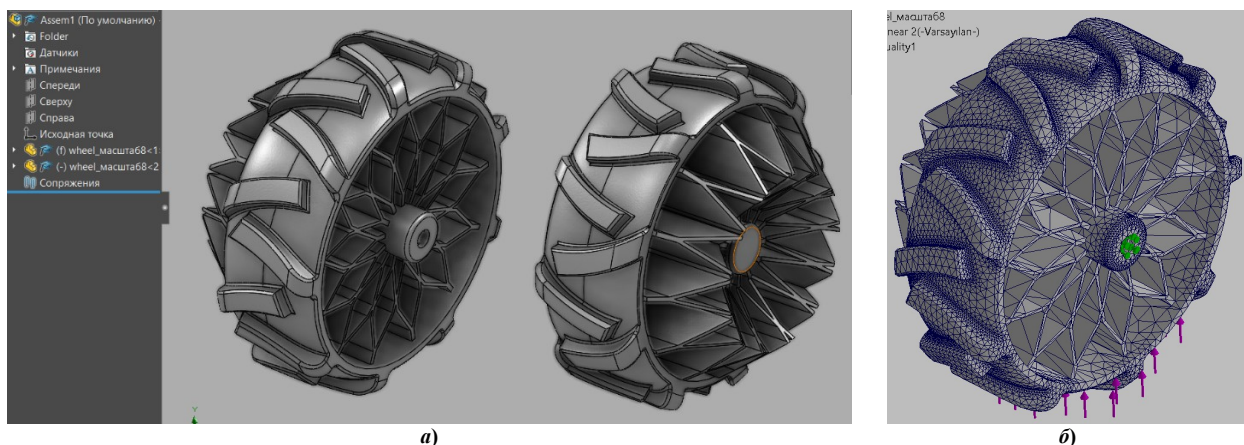


Рис. 2. Розроблена комп’ютерна модель колеса у SOLIDWORKS (а) та її розбиття сіткою методом скінченних елементів (б)

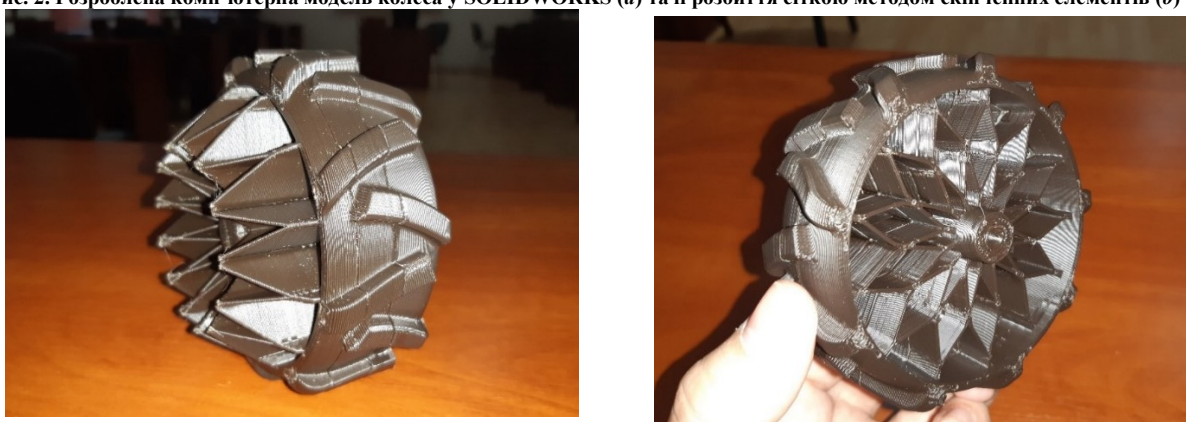


Рис. 3. Виготовлена модель колеса робомашинки на 3D-принтері

Оскільки в майбутньому планується модернізувати розроблену платформу, причому для прототипа *Sand Flea* (робота-блоха, що розглядалась вище) характерною є функціональність «стрибати» на значні висоти, то можна змоделювати падіння машинок різних конструкцій з висоти 3 метри і порівняти міцність, визначивши напруження, що при цьому будуть виникати в колесах базової та вдосконаленої конструкцій.

