

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВРАХУВАННЯ ВТОМИ МАТЕРІАЛУ ДЕТАЛІ ВІД ДІЇ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Застосовано методи математичного моделювання та розроблено тривимірну модель деталі «Стакан редуктора» за допомогою САЕ-системи SOLIDWORKS. Деталь слугує опорним елементом вузла та призначена витримувати інтенсивні циклічні навантаження від роботи двигуна. На основі чисельних методів та імітаційного модуля Fatigue проведено розрахунковий аналіз втоми матеріалу. Встановлено залежність довговічності деталі від її геометричних параметрів, зокрема визначено рекомендований радіус скруглення після буртика підшипника для запобігання втомному руйнуванню.

Ключові слова: математичне моделювання, solidworks, стакан редуктора, втома матеріалу.

Abstract

Mathematical modeling methods were applied, and a three-dimensional model of the "Reducer cup" part was developed using the SOLIDWORKS CAE system. The part serves as a supporting element of the assembly and is designed to withstand intense cyclic loads from engine operation. Based on numerical methods and the Fatigue simulation module, a computational material fatigue analysis was conducted. The dependence of the durability of the part on its geometric parameters has been established, in particular, the recommended radius of curvature after the bearing flange has been determined to prevent fatigue failure.

Keywords: mathematical modeling, solidworks, reducer cup, material fatigue.

Вступ

Прогнозування деградаційних процесів та запобігання втомному руйнуванню елементів технічних систем є фундаментальною прикладною задачею, яка вимагає глибинної інтеграції сучасного математичного апарату в інженерну практику та вищу технічну освіту [1, 2]. Сучасні тенденції [3, 4] до оптимізації геометричних параметрів та підвищення енергоефективності мобільних машин [5, 6] чи гідравлічних систем [7, 8, 9] змушують відходити від спрощених підходів, оскільки реальні конструкції експлуатуються у високоінтенсивних циклічних режимах із мінімально допустимими запасами міцності.

Прогнозування ресурсу таких компонентів ще на етапі розробки вимагає відходу від класичних статичних розрахунків на користь динамічного аналізу довговічності (Fatigue Life Analysis). Ефективним та гнучким інструментом для практичної реалізації складних чисельних алгоритмів є сучасні САЕ-системи Autodesk Inventor [10, 11], SOLIDWORKS Simulation [12, 13] та інші, які функціонують на основі методу скінченних елементів.

Мета дослідження полягає у застосуванні методів математичного моделювання під час інженерного аналізу втоми матеріалу деталі «Стакан редуктора» для оцінки впливу її геометричних параметрів, а саме радіуса скруглення, на напружено-деформований стан у найбільш критичних зонах.

Результати дослідження

Математичне моделювання процесів втоми руйнування елементів конструкцій базується на поєднанні методів континуальної механіки деформівного твердого тіла та чисельних методів лінійної алгебри, реалізованих через метод скінченних елементів. На першому етапі розв'язується просторова крайова задача теорії пружності для визначення компонентів тензора напружень і знаходження напружено-деформованого стану об'єкта у статичній постановці.

Отримані значення локальних напружень виступають вихідними даними для прогнозування циклічної довговічності за допомогою експериментально-аналітичної кривої втоми (див. криву S-N на

рисунку 1). Математично ця крива описує функціональну залежність граничної кількості циклів до руйнування N від амплітуди знакозмінних напружень σ_a :

$$N = f(\sigma_a). \quad (1)$$

У логарифмічних координатах $\log(N) - \log(\sigma_a)$ ця залежність апроксимується лінійними або кусково-лінійними рівняннями.

Для оцінки міри накопичення пошкоджень за постійної амплітуди навантаження застосовується критерій лінійного сумування Пальмгрена-Майнера. Згідно з цією математичною моделлю, безрозмірний коефіцієнт сумарного пошкодження D визначається як відношення:

$$D = n/N, \quad (2)$$

де n – задана база циклів експлуатаційного навантаження, а N – гранична кількість циклів до руйнування при відповідному рівні напружень, знайдена з S-N кривої. Умова довговічності виконується при $D \leq 1$; значення $D > 1$ свідчить про вичерпання ресурсу міцності та початок руйнування матеріалу. Характер циклу описується коефіцієнтом асиметрії напружень:

$$R = \sigma_{min}/\sigma_{max}, \quad (3)$$

який для знакозмінного симетричного навантаження дорівнює $R = -1$.

