

SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATI LEHETŐSÉGEK A FOGASKERÉK MŰKÖDÉSE KÖZBEN

SIMULATION TEST CAPABILITIES OF GEARS DURING OPERATING

Liska János⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰²⁻¹⁶¹⁴⁻⁸⁵⁶⁶^{1*}, Csorba Béla István⁰⁰⁰⁹⁻⁰⁰⁰⁹⁻⁹⁵⁵¹⁻⁷⁴⁷⁸¹,
Póka György^{0000-0002-7585-986X}³, Gergely Attila Levente⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰³⁻⁴⁵³⁶⁻⁷⁶⁴²²,
Máté Márton⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰³⁻⁴¹²⁰⁻³⁰⁴²², Kovács Zsolt Ferenc⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰²⁻⁶⁹⁹⁵⁻⁶⁵⁰⁸¹

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

² Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhelyi Kar, Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Románia

³ Gyártástudomány és -technológia Tanszék, Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország
<https://doi.org/10.47833/2024.1.ENG.009>

Kulcsszavak:

Fogaskerék
Műanyag
Véges elemes szimuláció
3D nyomtatás

Keywords:

Gear
Polymer
Finite element modelling
3D printing

Cikktörténet:

Beérkezett 2024. április 25.
Átdolgozva 2024. április 28.
Elfogadva 2024. május 2.

Összefoglalás

A fogaskerék mint gépészeti eszközök már a múltban is nagy figyelmet kaptak, mivel az nagyon megkönnyítette a különböző mechanizmusok működését. Manapság már a fogaskereket nagyon sokféle technológiával és azon belül eljárással gyártják. Ezek közül egyre elterjedtebb a műanyagból készült fogaskerék alkalmazása. Ennek eredményeként a véges elemes módszerek egyre jobban terjednek ezen területen, mivel az anyagválasztás egyre jobban a tömegcsökkentés, generatív tervezés és az ún. lattice felületek felé irányul.

Abstract

Gears as mechanical tools have already received a lot of attention in the past, as they greatly facilitated the operation of various mechanisms. Nowadays, gears are manufactured using a wide variety of technologies. Use of gears made from plastic is becoming more and more common. As a result, finite element methods are becoming more widespread in this area, as the choice of materials is increasingly based on mass reduction, generative design and the so-called directed towards lattice structures.

1. Bevezetés

A fogaskerékek olyan mechanikus gépelemek, amelyeket nyomaték és mozgás átvitelre használnak két, vagy több tengely között. Minden mechanikusan működő hajtóművek közül a legelterjedtebbek.

Amióta a forgó gépeket feltalálták, fogaskerékek azóta léteznek. Időszámításunk előtt 2600 körül a kínaiak szekerek sebességének mérésére már használtak kezdetleges fogaskereket. Arkhimédész fogazott kerekek meghajtására egy csavart használt Kr. e. 250-ben. (1. ábra)

* Kapcsolattartó szerző: liska.janos@nje.hu



1. ábra. Ókori fogaskerék [9]

Arisztotelész i.e. 4. században fogaskerekeket használt a csillagászati arányok szimulálására. Fogaskerekek széleskörű használata elterjedt volt a katedrálisok óráiban és a görög és római birodalomban. (2. ábra)



2. ábra. Kőből készült fogaskerék könnyítéssel [10]

A középkorban és azokat követő évszázadokban a fogaskerekeket fából, vagy fába illesztett kőfogakból készítették. (3. ábra)

A középkor késői évszázadaiban (fémkorszakban) már fa helyett vasat, bronzot vagy ónt használtak.



3. ábra. Fából készült fogaskerék mechanizmus [11]

2. Fogaskerék története

A fogaskerekek gyártása nem egyszerű feladat. Szabványos eljárás egészen 1835-ig nem létezett. Ekkor Sir Joseph Whitworth, (1803. 12.21. – 1887.01.22.) angol feltaláló szabadalmaztatta az első, általa kitalált és megalkotott fogaskerék-fogazási eljárást.

