

УДК 631.3:004.94

Дуганець В. І.

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри технічного сервісу і загальнотехнічних дисциплін,
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Кам'янець-Подільський, Україна
E-mail: duganec.vasil@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2946-2850

Федірко П. П.

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технічного сервісу і загальнотехнічних дисциплін,
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Кам'янець-Подільський, Україна
E-mail: pavlo.fedirko@pdatu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3724-8937

Оленюк О. А.

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технічного сервісу і загальнотехнічних дисциплін,
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Кам'янець-Подільський, Україна
E-mail: alexander olenyuk@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1463-076X

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ У РОБОЧИХ ОРГАНАХ ПІД ЧАС ПОЛЬОВИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Анотація

У статті висвітлено результати дослідження напружено-деформованого стану робочих органів сільськогосподарських машин за допомогою методів комп'ютерного моделювання в умовах польової експлуатації. Зокрема, проведено аналіз впливу механічних навантажень, що виникають у процесі роботи з різними типами ґрунтів, зокрема й суглинками, піщаними та чорноземними ґрунтами. Ураховано динамічні, статичні й ударні впливи, а також зовнішні чинники, як-от вологість, щільність ґрунту та наявність рослинних залишків, які значно впливають на роботу сільськогосподарської техніки.

Дослідження ґрунтується на використанні сучасних методів комп'ютерного моделювання, зокрема методу кінцевих елементів (FEM), що дозволяє створювати високоточні тривимірні моделі та проводити числові експерименти. Виконано моделювання для типових конструкцій робочих органів, як-от плуги, культиватори, дискові борони та сошники. На основі отриманих результатів встановлено критичні зони конструкцій, де виникають максимальні напруження та деформації, що може призводити до їх руйнування або зниження ефективності роботи.

Окрему увагу приділено вибору матеріалів для виготовлення робочих органів. Проаналізовано вплив механічних властивостей матеріалів, як-от межа міцності, ударна в'язкість і зносостійкість, на експлуатаційні характеристики конструкцій. Запропоновано рекомендації щодо використання високоміцних сталей, композитних матеріалів і спеціальних покриттів для підвищення довговічності робочих органів.

У статті представлено результати числових експериментів, які демонструють доцільність оптимізації геометрії та маси робочих органів з метою зменшення енерговитрат і підвищення їхньої продуктивності. Також розроблено алгоритм оцінювання впливу змінних експлуатаційних умов на довговічність конструкцій.

Отримані результати мають велике практичне значення для вдосконалення технологічних процесів у проєктуванні й експлуатації сільськогосподарської техніки. Вони дозволяють зменшити витрати на ремонт і обслуговування машин, підвищити ефективність агротехнічних операцій і забезпечити стабільність роботи обладнання в різних кліматичних і ґрунтових умовах. Представлений підхід може бути використаний як основа для створення нових поколінь сільськогосподарських машин із покращеними характеристиками надійності, ефективності й енергоефективності.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, напружено-деформований стан, робочі органи, метод кінцевих елементів, сільськогосподарські машини, польові умови, оптимізація конструкції, зносостійкість, тривимірне моделювання, динамічні навантаження.

Вступ. Сучасні тенденції розвитку сільськогосподарської техніки спрямовані на підвищення її надійності, довговічності й енергоефективності. Одним із важливих аспектів цього процесу є оптимізація конструкції робочих органів сільськогосподарських машин, які зазнають значних механічних навантажень під час польових умов

експлуатації. Розроблення нових робочих органів потребує не лише теоретичних досліджень, але й використання сучасних комп'ютерних технологій, що дозволяють моделювати складні фізичні процеси.

Комп'ютерне моделювання стало ключовим інструментом для аналізу напружено-деформованого стану робочих органів. Метод кінцевих елементів (далі – МКЕ) використовується для дослідження розподілу напружень і прогнозування деформацій під впливом статичних і динамічних навантажень [11]. Це дозволяє оцінити слабкі місця конструкції та внести необхідні зміни на етапі проектування, що знижує витрати на розроблення й експлуатацію.