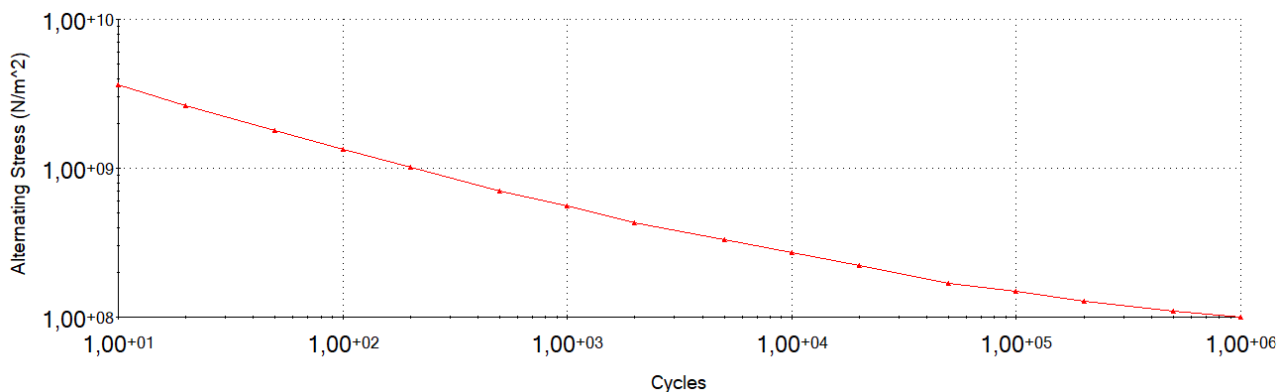


Рис. 1 – Крива S-N для сталі на основі кривих ASME згідно рекомендацій SOLIDWORKS

Описаний математичний підхід та його чисельна реалізація в CAE-системі SOLIDWORKS Simulation модуля Fatigue застосовані для дослідження довговічності деталі «Стакан редуктора», що функціонує як опорний елемент вузла. На внутрішню поверхню деталі, виготовленої з якісної конструкційного матеріалу Сталі 45 ДСТУ 7809:2015, від зубчастої передачі передаються змінні радіальні та осеві реакції, зумовлені коливаннями частоти обертання двигуна. Масивні стінки деталі забезпечують сприйняття динамічних ударів без макродеформацій, проте циклічний характер сил суттєво впливає на її втомну довговічність.

За результатами проведеного чисельного скінченно-елементного розрахунку для бази навантаження $n = 10^6$ циклів при знакозмінному режимі $R = -1$ ідентифіковано просторову зону максимальної концентрації напружень. Критичною ділянкою виявився геометричний перехід від діаметра упору підшипників до їх базування. Математичний розрахунок за кривою втоми показав значне накопичення пошкоджень у цій зоні при розрахунковому ресурсі деталі до $N = 5914$ робочих циклів (рисунок 2). Такий низький ресурс зумовлений значною концентрацією напружень у зоні переходу. Однак коефіцієнт запасу міцності для стаціонарного режиму роботи деталі становить 1,809, що є достатнім для забезпечення статичної міцності конструкції.

Для оптимізації конструкції та забезпечення умови втомної міцності проведено параметричний геометричний аналіз. Досліджено функціональну залежність величини пошкодження від радіуса скруглення r після буртика. Отримана залежність $D = f(r)$ (рисунок 3) продемонструвала виражений нелінійний характер: при значеннях $r \leq 3,0$ мм спостерігається критичний дефіцит довговічності, тоді

як починаючи з геометричного параметра $r > 3,0$ мм відбувається інтенсивний стрибок збільшення терміну служби деталі.

