



6. Сайт компанії National Instruments URL: <https://www.ni.com/en/solutions/academic-research.html>

УДК 621.01:004.94:539.4

ЗАСТОСУВАННЯ CAD/CAE-СИСТЕМ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗУ МІЦНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОБУДУВАННЯ

І. П. Рибак¹

¹доктор філософії (Phd), доцент кафедри виробництва ремонту та матеріалознавства, e-mail: ilya.0003@ukr.net

¹Національний транспортний університет Київ, Україна.

Анотація. У роботі досліджено можливості інтегрованих CAD/CAE-систем у контексті параметричного моделювання та чисельного аналізу напружено-деформованого стану деталей машинобудування. Розглянуто сучасний стан застосування методу скінченних елементів у середовищах SolidWorks Simulation та Autodesk Fusion. Проведено порівняльну оцінку точності та зручності роботи з різними програмними платформами в умовах навчального та виробничого процесу.

Ключові слова: CAD/CAE-система, параметричне моделювання, метод скінченних елементів, SolidWorks, напружено-деформований стан, машинобудування.

APPLICATION OF CAD/CAE SYSTEMS FOR PARAMETRIC MODELLING AND STRENGTH ANALYSIS OF MECHANICAL ENGINEERING PARTS

I.P. Rybak¹

¹PhD, Associate Professor of the Department of Production, Repair and Materials Science, e-mail: ilya.0003@ukr.net

¹National Transport University, Kyiv, Ukraine

Abstract. The paper investigates the capabilities of integrated CAD/CAE systems in the context of parametric modelling and numerical analysis of the stress-strain state of mechanical engineering parts. The current state of application of the finite element method in SolidWorks Simulation and Autodesk Fusion environments is considered. A comparative assessment of the accuracy and usability of various software platforms in educational and industrial processes is conducted.

Keywords: CAD/CAE system, parametric modelling, finite element method, SolidWorks, stress-strain state, mechanical engineering.

Вступ. Сучасний інженер у галузі машинобудування не може ефективно виконувати свою роботу, обмежуючись лише традиційними розрахунковими методами та паперовим кресленням. Сучасний світ стрімко розвива-

ється, і разом із ним зростають вимоги до швидкості та точності проектування у різних сферах діяльності, і машинобудування як одна з ключових галузей потребує ефективних інструментів для створення моделей, деталей та технічної документації. Інтеграція систем автоматизованого проектування (САПР / CAD) з модулями інженерного аналізу (CAE) фактично переосмислює сам підхід до конструювання: замість натурального прототипування з подальшим фізичним випробуванням інженери отримують можливість всебічно перевіряти конструкцію у віртуальному середовищі ще на стадії ескізного проекту.

Особливої актуальності це набуває в умовах воєнного часу та повоєнного відновлення промислової бази України, коли необхідність скорочення витрат і часу на освоєння нової продукції є критично важливою. Крім того, підготовка фахівців інженерного профілю потребує сучасного програмного забезпечення, яке одночасно є доступним, функціонально достатнім і зручним для засвоєння в навчальному процесі. Саме цим визначається актуальність теми даної роботи.

Мета роботи полягає у порівняльному аналізі можливостей провідних CAD/CAE-систем для параметричного моделювання та чисельного аналізу міцності деталей машинобудування, а також у виробленні рекомендацій щодо їх оптимального застосування в освітньому та виробничому середовищі.

Матеріал і результати досліджень. Параметричне тривимірне моделювання є сьогодні не просто зручним інструментом, а стандартом галузі. Рішення Autodesk для промислового виробництва й машинобудування засновані на технології цифрових прототипів, що надають конструкторам, інженерам і технологам можливість повністю досліджувати виріб ще на етапі проектування — від ідеї до реального втілення.

Аналогічну концепцію реалізує і платформа SolidWorks від компанії Dassault Systèmes, яка нині набула широкого поширення на провідних машинобудівних підприємствах світу. [1]

Принциповою перевагою параметричного підходу є те, що вся геометрія деталі будується на основі керованих параметрів — лінійних розмірів, кутів, радіусів. Змінюючи значення одного параметра, конструктор автоматично оновлює всю 3D-модель, асоційоване креслення і, що особливо важливо, результати чисельних розрахунків. Це скорочує цикл проектування і знижує ймовірність помилок, які неминуче виникають при ручному перерахунку.

Ключовим модулем CAE-аналізу в середовищі SolidWorks є додаток Simulation. Сучасні CAD/CAE-системи, зокрема SolidWorks з додатком

Simulation, надають потужні інструменти для проведення інженерних розрахунків та моделювання методом скінченних елементів; алгоритм проведення статичного розрахунку на прикладі реальної деталі демонструє послідовність дій: створення 3D-моделі, генерація кінцево-елементної сітки, вибір матеріалу, визначення умов закріплення та навантаження, проведення розрахунку та аналіз результатів.