A német Robert Hermann Pfauter (1854.01.30. – 1914.10.14) 1897-ben szabadalmaztatta az első fogaskerék-hajtást, emellett kifejlesztette az első homlokkerekes marógépet, amely mind hengeres, mind csigakerekes hajtásban szereplő elemek megmunkálásra képes volt.

Bár a fogaskerékgyártás rendkívül nagy fejlődésen ment keresztül a 20. század második felében, a fogaskerekek szilárdsági ellenőrzése, méretezése mind a mai napig kihívást jelenet a kutatók számára, főleg úgy, hogy az új gyártási technológiák mind jobban előtérbe kerülnek (pl. 3D nyomtatás) [1] [2].

A fogaskerekek szilárdsági jellemzői közül a mai napig a hajlításból és érintkezésből származó feszültség miatti meghibásodás komoly problémát okoz egy fogaskerék hajtás esetén.

A tervezők és a gyártók ezen problémával 1892 után kezdtek komolyabban foglalkozni. A Philadelphia Engineers klub tagjai előtt ismertette Wilfred Lewis azon előadását, amely a fogaskerék fogazatán fellépő feszültségekről, és az ezekből adódó hibákról szólt. Ezen előadás fontos alapot adott a fogaskerekben fellépő feszültségek kialakulásának megértéséhez, meghatározásához és ezen feszültségek fellépésének megelőzéséhez.

Manapság a hengeres fogaskerékpárok méretezési eljárásai már sok újdonságot nem igazán rejt. A valóság viszont az, hogy több ipari alkalmazás szempontjából ezen fejlesztési, kutatási terület meghatározónak számít. Ennek egyik oka, hogy a folyamatosan növekvő elvárások és igények, fejlesztési verseny miatt a méretezési és tervezési módszerek felülvizsgálatának teljes reformja szükségessé válik. Ez nem a meglévő szabványos módszerek teljes reformját jelenti, hanem olyan új ajánlások, technológiák rögzítését, amelyek a fejlesztő mérnökök számára konvencionális kérdésekben fontos támpontot nyújthatnak. Mindezekhez rendkívül nagy segítséget jelent az egyes tervezőszoftverek által nyújtott, a szoftverben akár külön modulként használható végeselemes módszerek, szoftverek használata. Ezek segítségével a fogaskerekeknél fellépő feszültségek kialakulását jobban meg lehet érteni és akár egy a valósághoz közeli jó megoldás, eredmény is adható.

A végeselem-módszer egy olyan numerikus módszer, amellyel egy fellépő problémára közelítő megoldásokat kaphatunk. Ezeket a megoldásokat parciális differenciálegyenletek és integrálegyenletek megoldásainak kiszámításával lehet megkapni. Ez a módszer nem csak egyszerű elemeknél, hanem összetett szerkezetek rugalmas és szerkezeti elemzési problémáinak megoldására is kiválóan alkalmas.

A módszert elsőként Alexander Hrennikoff és Richard Courant 1947-ben alkalmazta, majd Olgierd Zienkiewicz alkotta meg a végeselemes analízis kifejezést e módszerek összegyűjtésével. 1952-ben a Boeing nagy erőfeszítéseket tett a repülőgép-szerkezetek végeselemes módszerekkel történő elemzésére, és a 1964-ben a NASA kifejlesztett egy Nastran nevű Fortran nyelvű szoftvert a repülőgépek, repülőgép szerkezetek elemzésére.

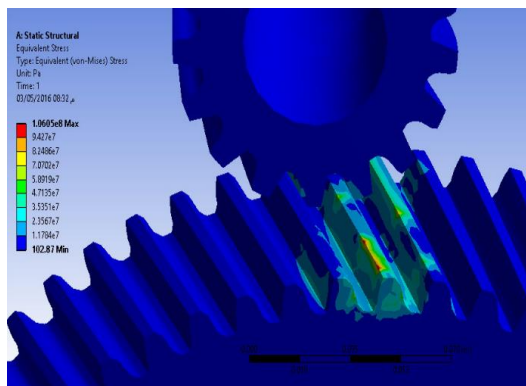
Az 1970-es évek közepén a számítógépes technológia fejlődésének köszönhetően a végeselemes módszerek fejlődése lendületet vett. A 2000-es évektől a számítógépek egyre nagyobb számítási kapacitásának hála ezen módszerek még inkább nagyobb szerepet kapnak a gépészeti tervezés során.

