

УДК 621.833

Єгоров Павло Анатолійович, к.т.н., доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, [phd.egpavel@gmail.com](mailto:phd.egpavel@gmail.com)

Поваляєв Сергій Іванович, к.т.н., доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, [povalyaevsi@ukr.net](mailto:povalyaevsi@ukr.net)

## ВІДНОВЛЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ НЕМЕТАЛЕВИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

У сучасному приладобудуванні та машинобудуванні все ширше використовуються неметалеві деталі, серед яких і пластикові зубчасті колеса. Такі зубчасті передачі мають низку переваг: тиха робота, невелика вага, відносно низька вартість виготовлення тощо. Проте навіть при короткочасному перевищенні розрахункових навантажень може спостерігатися їх повне або часткове руйнування. У разі, коли відмова механізму пов'язана з простим технологічним або іншого відповідального обладнання, постає необхідність мінімізації часу ремонту. Термін ремонту залежить від складності механізму, а також від часу надходження справної деталі на заміну, який може перевищувати один-два тижні. На випадок поломки простих деталей існують спеціальні групи працівників, які здатні самостійно спроектувати та виготовити пошкоджену деталь для заміни. У разі виходу з ладу зубчастих коліс постає одразу дві проблеми: ідентифікації геометричних параметрів та безпосередньо виготовлення.

Порушення роботи зубчастого зачеплення може супроводжуватися поломкою як одного окремого зуба одного з коліс (рис. 1), так і групи зубів, відповідно успішність ідентифікації параметрів залежить від ступеня зносу та руйнування коліс. У разі неможливості встановлення параметрів зубчастих передач навіть при поламці одного з коліс доцільно замінювати пару. При цьому при проектуванні необхідно зберегти незмінними міжосьову відстань, передатне число та ширину зачеплення. Приблизне значення модуля при цьому необхідно округлити до найближчого стандартного значення.

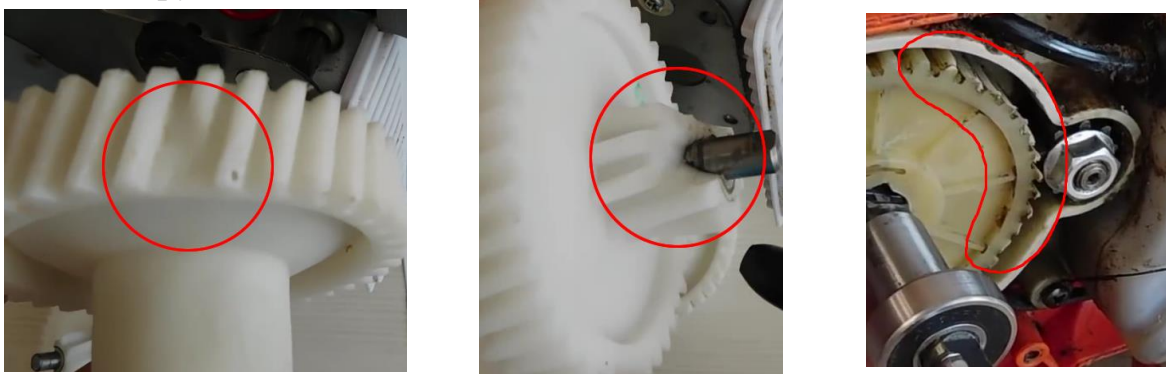


Рисунок 1 – Фотографії пошкоджених зубчастих коліс

Одним із найпростіших, але в той же час і найбільш грубих методів побудови цифрової моделі проектованого зубчастого колеса є метод, що базується на отриманні фото або скан-копії торцевої поверхні зубчастого

колеса і подальшій обробці в CAD програмах. Контрольованими параметрами є число зубів, зовнішній діаметр, діаметр западин, ширина зубчастого вінця і кут нахилу зубів. Кількість зубів визначається простим підрахунком, лінійні розміри – з використанням вимірювального інструменту, а кут нахилу зубів може бути знайдений по відбитку, який залишають вершини зубів колеса при перекочуванні по плоскій поверхні. Обов'язковою умовою при побудові моделі є дотримання співвідношення діаметра вершин, западин та отвору в маточині. Варто зазначити, що метод універсальний для будь-якого профілю зубів, при цьому для побудови зубчастого вінця достатньо одного неушкодженого зуба.

Відомі публікації, де описана методика відтворення кривих з використанням лазерного сканування та подальшої обробки набору отриманих точок на основі методів кластеризації. Проте слід зазначити, що така методика, як і 3-вимірне сканування, стосовно аналізованої проблеми не дає принципового поліпшення якості одержуваної моделі і водночас є більш витратною та тривалою.