Для проведення розрахунків використаємо систему інженерного аналізу SOLIDWORKS Simulation,

що є окремим додатком до системи комп'ютерного моделювання SOLIDWORKS. Моделі коліс, які ми розглядаємо, виготовлені з пластику, що не є пружним матеріалом, і який не підкоряється закону Гука, тому провести класичний статичний аналіз методами опору матеріалів тут не можна – отримані результати не будуть коректними. Отже, необхідно провести нелінійний статичний аналіз, з використанням SOLIDWORKS Simulation.

Розрахунок ударних навантажень. Для складання математичної моделі необхідно спочатку визначити сили, які будуть діяти на колесо у випадку його удару об поверхню. При цьому варто відрізнити два випадки: 1) удар на «абсолютно пружній» поверхні, що не передбачає проникнення колеса у поверхню, наприклад удар об бетонну поверхню (в англійській термінології, що використовується у SOLIDWORKS Simulation цей вид взаємодії називається “no penetration” – “без проникнення”); 2) удар об поверхню «з проникненням» колеса (наприклад, в ґрунт). Відмінність полягає в тому, що в другому випадку сила удару буде частково гаситись самою поверхнею. Розрахунок можна провести відповідно до закону збереження енергії (потенційна енергія перетворюється в кінетичну). Як видно з рис. 4, для розрахунку сили удару необхідно задатись масою деталі $m = 0,102$ кг, висотою падіння $h = 3$ м, тоді можна отримати швидкість колеса:

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 3} = 7,672 \text{ м/с.} \quad (1)$$

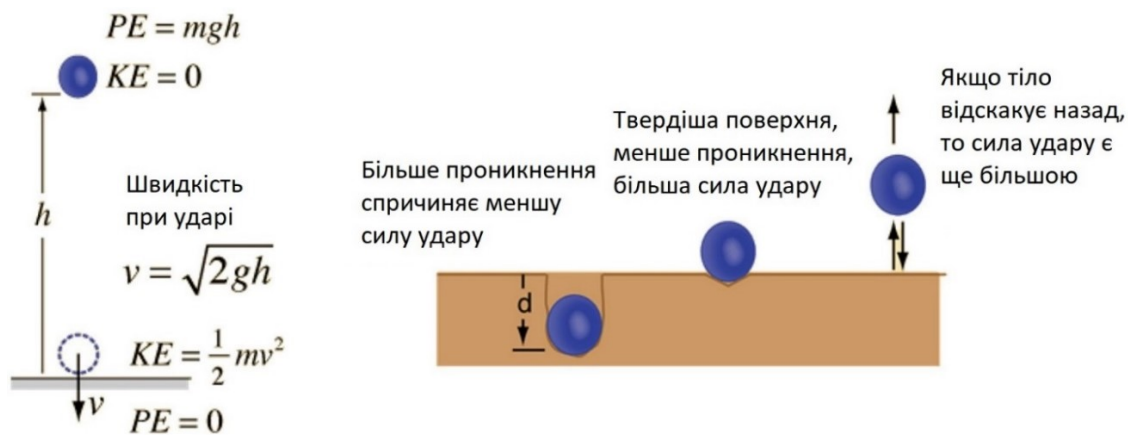


Рис. 4. Схема до розрахунку сили удару [5]

Розрахуємо величину кінетичної енергії KE :

$$KE = mv^2/2 = 0,102 \cdot 7,672^2/2 = 3,002 \text{ Дж.} \quad (2)$$

Силу удару тоді можна розрахувати, якщо задатись величиною відстані d , на яку тіло (колесо) буде занурене у поверхню в результаті удару (рис. 4). Розглянемо випадок наявності ґрунту, у який колесо масою $m = 0,102$ кг, падаючи з висоти 3 м, заглиблюється на величину, наприклад, $d = 2$ см. Тоді силу удару можна розрахувати наступним чином [5]:

$$F = KE/d = 3,002/0,02 = 150,1 \text{ Н.} \quad (3)$$

Розглянемо другий випадок – поверхня, на яку падає колесо є абсолютно пружною, і проникнення у неї немає зовсім – $d = 0$ мм. Відповідно, до формул (1)-(3), величина сили прямувала би до нескінченності $F \rightarrow \infty$. В такому випадку для розрахунку сили удару використовують інші закономірності, що враховують час t взаємодії (удару) між тілом та поверхнею. Задатись величиною цього часу можна лише наближено і однозначних рекомендацій з цього питання немає, оскільки ця величина практично залежить від багатьох параметрів, то проведемо наступний розрахунок: визначимо силу удару для випадку 1 – для обох типів коліс (базової конструкції та удосконаленої), та визначимо величини напружень, що будуть виникати в кожному з цих коліс під час удару об поверхню. При цьому, які б ми не отримали величини напружень для випадку 2 для коліс обох конструкцій, співвідношення цих напружень для коліс обох типів, ймовірно, будуть однаковими як для випадку 1, так і для випадку 2. Тобто, отримані результати можна екстраполювати на випадок умовно абсолютно жорсткої поверхні, об яку відбувається удар.

Розрахунок на міцність колеса удосконаленої конструкції. Розглянемо колесо удосконаленої конструкції (рис. 2), завантажене у середовище SOLIDWORKS. Розрахунок на міцність будемо проводити методом скінченних елементів, в основі якого лежать числові розрахункові методи [6]. Для проведення розрахунків цим методом об'ємна деталь розподіляється на об'ємні тетраедри, для кожного з них, у вершинах, будуть розраховуватись переміщення та величини напружень, що будуть виникати під дією сил. Для створення сітки було використано адаптивний варіант розбиття – у місцях більшої кривизни, за наявності мілких елементів – створювалась більша сітка (рис. 2, б).

Для проведення розрахунків на міцність будемо використовувати тип розрахунку – нелінійний статичний, матеріал деталі – пластик ABS. Неможливість проводити розрахунок з використанням звичайного статичного аналізу впливає з того, що матеріал колеса не є пружним, не підкоряється закону

Гука. Отже, є необхідність у проведенні нелінійного статичного аналізу. Розробка математичної моделі включала встановлення закріплень, розташування сил, та проводилось відповідно до рекомендацій, що надані в роботах [6-8] для випадку нелінійного статичного аналізу.

Отже, у розробленій математичній моделі були використані наступні початкові дані математичної моделі: 1) закріплення: по посадочній поверхні маточини, що таким чином умовно вважається абсолютно нерухомою; 2) навантаження – сила удару $F = 150,1 H$, що діє на нижню поверхню колеса. Результат проведеного розрахунку показано на рис. 5. Як видно з отриманих результатів, максимальне напруження на колесо, при силі удару $150,1 H$ становить $\sigma = 14,8 MPa$, а максимальна розрахункова деформація колеса – $0,1$ мм.

Одним з найважливіших результатів проведених розрахунків є коефіцієнт запасу міцності: значення більше одиниці, означають, що деталь спроможна працювати у вказаних умовах та може витримати зовнішні навантаження. Для нелінійних розрахунків, як відомо, є можливість розрахувати коефіцієнт запасу міцності за критерієм максимальних нормальних напружень. Відповідні розрахунки були також проведені у системі інженерного аналізу SOLIDWORKS Simulation. В результаті, було встановлено розподіл коефіцієнтів запасу міцності в колесі, як показано на рис. 5, б, причому, як видно, мінімальне значення складає $1,48$, що дозволяє стверджувати щодо працездатності розробленої моделі.