3. Fogaskerek szilárdsági ellenőrzése

A fogaskerek szilárdsági ellenőrzésével rengeteg egyetem és kutató évek óta foglalkozik. Ezek közül párat említenék a teljesség igénye nélkül, melyek a leendő kutatási témához kapcsolódnak.

3.1. Novikov fogazat

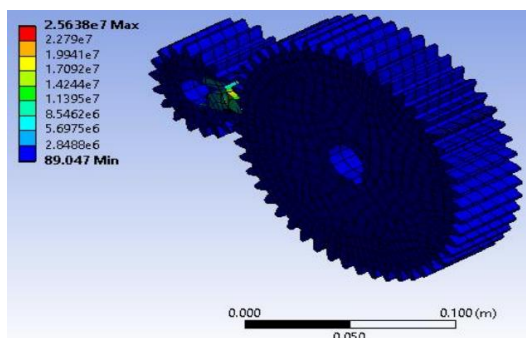
Iraki tudósok a Novikov-féle fogazattal rendelkező csigakerék profiljait vizsgálták. A keletkező feszültségek összehasonlítása érdekében három fogaskerék-pár modellt generáltak és vizsgálták végesselemes szoftver segítségével. A feszültségelemzés eredményei azt mutatják, hogy a keletkező feszültségek alacsonyabbak a javasolt (kombinált) fogaskerékben, különösen a köríves oldal érintkezése esetén [3]. (4. ábra)



4. ábra. Von Mises feszültségek ábrázolása szimulációval Novikov fogazat esetén [3]

3.2. Fogszélesség hatása a fogaskerék szilárdságára

Iraki tudósok a fogaskerék fogazatszélességének hatását vizsgálták a fogaskerék szilárdságára, és elkészítették a párfogakra vonatkozó feszültségek (hajlítás és érintkezés) elemzését. A végesselem-elemzésből (FEA – Finite Element Analysis) nyert eredményeket összehasonlították az AGMA (American Gear Manufacturing Association) egyenletértékeivel, melyek meglepően jól közelíthetőek voltak [4]. (5. ábra)



5. ábra. Hajlításból származó feszültség vizsgálata a fogszélesség függvényében [4]

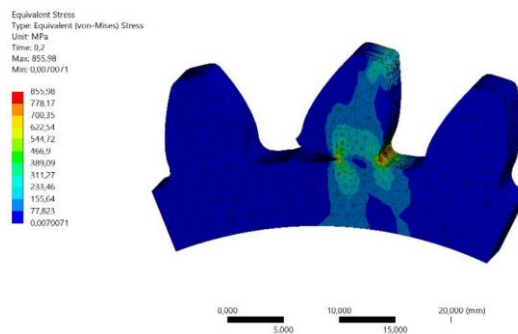
3.3. Additív eljárással készített elemek vizsgálata

Magyar kutatók ezen kutatási cikkében additív eljárással készített elemeket vizsgáltak. Vizsgálatuknak középpontjában a rétegvastagság és az alkatrészorientáció hatása volt, amelyek befolyásolták az additív eljárással készített alkatrészek felületi érdességét és pontosságát. A fő cél a rétegvastagság és az alkatrészorientáció optimális kombinációjának legmegfelelőbb kiválasztása volt, amely segítségével a felületi érdesség és a pontosság a legjobb értéket adta, miközben figyelték a nyomtatási időt, mint változót [1].

Ugyanezen magyar kutatók egy másik tudományos tanulmányukban szintén additív eljárással készített munkadarabot vizsgáltak, annak rétegvastagságának és orientációjának a mikro- és makrogeometriai tulajdonságokra gyakorolt hatását a nyomtatott és a megmunkált (esztergált) alkatrészekre. A munkadarab kinyomtatása és megmunkálása után vizsgálták a felületi érdesség nagyságát, illetve figyelték, hogy a munkadarab valós mérete mennyire tér el a nyomtatás miatt. Ebből meg tudták határozni a hengeresség mértékét. Vizsgálták emellett a megmunkálás során a nyomtatási orientáció és a forgácsképződési folyamat hatását is [2].