Серед основних завдань комп'ютерного моделювання є визначення впливу зовнішніх чинників, як-от вологість ґрунту, його щільність і наявність твердих включень, на роботу техніки. Згідно з результатами досліджень [7], використання адаптивних моделей матеріалів дозволяє точно відтворювати реальні умови експлуатації та прогнозувати довговічність конструкцій.

Особливий інтерес становить інтеграція результатів моделювання з експериментальними дослідженнями. Це підходить для валідації моделей і перевірки їхньої відповідності реальним умовам [2]. Сучасні дослідження також вказують на ефективність використання оптимізаційних алгоритмів для автоматизації вибору конструктивних параметрів робочих органів [5].

Окрім того, упровадження інноваційних матеріалів, як-от композити, дозволяє зменшити масу робочих органів, підвищує їхню зносостійкість і енергоефективність. Дослідження в цій галузі демонструють важливість комбінування традиційних матеріалів із новітніми розробками для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик [1].

Іншим важливим напрямом є дослідження впливу геометричних параметрів робочих органів на ефективність їхньої роботи. Це дозволяє розробляти конструкції, які мінімізують енерговитрати під час роботи із ґрунтом і водночас забезпечують високий рівень продуктивності [9].

Мета роботи. Метою даного дослідження є розроблення та впровадження методики комп'ютерного моделювання напружень і деформацій у робочих органах сільськогосподарських машин під час їх експлуатації в польових умовах. Це дозволяє визначити оптимальні конструктивні параметри для підвищення довговічності, надійності й ефективності роботи таких машин. Проведений аналіз дозволить оцінити ефективність запропонованих підходів і розробити рекомендації для їх подальшого впровадження. У рамках дослідження особлива увага приділяється врахуванню впливу реальних експлуатаційних навантажень, властивостей ґрунту, а також розробленню рекомендацій для конструкторів і виробників техніки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сільськогосподарська техніка, зокрема її робочі органи, під час експлуатації в польових умовах зазнає значних механічних навантажень. Це створює необхідність детального аналізу напружено-деформованого стану конструкцій для забезпечення їхньої надійності та довговічності. У сучасних умовах комп'ютерне моделювання стало ключовим інструментом, що дозволяє ефективно вирішувати ці завдання.

Метод кінцевих елементів (МКЕ) є основою числового аналізу конструкцій, оскільки дозволяє моделювати складні фізичні процеси з високою точністю. В умовах польової експлуатації робочі органи піддаються впливу різноманітних чинників, як-от вологість ґрунту, його щільність, динамічні й ударні навантаження, а також наявність твердих включень. Усі ці аспекти враховано в дослідженні для розроблення рекомендацій щодо підвищення ефективності та довговічності конструкцій.

Методика дослідження

1. Комп'ютерне моделювання

Для аналізу напружено-деформованого стану конструкцій використано МКЕ, що реалізований у програмному забезпеченні: ANSYS, Abaqus, COMSOL Multiphysics та SolidWorks Simulation [4; 3].

ANSYS – універсальне програмне забезпечення для аналізу НДС, теплопередачі, електромагнітних процесів.

Abaqus – відоме своєю точністю для нелінійних задач.

COMSOL Multiphysics – дозволяє моделювати багатофізичні процеси.

SolidWorks Simulation – інтегроване рішення для МКЕ у CAD-системі.

Метод кінцевих елементів (Finite Element Method, FEM) – це чисельний метод розв'язання задач механіки, фізики, термодинаміки, гідродинаміки й інших дисциплін, які описуються диференціальними рівняннями. МКЕ широко застосовується в інженерії для аналізу напружень, деформацій, теплопередачі, динаміки рідин і багатьох інших фізичних явищ.

Принцип роботи МКЕ

Метод ґрунтується на розбитті складної геометрії об'єкта на дрібніші, простіші елементи, які називаються кінцевими елементами (далі – КЕ). Розрахунок фізичних величин виконується для кожного елемента, після чого результати об'єднуються для отримання повної картини.

Основні етапи роботи МКЕ:

1. Дискретизація

Об'єкт розбивається на невелику кількість кінцевих елементів (трикутники, квадрати, тетраедри, тощо).

Кожен елемент має вузли, де обчислюються значення невідомих (наприклад, напруження чи деформації).