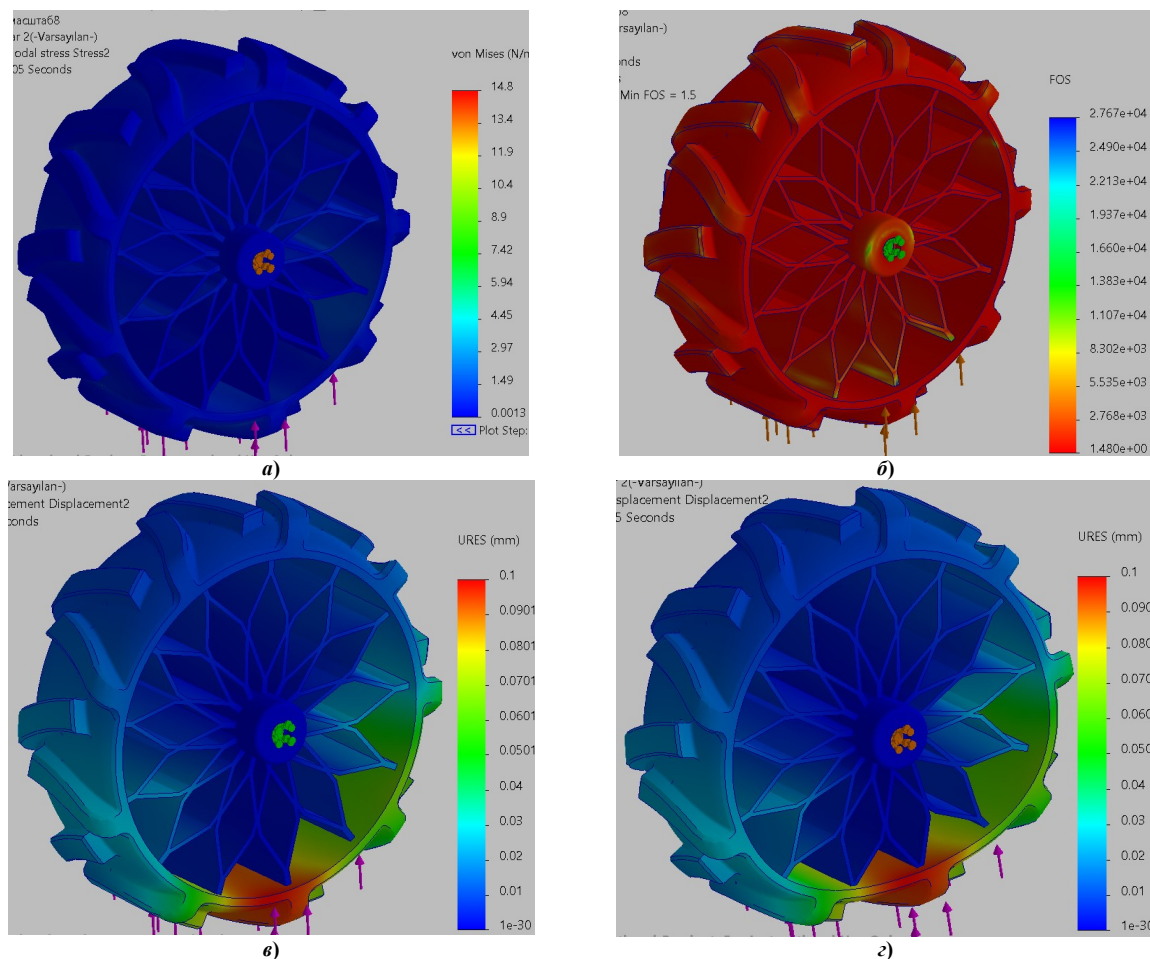


Рис. 5. Результати проведеного розрахунку: напруження за Місесом, МПа (а); розподіл коефіцієнту запасу міцності у колесі розробленої конструкції (б); розподіл переміщень під дією навантаження від удару: масштаб деформацій – 1:1 (в); масштаб деформацій – 50:1 (г)

Розрахунок на міцність колеса стандартної конструкції. Для порівняння, розглянемо колесо стандартної конструкції, яке зображено на рис. 6, а. Аналогічно до попереднього випадку, відповідно до методу скінченних елементів, спочатку проводимо розбиття колеса на скінченні елементи – об'ємні тетраедри, розмір яких встановлюємо залежно від кривизни геометрії моделі, мілкі елементи моделі мають бути розбиті більшою кількістю тетраедрів – для підвищення точності розрахунків. Результат розбиття показаний на рис. 6, б.

Перед проведенням інженерного аналізу моделі, з метою визначення напружень, переміщень та відповідно – коефіцієнта запасу міцності, попередньо необхідно визначити силу удару, яка буде діяти на колесо в момент зіткнення з поверхнею. Для цього, спочатку визначимо масу моделі: аналогічно, як і в попередньому випадку, стандартними засобами SOLIDWORKS (Evaluate – Mass Properties), результати показані на рис. 6, в.