Метод скінченних елементів (МСЕ) є фундаментальним математичним апаратом, на якому ґрунтуються всі сучасні CAE-розрахунки. Суть методу полягає у дискретизації геометричної моделі на скінченну кількість елементів простої форми — тетраєдрів, гексаєдрів тощо — з подальшим розв'язанням системи алгебраїчних рівнянь відносно переміщень у вузлах сітки. Точність рішення безпосередньо залежить від якості та густоти сітки: надто груба сітка призводить до грубих похибок, тоді як надмірно детальна — до суттєвого зростання обчислювальних витрат без відповідного підвищення точності. Оптимальним є адаптивне розбиття, при якому сітка автоматично ущільнюється у зонах концентрації напружень. [2]

Для порівняльного аналізу було обрано деталь типу «кронштейн» з конструкційної сталі марки Ст3 (межа плинності $\sigma_t = 235$ МПа, модуль пружності $E = 210$ ГПа). Розрахунки проводились у двох середовищах: SolidWorks Simulation та Autodesk Fusion (модуль Simulation). Схема навантаження передбачала прикладання зосередженої сили $P = 5$ кН в горизонтальному напрямку при жорсткому закріпленні кронштейна по основі. Кінцево-елементні сітки були побудовані з подібними параметрами: розмір базового елемента 5 мм, коефіцієнт ущільнення у зонах концентрації — 3. [3]

В результаті порівняльного аналізу напружено-деформованого стану деталей за допомогою двох програмних комплексів встановлено, що обидва середовища дозволяють достатньо коректно виявляти розподіл напружень, проте мають певні відмінності у підходах до завдання граничних умов та обробки результатів. У нашому дослідженні максимальне еквівалентне напруження за Мізесом у зоні галтельного переходу склало 187 МПа у SolidWorks та 193 МПа у Autodesk Fusion — розбіжність близько 3,2%, що перебуває в межах допустимої похибки чисельних методів. Запас міцності, розрахований як відношення межі плинності матеріалу до максимального напруження, склав $n = 235/187 \approx 1,26$ для SolidWorks та $n = 235/193 \approx 1,22$ для Autodesk Fusion. Обидва значення вказують на те, що деталь перебуває у передграничному стані, а конструкцію доцільно оптимізувати шляхом збільшення радіуса галтелі або перерізу поперечного ребра жорсткості.

Серед ключових можливостей SolidWorks Simulation варто відзначити: проведення аналізу напружено-деформованого стану для різних типів нава-



нтажень та граничних умов; модальний аналіз для визначення власних частот і форм коливань; аналіз втомленості для розрахунку циклічної міцності деталей і вузлів. Додаток також підтримує нелінійний аналіз з урахуванням великих деформацій та контактних взаємодій між компонентами складальних одиниць, що є критично важливим при дослідженні пресових з'єднань і затяжних болтів. [4]

Система дозволяє візуалізувати результати розрахунків у вигляді кольорових схем розподілу напружень та деформацій, що значно полегшує аналіз та інтерпретацію результатів і дозволяє швидко виявляти критичні зони конструкції. Ця можливість є надзвичайно важливою з дидактичної точки зору: студент, який не має досвіду теоретичного аналізу напружень, може самостійно ідентифікувати небезпечні перерізи і зрозуміти логіку конструктивних рішень. [10]

Важливим питанням є вибір матеріалу з бази даних програми. При виборі матеріалу варто враховувати, що бази даних іноземних CAD/CAE-систем можуть не містити деяких вітчизняних матеріалів, що вимагає вибору аналогів з подібними характеристиками. Практично це означає, що при проектуванні деталей з вітчизняних марок сталей (наприклад, Ст3, 40Х, 65Г тощо) інженер змушений або вручну вводити характеристики матеріалу, або знаходити відповідні аналоги за стандартами ASTM чи DIN. Для вирішення цієї проблеми доцільно формувати власну корпоративну або кафедральну бібліотеку матеріалів, яка містить характеристики сталей за ДСТУ. [5]

Паралельно з функціональним порівнянням проводилась оцінка зручності роботи в обох середовищах для студентів технічних спеціальностей. Встановлено, що інтерфейс SolidWorks є більш структурованим і логічним з точки зору послідовності виконання аналізу: дерево побудови моделі органічно трансформується у дерево сценарію розрахунку. Autodesk Fusion, будучи хмарним додатком, забезпечує зручний доступ до проекту з будь-якого пристрою, що особливо актуально в умовах дистанційного навчання, однак вимагає стабільного підключення до мережі Інтернет. Таке поєднання інструментів геометричного моделювання SolidWorks, Autodesk Inventor та Autodesk Fusion дозволяє, з одного боку, вивчати інструменти параметричного моделювання, а з іншого — поглиблювати знання з фундаментальних та загальноінженерних дисциплін через візуалізацію фізико-механічних явищ і процесів. [6]