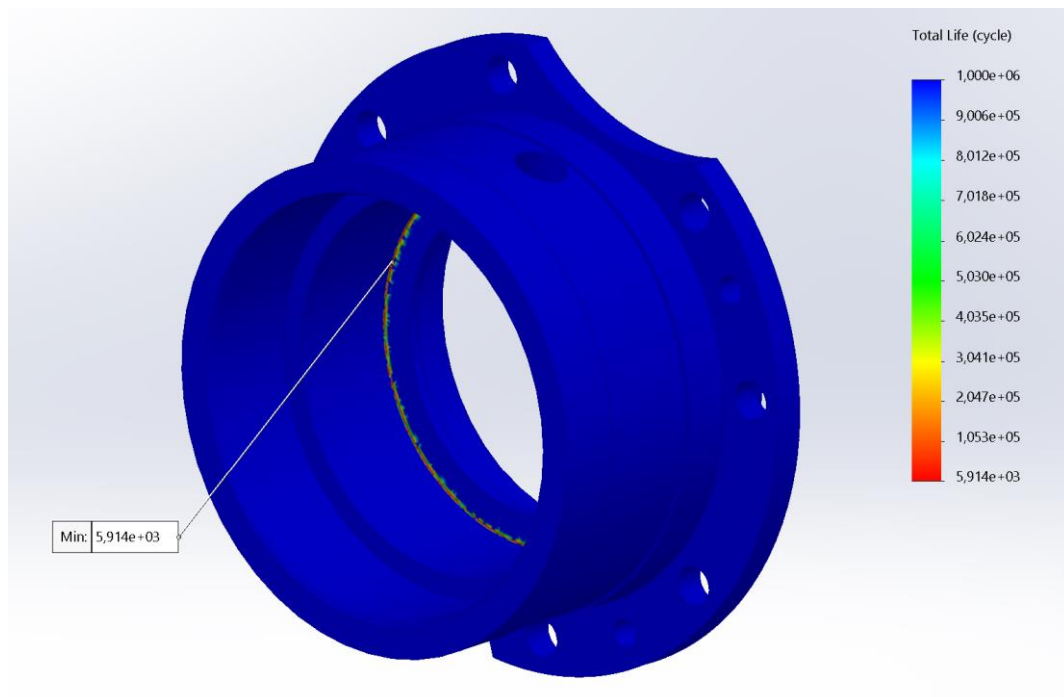


Рис. 3 – Результат розрахунку терміну служби при дії циклічних навантажень на деталь

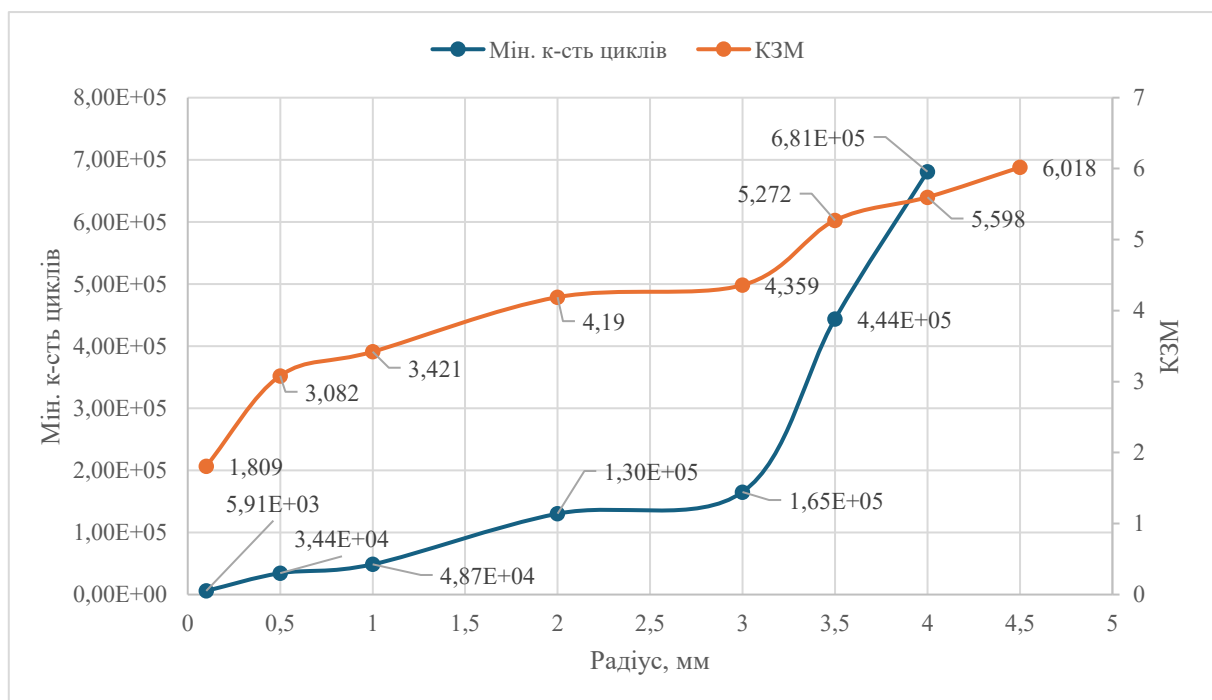


Рис. 4 – Залежність мінімальної кількості циклів роботи та коефіцієнту запасу міцності деталі від величини радіуса скруглення після буртика

Найкращий результат моделювання досягається при $r = 4,5$ мм, де значення сумарного пошкодження прямує до нуля $D \rightarrow 0$, і явищ втомного руйнування не спостерігається. Водночас розрахунковий коефіцієнт запасу міцності при збільшенні радіуса скруглення демонструє відносно стабільний лінійний характер зростання. Це дозволяє рекомендувати радіус скруглення від 3,5 мм як нижню межу для забезпечення ресурсу понад $4,44 \cdot 10^5$ циклів, та $r = 4$ мм для повного усунення ризику втомного руйнування.