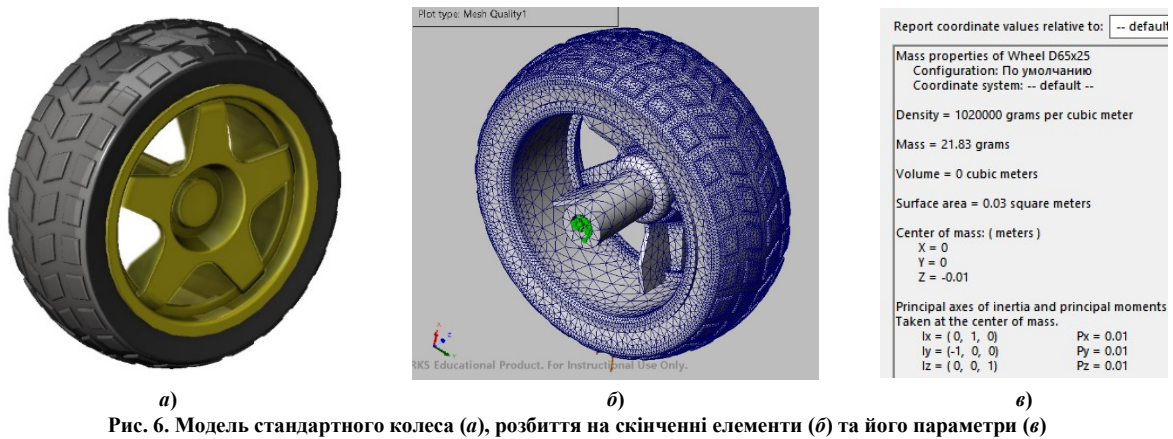


Рис. 6. Модель стандартного колеса (а), розбиття на скінченні елементи (б) та його параметри (в)

Для визначення величини сили удару, скористаємось тими ж формулами (1)-(3), які розглядали раніше. У зазначені формули підставляємо розраховану масу колеса $m = 0,022$ кг, аналогічну висоту падіння $-h = 3$ м, а шлях руху деталі після удару (глибину занурення) – розраховуємо пропорційно масі стандартного колеса відносно розробленого і розглянутого раніше: $d = 0,02 \cdot 0,022 / 0,102 = 4$ мм. Тоді величина сили удару:

$$F = mgh/d = 0,022 \cdot 9,81 \cdot 3 / 0,004 = 161,87 \text{ Н.} \quad (2.4)$$

Результати проведених розрахунків показані на рис. 7. Як видно з отриманих результатів, максимальне напруження на колесо, при силі удару 161,87 Н становить $\sigma = 22,2 \text{ МПа}$ – що перевищує у 1,5 рази напруження, що виникають при ударі спроектованого нами колеса, яке розглядалось вище.