3.4. Kompozit fogaskerekek vizsgálata

Európai tudósok egy végeelem-elemzés (FEA – Finite Element Analysis) eredményeinek felhasználásával terhelésnek alávetett szén/onyx fogaskerék érintkezési feszültségeit vizsgálták. A fogaskerék szimulációjához egy 3D-s szilárdsági modellt hoztak létre, amely lehetővé teszi a kompozit anyagok mechanikai szilárdságának és a tönkremeneteli alakváltozásnak a megértését is [5]. (6. ábra)

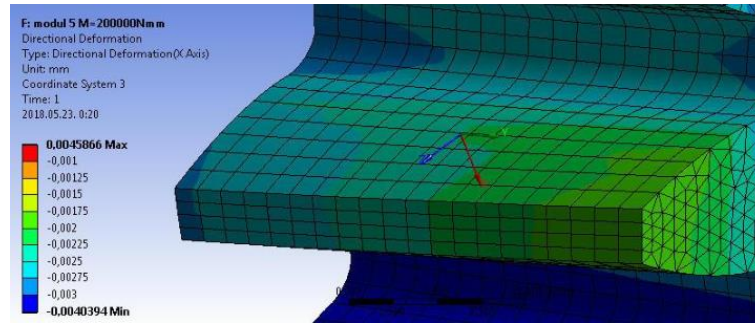


6. ábra. Von-Mises feszültség kompozit fogaskeréknél [5]

3.5. Ferde fogazatú fogaskerekek vizsgálata

Bodzás S. magyar publikációjának célkitűzése a ferde fogazatú fogaskerékpárok (elemi, kompenzált és általános) tervezési folyamatának általánosítása és a számítógépes modellek elkészítése (CAD - Computer Aided Design) volt.

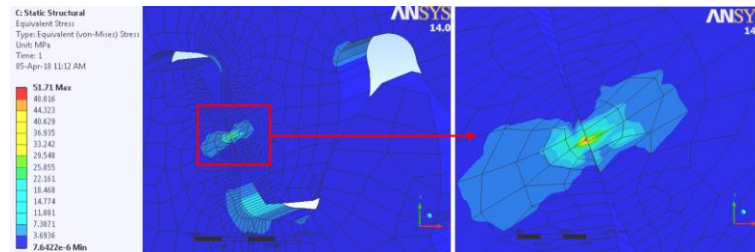
Számítógépes programot fejlesztett ki a tervezési folyamat automatizálása céljából. Ehhez egy adott geometriájú ferde fogazatú hengeres fogaskerékpárt tervezett, melyet a kapcsolódási vizsgálatok (TCA - Tooth Contact Analysis) során különböző nyomatékokkal terhel [6]. (7. ábra)



7. ábra. Kialakult deformáció a nyomaték hatására [6]

3.6. Fogaskerek dinamikusan szimulációja

Iraki tudósok által készített tanulmányban a fogaskerék érintkezési feszültségét vizsgálták a fordulatszám változás hatására. A fogaskerek dinamikai elemzésének háromdimenziós szimulációja végesselemes szoftver segítségével történt. A dinamikus elemzés tartalmazta a dinamikus feszültségek elemzésének meghatározását. Az érintkezési feszültséget elméleti úton határozták meg, majd elemezték, valamint numerikusan megbecsülték mind a Hertz-féle matematikai modell, mind a végesselemes módszer segítségével [7]. (8. ábra)



8. ábra. Fogaskerek érintkezési feszültsége nagy fordulatszám esetében [7]

3.7. Fogprofil módosításának hatása a szilárdsági jellemzőkre

Indiai tudósok által készített tanulmány célja egy fogazott fogaskerék pár szilárdságának összehasonlítása volt a fogprofil felső részének módosításával, azaz a fogazat kiegészítésével. Az összehasonlításhoz két különböző fogaskerékprofilot használtak. Az egyik a standard involút profil, a másik pedig a módosított involút profil [8].