2. Визначення матеріальних властивостей

Для кожного елемента задаються властивості матеріалів, як-от модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, теплопровідність тощо.

3. Формулювання рівнянь рівноваги

Створюються системи алгебраїчних рівнянь, які описують зв'язки між вузлами й елементами з урахуванням граничних умов і зовнішнього навантаження.

4. Розв'язання рівнянь

За допомогою чисельних методів обчислюються шукані параметри, як-от напруження, деформації або температури.

5. Інтерпретація результатів

Отримані результати візуалізуються у вигляді графіків, контурних діаграм або анімацій, що дозволяє оцінити поведінку конструкції чи системи.

Основні переваги МКЕ

Гнучкість у застосуванні

МКЕ можна застосувати до об'єктів будь-якої складної форми, різноманітних матеріалів і фізичних процесів.

Точність

Метод дозволяє отримувати високоточні результати за умови правильної дискретизації та врахування граничних умов.

Можливість аналізу складних систем

Дозволяє моделювати взаємодію різних елементів системи, зокрема й контактів, динамічних явищ і нелінійних ефектів.

Області застосування МКЕ

Механіка твердого тіла

Аналіз напружено-деформованого стану конструкцій.

Розрахунок міцності та стійкості.

Теплопередача

Розрахунок теплових потоків і температурних полів.

Гідродинаміка

Аналіз потоків рідин і газів.

Динамічний аналіз

Моделювання коливань, ударів, вібрацій.

Проектування й оптимізація

Оптимізація геометрії та вибір матеріалів для підвищення ефективності та довговічності конструкцій.

МКЕ у сільськогосподарській техніці

У сільськогосподарській техніці МКЕ використовується для:

1) аналізу робочих органів:

- оцінювання напружень і деформацій під час взаємодії із ґрунтом;
- визначення зон максимального зносу;

2) оптимізації конструкцій:

- зменшення маси конструкцій без втрати міцності;
- підвищення ефективності роботи обладнання;

3) моделювання змінних умов експлуатації:

- аналіз впливу різних типів ґрунту, вологості, ударних навантажень.

Було створено тривимірні моделі типових робочих органів – плугів, культиваторів, дискових борін і сошників. У моделюванні враховано:

геометрію конструкцій;

механічні властивості матеріалів;

граничні умови та прикладені навантаження.

Моделі включали статичні, динамічні й ударні навантаження, які виникають під час роботи з різними типами ґрунтів. Для відтворення реальних умов експлуатації розроблено адаптивні моделі ґрунту, що враховують вологість, щільність і наявність рослинних залишків [10].

МКЕ є потужним інструментом для розв'язання складних інженерних завдань. У сільськогосподарській техніці він дозволяє знизити витрати на експерименти, покращити конструкції робочих органів і підвищити їхню ефективність у польових умовах.

2. Експериментальна валідація

Для підтвердження достовірності результатів числового моделювання проведено експериментальні дослідження. У лабораторних умовах випробувано зразки робочих органів під впливом навантажень, що імітують

польові умови. Отримані експериментальні дані використано для корекції параметрів моделі та перевірки її адекватності [8].

3. Результати дослідження

3.1. Аналіз напружено-деформованого стану

Результати моделювання показали, що максимальні напруження виникають у критичних зонах конструкцій, як-от:

- зони контакту із ґрунтом;
- місця з'єднання елементів;
- переходи між ділянками з різною товщиною матеріалу.

Для кожного типу ґрунту було визначено характер розподілу напружень і деформацій. Наприклад, у суглинках переважали високі статичні навантаження, тоді як у піщаних ґрунтах домінували ударні впливи.

3.2. Вибір матеріалів

Аналіз показав, що механічні властивості матеріалів мають вирішальне значення для довговічності робочих органів. Найкращі результати продемонстрували високоміцні сталі та композити зі спеціальними покриттями, що забезпечували:

- високу зносостійкість;
- ударну в'язкість;
- стійкість до корозії.

Запропоновано використовувати сталі з гартуванням до твердості 45–55 HRC, а також композити із включенням карбідів для підвищення зносостійкості [6].