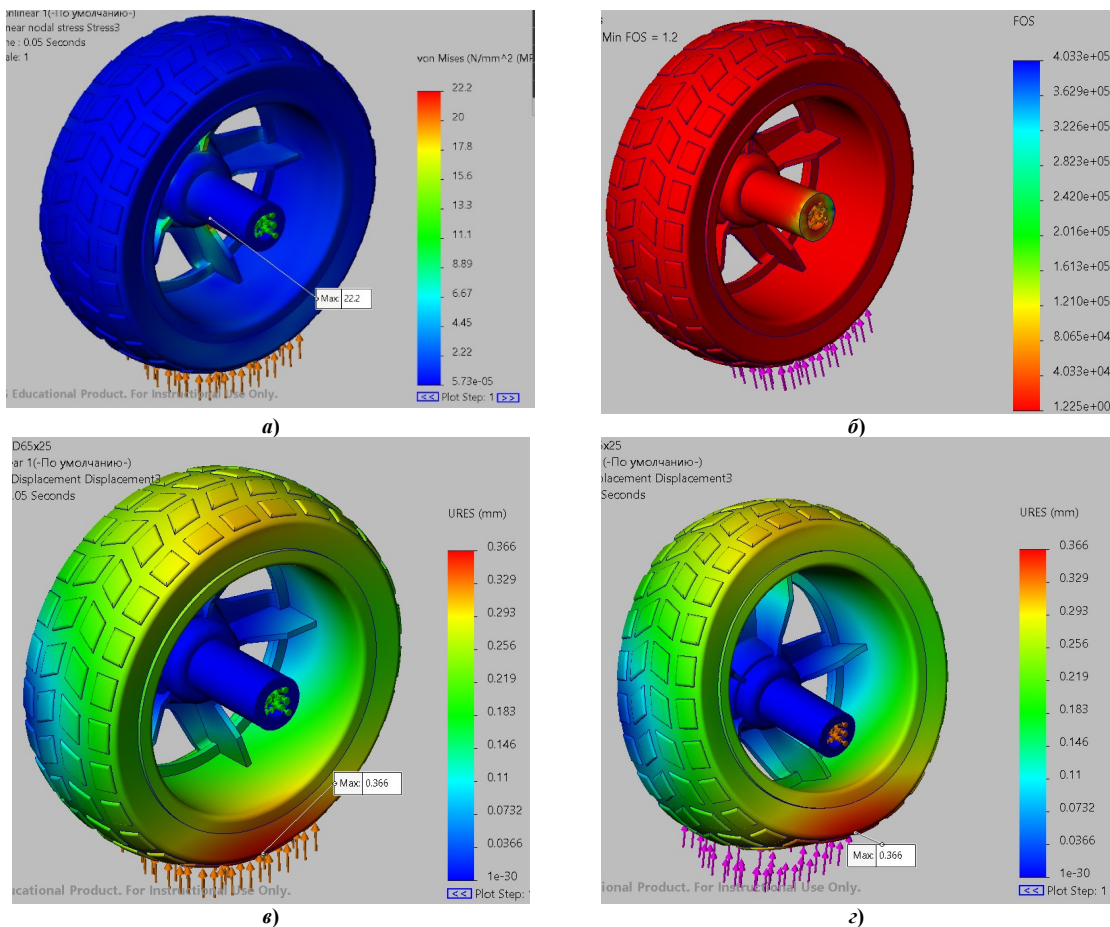


Рис. 7. Результати досліджень: напруження у колесі за Мізесом, МПа (а); коефіцієнти запасу міцності (б); переміщення під дією навантаження: масштаби деформацій – 1:1 (в); 50:1 (г)

На рис. 7, в, г показано розподіл отриманої максимальної розрахункової деформації стандартного колеса та її максимальне значення – 0,366 мм, що перевищує відповідне значення для спроектовано нами колеса, яке розглядалось раніше – 0,1 мм.

Отже, порівняння результатів, отриманих для різних конструкцій і показаних на рис. 5 та рис. 7,

показує більшу жорсткість розробленого нами колеса порівняно зі стандартним. Як зазначалось вище, при проведенні статичного нелінійного розрахунку є також можливість розрахувати коефіцієнт запасу міцності – за критерієм максимальних нормальних напружень. Результати відповідних розрахунків показано на рис. 7, б. Як видно з отриманих результатів, колесо розробленої нами конструкції забезпечує більший коефіцієнт запасу міцності порівняно зі стандартним колесом (1,48 проти 1,225), і при цьому забезпечує більшу жорсткість та менші напруження, що у свою чергу забезпечує більшу його надійність та довговічність.

Проектування робомашинки. Використовуючи розроблену конструкцію, методом 3D-друку було загалом виготовлено 4 таких колеса, а на їх основі – прототип роботизованої машинки (рис. 8), що приводиться у рух 4-ма двигунами, містить елементи живлення, а також основу (корпус), що спроектований у вигляді 3D-моделі в системі автоматизованого проектування Autodesk Fusion 360, що була виготовлена на спеціалізованому обладнанні шляхом лазерної різки. При проведенні моделювання використовувались методи, запропоновані в роботах [9, 10].