3.8. Kúp fogaskerek szilárdsági ellenőrzése számítógéppel

Ebben a tanulmányban a kutatók számítógéppel segített analízis és feszültségelemzés segítségével hajtóművek fogaskerekeit vizsgálták. A vizsgálatok, a szimulációk a fogaskerék fogainak felszínére összpontosultak. Az eredmények ismeretében a kutatók különböző módszereket javasoltak, amelyekkel a csapágyérintkezést, a rezgést és zajt lehet tovább vizsgálni. Emellett a végesselem-elemzés alkalmazásával vizsgálták a csapágyérintkezést, valamint a fogaskerék kapcsolódás során különböző feszültségelemzéseket is elvégeztek. A végesselemes analízis során a modellek és a peremfeltételek beállítása automatikusan lett megoldva [12].

Irodalomjegyzék

- [1] Kónya G.: Investigating the Impact of Productivity on Surface Roughness and Dimensional Accuracy in FDM 3D Printing, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, vol. 52, no. 2. pp. 128-133, 2024, DOI: 10.3311/PPtr.22952
- [2] Kónya G., Ficzer P.: The Effect of Layer Thickness and Orientation of 3D Printed Workpieces, on The Micro- and Macrogeometric properties of Turned Parts, *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 21, no. 2. pp. 231-250, 2024.
- [3] Mansoor Ali; Prof. Dr. Hatem R. Wasmi; Prof. Dr. Mohammad Qasim Abdullah: Generation and Stress Analysis in New Version of Novikov Helical Gear Combining Double Circular Arc and Crowned Involute Profiles, *Innovative Systems Design and Engineering*, 2016 Vol.7, No.8, ISSN 2222-1727 (Paper) ISSN 2222-2871 (Online)
- [4] Maher Rehaif Khudhair AL-Dewaniyah: Design and Analysis for Spur Gear by Using AGMA Standards and FEA: A Comparative Study, *Test Engineering and Management*, 2020, ISSN: 0193-4120 Page No. 15086 – 15091
- [5] Milan Zmindak, Michal Kaco, Alzbeta Sapietova: Analysis of the Contact Stresses of Spur Gears Manufactured by 3D Printing from Composite Materials, *MATEC Web of Conferences* 357, 06003 (2022), DOI: 10.1051/mateconf/202235706003
- [6] BODZÁS S.: Ferde fogazatú fogaskerékpárok számítógéppel segített tervezése és modellezése, *Műszaki Tudomány az Észak – Kelet Magyarországi Régióban*, 2018
- [7] Jwan Khalil Mohammed, Younis Khalid Khdir, Safeen Yaseen Kasab: Contact Stress Analysis of Spur Gear Under the Different Rotational Speed by Theoretical and Finite Element Method, *Academic Journal of Nawroz University (AJNU)*, 2019, DOI: 10.25007/ajnu.v7n4a292
- [8] Ajinkya Mali, Rahul Marne: FINITE ELEMENT ANALYSIS COMPARISON OF SPUR GEARS BETWEEN STANDARD TOOTH PROFILE AND MODIFIED PROFILE, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Sep 2019, Volume: 06 Issue: 09, e-ISSN: 2395-0056, p-ISSN: 2395-0072
- [9] <https://www.hellenicaworld.com/Greece/ImagesGR/ColumnDrums.jpg>
- [10] <https://assets.catawiki.nl/assets/2023/11/12/d/c/b/dcb30f50-6357-4a7c-8185-911f0b58e78d.jpg>
- [11] https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-030-64638-7_9/MediaObjects/492692_1_En_9_Fig1_HTML.jpg
- [12] Argyris J., Fuentes A., L. Litvin F.: Computerized integrated approach for design and stress analysis of spiral bevel gears, *Computerized integrated approach for design and stress analysis of spiral bevel gears*, Volume 191, Issues 11–12, 4 January 2002, Pages 1057-1095, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(01\)00316-4](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(01)00316-4)