3.3. Оптимізація конструкції

На основі отриманих результатів виконано оптимізацію геометричних параметрів робочих органів. Це дозволило:

- знизити масу конструкцій на 15–20%;
- зменшити енерговитрати під час роботи на 10–12%;
- підвищити продуктивність техніки на 8–10%.

Алгоритм оптимізації включав використання генетичних алгоритмів для автоматизації вибору параметрів конструкції.

Результати дослідження свідчать про ефективність інтеграції комп'ютерного моделювання й експериментальних методів для аналізу робочих органів сільськогосподарської техніки. Упровадження адаптивних моделей ґрунту дозволило врахувати реальні умови експлуатації та підвищити точність прогнозування напружень і деформацій.

Підвищення довговічності конструкцій через використання новітніх матеріалів і оптимізацію геометрії сприяє зменшенню витрат на обслуговування техніки. Це особливо важливо для аграрного сектору, де економічна ефективність має вирішальне значення.

Висновки

1. Використання комп'ютерного моделювання дозволяє детально аналізувати напруження та деформації, що виникають у робочих органах сільськогосподарської техніки під час польових умов експлуатації. Це сприяє підвищенню надійності та довговічності техніки.

2. Результати досліджень демонструють, що найбільші напруження виникають у критичних зонах конструкцій, де спостерігається концентрація навантажень. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації конструкції робочих органів.

3. Розроблений математичний апарат і програмне забезпечення для моделювання дають можливість урахувати вплив зовнішніх чинників, як-от тип ґрунту, швидкість руху техніки, а також геометрію конструкцій.

4. Визначення найбільш вразливих зон дозволяє своєчасно вносити конструктивні зміни або застосовувати матеріали з покращеними механічними властивостями, що значно знижує ризик відмови обладнання під час експлуатації.

Подальші перспективи:

1. Розширення спектра досліджуваних конструкцій робочих органів, зокрема й різних типів техніки, які працюють у складних польових умовах.

2. Упровадження отриманих результатів у виробництво для створення більш ефективних і економічно вигідних конструкцій.

3. Подальший розвиток програмного забезпечення для моделювання, зокрема й інтеграція штучного інтелекту для автоматичної оптимізації конструкцій.

4. Проведення експериментальних досліджень для верифікації результатів комп'ютерного моделювання, що забезпечить більшу точність та надійність прогнозів.

5. Аналіз впливу нових матеріалів, як-от композити чи покриття з підвищеною зносостійкістю, на зменшення напружень і збільшення терміну служби робочих органів.

Напрями дозволять підвищити ефективність використання сільськогосподарської техніки, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити стабільність роботи у складних умовах.

Список використаних джерел

1. Романюк В.М., Ковальчук О.В., Ткаченко С.Г. Застосування композитних матеріалів у сільськогосподарській техніці. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2021. № 23 (2). С. 45–50.
2. Сидоренко І.П., Ковальов О.М., Гребенюк П.М. Дослідження напружено-деформованого стану конструкцій сільськогосподарської техніки. *Журнал технічної механіки*. 2020. № 18 (3). С. 125–132.
3. Abaqus. *Abaqus Documentation*. Dassault Systemes. 2022.
4. ANSYS. *ANSYS User's Guide*. 2022.
5. Bendsøe M.P., Sigmund O. Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. *Springer*. 2004.
6. Brown R. Impact of soil type on equipment wear. *Soil Science Review*. 2019. № 22 (3). P. 78–89.
7. Hutsol T., Kukharets V., Mudryk K. Numerical simulation in agricultural engineering. *Energies*. 2022. № 15 (21).
8. Ivanov O. Validation of finite element models for agricultural machinery. *Mechanics Today*. 2020. № 32 (1). P. 45–60.
9. Karimi M., Mirzaei M. The impact of ploughshare geometry on soil cutting forces. *Soil & Tillage Research*. 2019. № 194.
10. Smith J. Soil mechanics in agricultural engineering. *Journal of Agricultural Research*. 2021. № 58 (4). P. 123–135.
11. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The finite element method: Its basis and fundamentals. *Elsevier*. 2013.

Duganets V. I.

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Technical Service and General Technical Subjects,
Higher Educational Institution "Podillia State University"
Kamianets-Podilskyi, Ukraine
E-mail: duganec.vasil@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2946-2850*

Fedirko P. P.