Слід відмітити, що точність ідентифікації параметрів зубчастих коліс суттєво впливає на якість роботи, надійність та довговічність відновленого зубчастого зачеплення. При недостатній точності ідентифікації та виготовлення сполученого до даного зубчастого колеса може спостерігатися зростання діючих напружень і значне зношування сполучених поверхонь.

Більшій точності відтворення параметрів можна досягти з використанням вимірювань в сукупності із аналізом відповідних виразів, що використовуються при проектуванні передач.

Пошук точних параметрів зубчастих коліс додатково ускладнюється різноманіттям профілів зубів, стандартів та варіацією окремих параметрів в межах стандартів, які неможливо виміряти безпосередньо. Так найбільш поширеними є модульні (із стандартизованим модулем) і пітчеві (із стандартизованим шагом) зубчасті колеса.

Для модульних зубчастих коліс діаметр вершин може бути знайдений за формулою

$$d_a = \frac{m \cdot z}{\cos \beta} + 2m \cdot (h_a^* + x), \quad (1)$$

де  $\beta$  – кут нахилу зубів;

$h_a^*$  – Коефіцієнт висоти головки зуба (стандартне значення  $h_a^* = 1$ , при  $h_a^* > 1$  виходить подовжений зуб, при  $h_a^* < 1$  – укорочений зуб, в деяких галузях розповсюджені зуби з  $h_a^* = 0,8$ );

$x$  – коефіцієнт зміщення, що вводиться при необхідності корекції профілю зубчастих коліс або задоволення заданої міжосьової відстані.

В свою чергу при парному числі зубів діаметр  $d_a$  можна виміряти безпосередньо, а при непарному числі зубів його можна обчислити, зробивши відповідні проміжні вимірювання.

Більшість зубчастих коліс є «простими», тобто виготовленими зі стандартними значеннями параметрів та відсутністю корекції ( $h_a^* = 1$ ,  $x = 0$ ).

Використовуючи це припущення з виразу (1) можна знайти значення модуля зачеплення. Припущення є вірним, якщо обчислена величина  $m$  відповідає одному з модулів стандартного ряду. Якщо ж це не так, то необхідне подальше уточнення параметрів колеса. З цією метою пропонується знаходити спочатку основний крок зубів, а тоді і модуль з використанням значень довжини загальної нормалі.

З появою нових матеріалів і технологій 3D друку [1] з'являється можливість відтворення зламаних деталей, навіть якщо вони були створені з використанням інших методів виготовлення. Застосування цієї технології також є ефективним у разі створення нових пристроїв при отриманні наочних або функціональних прототипів. Особливий інтерес представляє 3D друк з метою виготовлення зубчастого колеса для перевірки правильності отримання цифрової моделі. Такий підхід суттєво знижує витрати на отримання деталей, які надалі будуть виготовлені з використанням інших технологій виробництва. При цьому вартість друку можна зменшити за рахунок зменшення заповнення матеріалом внутрішнього об'єму.

Оскільки промислові 3D принтери є доволі коштовними та витратними в обслуговуванні, їх розповсюдження дещо обмежене. Компромісним рішенням є використання 3D-принтерів споживчого класу. У [2] представлені характеристики сировини для таких FDM-принтерів у поєднанні з орієнтовною вартістю та умовами друку. Авторами публікації [3] встановлено, що серед PLA, ABS, PETG зубчасті колеса з PETG є більш довговічними, що в першу чергу пояснюється великими значеннями подовження до розриву для цього матеріалу. Схожі механічні властивості має поліамід, який за рахунок малого коефіцієнта тертя раціонально використовувати у швидкохідних передачах. Слід також враховувати, що характеристики міцності надрукованого об'єму залежать від великої кількості факторів, серед яких конструкція принтера, якість сировини, температура сопла екструдера, орієнтація волокон, коефіцієнт заповнення.

Істотним недоліком FDM технології є анізотропія властивостей матеріалу в готових виробах навіть за ідеальних умов виготовлення незалежно від використовуваної сировини. Даного недоліку практично позбавлена технологія SLA. Крім того, використання цієї технології дозволяє отримати більш точну відповідність готових зразків цифровій моделі. Серед полімерів для друку SLA також присутні матеріали, що мають у затвердженому стані подібні з PETG і PA механічні властивості. З іншого боку, використання SLA технології є більш витратним і трудомістким.

### Література

1. Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, 2nd ed.; Springer-Verlag: New York, NY, USA, 2015; ISBN 978-1-4939-4455-2.
2. <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table>.
3. Tunalioglu M.S., Agca B.V. Wear and Service Life of 3-D Printed Polymeric Gears (2022) Polymers, 14 (10), art. no. 2064.