Висновок

На основі методів математичного моделювання та використання САЕ-системи SOLIDWORKS Simulation реалізовано розрахунковий аналіз втомного руйнування деталі «Стакан редуктора» за умов дії циклічних навантажень.

За результатами розрахунку рекомендовано обирати для практичного проектування експлуатаційного ресурсу понад $4,44 \cdot 10^5$ циклів радіус скруглення після буртика підшипника не менше 3,5 мм, а для максимального підвищення довговічності – 4,5 мм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Березюк О. В. Планування багатфакторного експерименту для дослідження вібраційного гідроприводу ущільнення твердих побутових відходів // Вібрації в техніці та технологіях. 2009. № 3 (55). С. 92-97.
2. Kazachiner O., Boychuk Y. Theoretical and scientific foundations of pedagogy and education. International ScienceGroup 2022. 476 p.
3. Піонткевич О. В. Підвищення ефективності багаторежимного гідроприводу фронтального навантажувача: дис. кандидата техн. наук : 05.02.02 / Піонткевич Олег Володимирович. Київ, 2019. 249 с.
4. Лозінський Д.О. Ротаційна витяжка осесиметричних деталей з використанням пропорційного електрогідравлічного приводу / Д.О. Лозінський, І.О. Сивак, Є.І. Шевчук, В.Г. Пилявець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2015. №4. С. 21-24.
5. Березюк, О. В. Огляд конструкцій машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів. Вісник машинобудування та транспорту. Вінниця: ВНТУ, 2015. №1. С. 3-8.
6. Березюк О.В. Науково-технічні основи проектування приводів робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів: автореф. дис. д-ра техн. наук. Хмельницький, 2021. 46 с.
7. Kozlov L., Piontkevych O., Semichasnova N., Ubidia Rodrigues D. D., The experimental stand for determining the characteristics of the hydraulic drive control system with the multifunctional counterbalance valve, II International scientific engineering conference «Hydraulic and pneumatic drive of machines»: International scientific-engineering conference, 2016. P. 119-120
8. Піонткевич О. В. Розрахунок гідродинамічної сили на золотнику врівноважувального клапана на основі імітаційного моделювання течії робочої рідини в його каналах / О. В. Піонткевич, Л. Г. Козлов, О. В. Березюк, О. В. Сердюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024. № 5. С. 77-83.
9. Хом'юк І., Хом'юк В. Математичне моделювання в контексті здійснення між предметних зв'язків курсу вищої математики у ВНЗ. Актуальні питання природничо-математичної освіти : збірник наукових праць. Суми, 2017. Вип. 2 (10). С. 43–50.
10. Піонткевич О. В., Лозінський Д. О., Сердюк О. В., Савуляк В. В. Забезпечення результатів вивчення CAD/CAE/CAM систем для підготовки фахівців із спеціальності «Прикладна механіка». Матеріали XVI Міжнародної науково-методичної конференції «Сучасна освіта - доступність, якість, визнання», 13–14 листопада 2024 р. КраматорськВінниця-Тернопіль, Краматорськ : ДДМА, 2024. С. 247-252.
11. Піонткевич О. В., Березюк О. В., Лозінський Д. О., Кавецький О. І. Застосування CAD/CAE-системи Autodesk Inventor для удосконалення фрезерногравірувального верстата з ЧПК. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Вінниця: ВНТУ, 2025. Вип. 1. С. 1–9. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-1-178-186>
12. Петров О. В., Піонткевич О. В., Буда А. Г., Коломієць В. С. Застосування CAD/CAE-системи Solidworks у задачах аналізу міцності деталей верстатних пристосувань. Вісник машинобудування та транспорту. Вінниця : ВНТУ, 2024. Вип. 19. № 1. С. 95–102.
13. Піонткевич О. В., Сухоруков С. І., Петров О. В., Сердюк О. В. «Комп'ютеризовані системи проектування» для здобувачів вищої освіти зі спеціальності «Прикладна механіка»: електронний лабораторний практикум. Вінниця : ВНТУ, 2025. 142 с.

Задержка Вячеслав Викторович – студент групи ІПМ–24мз, факультет машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: zaderyaka2015@gmail.com.

Піонткевич Олег Володимирович – к-т техн. наук, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: piontkevych@vntu.edu.ua.

Хом'юк Віктор Викторович – к-т техн., доцент, доцент кафедри вищої математики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: khomyuk@vntu.edu.ua

Zaderiaka Viacheslav V. – student of the Department of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: zaderyaka2015@gmail.com

Piontkevych Oleh V. – Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Technology and Automation of Mechanical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: piontkevych@vntu.edu.ua

Khomyuk Viktor V. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor the department of Higher Mathematics Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: khomyuk@vntu.edu.ua