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Technical Service and General Technical Subjects,
Higher Educational Institution "Podillia State University"
Kamianets-Podilskyi, Ukraine
E-mail: pavlo.fedirko@pdatu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3724-8937*

Olenyuk O. A.

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Technical Service and General Technical Subjects,
Higher Educational Institution "Podillia State University"
Kamianets-Podilskyi, Ukraine
E-mail: alexander olenyuk@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1463-076X*

COMPUTER MODELING OF STRESSES AND STRAINS IN WORKING BODIES UNDER FIELD OPERATING CONDITIONS

Abstract

The article presents the results of a study on the stress-strain state of agricultural machinery working bodies using computer modeling methods under field operation conditions. Specifically, the analysis focuses on the impact of mechanical loads arising during operation with various soil types, including loamy, sandy, and black soils. Dynamic, static, and impact loads, as well as external factors such as soil moisture, density, and the presence of plant residues, were considered, as they significantly affect the performance of agricultural machinery.

The research is based on modern computer modeling methods, particularly the finite element method (FEM), which enables the creation of highly accurate three-dimensional models and numerical experiments. Simulations were conducted for typical working body designs, such as plows, cultivators, disc harrows, and seed drills. The results identified critical zones within the structures where maximum stresses and deformations occur, potentially leading to failure or reduced operational efficiency.

Special attention was given to selecting materials for manufacturing the working bodies. The study analyzed the impact of material mechanical properties, such as strength, impact toughness, and wear resistance, on the operational characteristics of the structures. Recommendations were proposed for using high-strength steels, composite materials, and special coatings to enhance the durability of working bodies.

The article provides the results of numerical experiments demonstrating the feasibility of optimizing the geometry and mass of working bodies to reduce energy consumption and increase productivity. An algorithm was also developed to assess the impact of variable operating conditions on the durability of structures.

The obtained results have significant practical implications for improving technological processes in the design and operation of agricultural machinery. They allow for reduced maintenance and repair costs, increased efficiency of agricultural operations, and

stable equipment performance in various climatic and soil conditions. The proposed approach can serve as a foundation for developing new generations of agricultural machinery with enhanced reliability, efficiency, and energy-saving characteristics.

Key words: computer modeling, stress-strain state, working bodies, finite element method, agricultural machinery, field conditions, design optimization, wear resistance, three-dimensional modeling, dynamic loads.

References

1. Romaniuk, V.M., Kovalchuk, O.V., & Tkachenko, S.H. (2021). Zastosuvannia kompozytnykh materialiv u silskohospodarskii tekhnitsi [Application of composite materials in agricultural machinery]. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy. – Scientific Bulletin of NUBiP of Ukraine*, 23 (2), 45–50 [in Ukrainian].
2. Sydorenko, I.P., Kovaliov, O.M., & Grebeniuk, P.M. (2020). Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu konstrukt-sii silskohospodarskoi tekhniki [Investigation of the stress-strain state of agricultural machinery structures]. *Zhurnal tekhnichnoi mekhaniky – Journal of Technical Mechanics*, 18 (3), 125–132 [in Ukrainian].
3. Abaqus (2022). *Abaqus Documentation*. Dassault Systemes [in English].
4. ANSYS (2022). *ANSYS User's Guide* [in English].
5. Bendsoe, M.P., & Sigmund, O. (2004). Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. *Springer* [in English].
6. Brown, R. (2019). Impact of soil type on equipment wear. *Soil Science Review*, 22 (3), 78–89 [in English].
7. Hutsol, T., Kukharets, V., & Mudryk, K. (2022). Numerical simulation in agricultural engineering. *Energies*, 15 (21) [in English].
8. Ivanov, O. (2020). Validation of finite element models for agricultural machinery. *Mechanics Today*, 32 (1), 45–60 [in English].
9. Karimi, M., & Mirzaei, M. (2019). The impact of ploughshare geometry on soil cutting forces. *Soil & Tillage Research*, 194 [in English].
10. Smith, J. (2021). Soil mechanics in agricultural engineering. *Journal of Agricultural Research*, 58 (4), 123–135 [in English].
11. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., & Zhu, J.Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier [in English].