Окремо слід розглянути перспективу застосування концепції цифрового двійника у машинобудуванні. Ключовим компонентом цифрового двійника є його модель — комплекс цифрових моделей, що описують конструктивні, технологічні, експлуатаційні параметри та фізико-механічні процеси, які відбуваються протягом експлуатації виробу і відображають вплив

цих параметрів на показники якості та ефективності його функціонування протягом життєвого циклу в режимі реального часу. CAD/CAE-моделювання є першим і визначальним кроком у побудові повноцінного цифрового двійника: без точної 3D-моделі та верифікованого чисельного розрахунку неможливо забезпечити достовірну кореляцію між цифровою та фізичною сутностями виробу. [7]

Адитивні технології утворюють ще одну точку перетину з тематикою CAD/CAE-моделювання. Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасного машинобудування є розробка нових технологій швидкого виробництва продукції, суть яких полягає у пошаровому конструюванні виробів з порошкового матеріалу на основі CAD-моделі, тривимірна геометрія якої описується у цифровому вигляді за допомогою програм твердотільного моделювання. Саме тому оволодіння CAD-моделюванням є передумовою опанування технологій 3D-друку металевих деталей. [8]

Інформаційне забезпечення розмірного аналізу також тісно пов'язане із засобами CAD/CAE. Розмірне моделювання та аналіз технологічних процесів вимагають відповідного інформаційного забезпечення, яке інтегрує геометричні параметри деталей із технологічними ланцюгами виробництва. Інтеграція розмірного аналізу безпосередньо у середовище CAD дозволяє ще на стадії проєкту перевірити виконання допусків на складання, що суттєво скорочує кількість конструктивних змін після запуску у виробництво. [9]

Висновки. За результатами дослідження встановлено, що обидві розглянуті CAD/CAE-системи — SolidWorks Simulation та Autodesk Fusion — здатні забезпечити інженерний аналіз деталей машинобудування з достатньою для практичних задач точністю; розбіжність між результатами в тестовому розрахунку не перевищила 3,2%. SolidWorks залишається пріоритетним вибором для навчального процесу завдяки структурованому інтерфейсу, широкій доступності навчальних матеріалів і потужній бібліотеці матеріалів. Autodesk Fusion є перспективним рішенням для роботи у хмарному середовищі та дистанційного навчання. Для отримання достовірних результатів необхідно приділяти особливу увагу якості побудови кінцево-елементної сітки та коректному визначенню граничних умов — ці два чинники мають вирішальний вплив на достовірність чисельних розрахунків. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка методики автоматизованої оптимізації геометрії машинобудівних деталей безпосередньо в середовищі CAD/CAE з урахуванням вимог адитивного виробництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бірюков С. А., Губський С. А. Порівняння результатів моделювання навантаження кронштейну редуктора в програмному комплексі QForm та Fusion. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. 2024. URL: <https://ait.khpi.edu.ua/article/view/354082>
2. Використання цифрових двійників для підвищення ефективності управління виробничими процесами в українській промисловості. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/article/view/1269
3. Використання адитивних технологій у освітньому процесі / Л. К. Поліщук, О. В. Поліщук // Перспективи розвитку машинобудування та транспорту : зб. тез конф. Вінниця: ВНТУ, 2023. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2023/paper/view/18176>
4. Застосування CAD/CAE-системи SolidWorks у задачах аналізу міцності деталей верстатних пристосувань / О. В. Петров, О. В. Піонткевич, А. Буда, В. С. Коломієць. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. Т. 19, № 1. С. 95–102. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-95-102>
5. Інноваційні технології у дослідженні механічних властивостей матеріалів / А. Слабкий, С. Котик. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2025. Т. 20, № 2. С. 130–134. URL: <https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/article/view/406>
6. Інформаційне забезпечення розмірного моделювання та аналізу технологічних процесів / В. П. Приходько, Є. С. Пуховський, Л. Данилова та ін. *Технічні науки та технології*. 2022. № 3 (29). С. 77–93. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3\(29\)-77-93](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3(29)-77-93)
7. Концепція створення моделі цифрового двійника інтелектуального шпindelного вузла / С. Сапон. *Технічні науки та технології*. 2023. № 4 (30). С. 80–90. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-80-90](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-80-90)
8. Поліщук О. С., Поліщук А. О., Лісевич С. П. Технологічний процес виготовлення виробів галузевого машинобудування методом 3D-друку з композитних ниток. *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. 2022. № 3. С. 104–110. URL: <https://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2022/07/vknu-ts-2022-n3-104-110.pdf>
9. Створення цифрового двійника циліндру двотактного двигуна у параметричному просторі системи управління життєвим циклом. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2025. URL: <http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/339389>
10. САПР: типи, застосування та найкращі програми для автоматизованого проектування. *Softkey.ua*. 2025. URL: <https://www.softkey.ua/ua/useful/articles/sapr-tipy-prilozheniya-i-luchshie-programmy-dlya-avtomatizirovannogo-proektirovaniya-1-chast/>