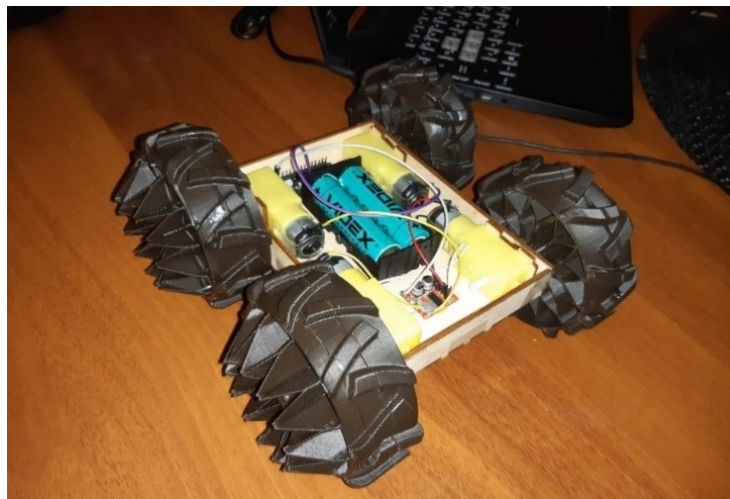


Рис. 8. Розроблена модель роботизованої платформи

Розроблена модель показала свою працездатність і може служити основою для подальших конструктивних покращень та функціональних удосконалень. Основна новація даної моделі – колеса спеціальної конструкції, що мають переваги робота-блохи (*Sand Flea*), і разом з тим дозволяють такій машинці мати значно більшу прохідність, забезпечуючи при цьому достатній рівень міцності та жорсткості коліс, що безумовно має значне практичне значення.

Висновки

В результаті проведених досліджень розроблено нову конструкцію коліс для роботизованої платформи, що відрізняється від існуючих конструкцій збільшеним діаметром та наявністю протектора, що значно збільшує прохідність порівняно з прототипом. Конструкція реалізована у вигляді комп'ютерної 3D-моделі та виготовлена на 3D-принтері. Встановлено закономірності для визначення сил, які діють на колесо під час удару з певної висоти. У системі SOLIDWORKS Simulation проведені розрахунки спроектованого колеса на міцність та жорсткість, визначено коефіцієнт запасу міцності. Оскільки матеріал не є пружним (пластик ABS), виникла необхідність у проведенні нелінійного статичного аналізу. Для порівняння, було проведено аналогічний розрахунок для стандартного колеса, що використовується при проектуванні машинок навчального призначення. Шляхом проведення числового експерименту встановлено, що при однакових початкових умовах спроектоване колесо забезпечує більший коефіцієнт запасу міцності. Проведено виготовлення прототипу робомашинки, для чого виготовлено всі 4 колеса та корпус, попередньо змодельований у системі 3D-моделювання Autodesk Fusion 360. Розроблену конструкцію коліс та роботизовану машинку в цілому рекомендується до використання в умовах необхідності підвищеної прохідності, на відміну від існуючих аналогів. Подальші дослідження планується продовжити в напрямку вдосконалення конструкції корпусу, а також встановлення додаткового обладнання, що розширить її функціональність щодо ближньої розвідки територій.

References

1. Reza N. Jazar. Theory of applied robotics : kinematics, dynamics, and control [Third ed.], Springer, 2022. – 836 с.
2. Boston Dynamics. LEGACY ROBOTS. The robots that built the groundwork for today's portfolio [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.bostondynamics.com/legacy>.
3. US Army funds horrifying morphing robot cockroach [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.wired.co.uk/article/robot-cockroach-study>
4. Howard W., Musto J. Introduction to Solid Modeling Using SOLIDWORKS 2022 [18 ed.], McGraw Hill, 2022. – 432 с.
5. Georgia State University. Department of Physics and Astronomy. HYPERPHYSICS [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/flobi.html>.

-
6. Mustapha K. Practical Finite Element Simulations with SOLIDWORKS 2022: An illustrated guide to performing static analysis with SOLIDWORKS Simulation, Packt Publishing, 2022. – 480 c.
 7. Verma G. SolidWorks Simulation 2017 Black Book [4th ed.], 2016. – 479 c.
 8. Kurowski P. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2018, CRC Press. – 600 c.
 9. Coward C. A Beginner's Guide to 3D Modeling: A Guide to Autodesk Fusion 360, No Starch Press, 2019. – 152 c.
 10. Sachidanand J. Autodesk Fusion 360 Exercises – 200 Practice Drawings For Fusion 360 and Other Feature-Based Modeling Software, University of KwaZulu-Natal, 2019. – 113 c.