

KORREKCIÓS TÉNYEZŐ CSAPÁGYBEPRÉSELÉS LINEÁRIS ÉS NEMLINEÁRIS STATIKAI SZIMULÁCIÓ EREDMÉNYEINEK ÖSSZEHOSONLÍTÁSÁHOZ

CORRECTION FACTOR FOR COMPARING LINEAR AND NONLINEAR STATIC SIMULATION RESULTS OF BEARING PRESS-FIT

Dr. Heteyi Csaba*

ABSTRACT

This study analyzes the press fitting process of a ball bearing into an output housing, focusing on stress distribution around the bearing seat fillet. Simulations were performed using various overlap values ($G = 0.005 - 0.025$ mm) with both linear and nonlinear static FE methods. Based on the comparison of stress results, a linear to nonlinear correction factor ($K_{L2NL} = 1.05 - 1.25$) was defined to adjust linear static's results for improved accuracy.

1. BEVEZETÉS

A mérnöki szerkezetek egyik központi elemei a csapágyak, melyek beszerelése során kritikus mechanikai folyamatok játszódnak le, amelyek hatással vannak a szerkezet élettartamára. A golyóscsapágyak bepréselése során a csapágy gyűrűje és vele szoros illesztésben álló test között az átfedések miatt lokális feszültségcsúcsok alakulhatnak ki. E feszültségcsúcsok többek között az átfedés mértékétől és a csapágy környezetének geometriájától függhetnek. Jelen cikkben egy mélyhornyú golyóscsapágy bepréselését ismertetem egy váltó kihajtóházába, különös tekintettel a csapágyülék lekerekítésében kialakuló feszültségi állapotokra. A vizsgálatot két különböző szimulációs módszerrel végzem, lineáris statikai és nemlineáris statikai végeelemes szimulációval.

A csapágy ház belső átmérője kisebb, mint a csapágy külső átmérője, így a két átmérő átfedése miatt szoros illesztés alakul ki. A két felület egymásnak nyomódik olyan erővel, hogy azok üzemi körülmények között nem tudnak egymáshoz képest elmozdulni. E csapágybepréselési folyamat többféle módon történhet, jelen esetben hidraulikus prést alkalmaznak.

A préselési folyamat során az egymásnak nyomódó részekben mechanikai feszültség ébred, melyek mértéke függ az átfedés nagyságától [1]. A bepréseléshez szükséges erő szintén függ a geometriai átfedéstől, a testek merevségétől és mechanikai tulajdonságaiktól (pl., rugalmassági modulus, Poisson szám), valamint a két

érintkező felület közötti súrlódási erőtől. A préselési erő meghatározása egy szereléstechológiai paraméter, mely ha túl kicsi a csapágybepréselés során a csapágy csak részben préselhető be helyére, míg, ha túl nagy akkor nem kívánt károsodás is előfordulhat. Jelen tanulmányban a préselési erőt fix értéken tartottam, és nem változtattam az átfedések függvényében.

Csapágybepréselés során az átfedések függvényében képlékeny feszültségek, így maradó alakváltozások is előfordulhatnak, extrém esetben repedések és mikrotörések is kialakulhatnak. Végeelemes módszer segítségével, még a szerelési folyamatok megkezdése előtt a csapágybepréselés vizsgálható, így a csapágyház feszültségi állapota gyártás és valós körülmények közötti tesztek nélkül kiértékelhetőek. A csapágybepréselés folyamata és az átfedések feszültségre gyakorolt hatása ismert folyamat. Ipari körülmények között, nem e tényezők mechanikai hatását szokás vizsgálni, hanem a gyártott termékben keletkező feszültségeket és azok hatását az élettartamra.

A csapágybepréselés folyamata és az átfedések feszültségre gyakorolt hatása szakirodalmi szempontból jól ismert és dokumentált [1-4]. Jelen tanulmány azonban gyakorlati megközelítést alkalmaz, egy sebességváltó példáján keresztül vizsgálva a már ismert mechanikai folyamatokat.

2. VÉGESELEMES MODELL CSAPÁGYBEPRÉSELÉSHEZ

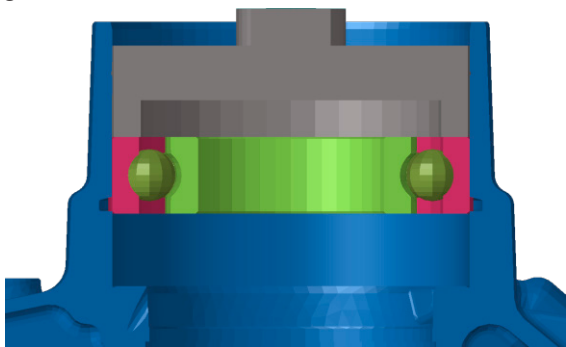
A csapágybepréselési folyamathoz két különböző végeelemes módszert használtam, lineáris statikát és nemlineáris statikát.

Lineáris statikai szimuláció során általánosságban megállapítható, hogy a végeelemes modell egyszerűbb, kisebb a számolási erőforrásigénye (kevesebb a számítási idő, kisebb memória szükséglet), míg a nemlineáris statikai szimuláció komplexebb modellezési lehetőséget tartalmaz, többféle és nagyobb mértékű nemlinearitások (geometriai-, kontakt-, peremfeltétel- és anyagmodell) vizsgálhatóak.

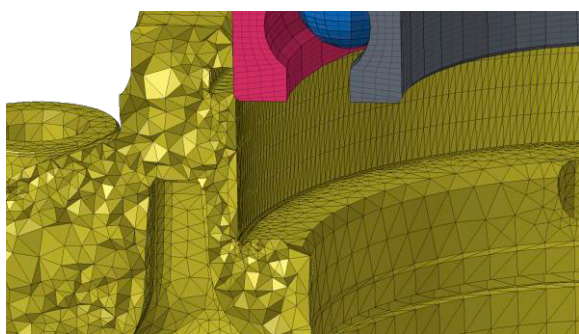
*Szimulációs mérnök, ZF Hungária Kft.

A lineáris statikai és nemlineáris statikai szimulációk funkciói nagyban függenek a végeleemes megoldóba a gyártó által implementált funkcióktól. Szigorúan véve a lineáris statikai szimuláció nem tartalmaz nemlinearitásokat, azaz két egymáson elcsúszó és egymáshoz deformálódó felület kontaktanalízise nem a lineáris statikai része, mivel ez egy nemlineáris folyamat. Egyes gyártók az ilyen kontaktmodellezést nem építik be az alap lineáris statikai moduljukba, csak egy kibővített verzióba. A lineáris statikán belüli kontaktanalízis korlátja, hogy az alakváltozások és elmozdulások csak kis mértékűek lehetnek. Ezzel szemben a nemlineáris statikai szimulációk lehetővé teszik a nagy elmozdulások és jelentős alakváltozások modellezését. Jelen feladathoz PERMAS (v20.00.189) végeleemes megoldót használtam, mely a lineáris statika esetén egy bővített eszköztárral rendelkezik, így képes a kontaktanalízis elvégzésére relatív kis elmozdulások esetén. [5-6]

A szimuláció során öt egymástól elkülönített háló régiót definiáltam, (1) a kihajtóháza, (2) a csapágy belső gyűrűje, (3) a csapágy külső gyűrűje, (4) a csapágygolyók és (5) egy egyszerűsített présszerszám. E régiók az 1. ábrán láthatóak.



1. ábra Sebességváltó kihajtóháza (részben ábrázolt kék komponens), a beprésselni kívánt csapágy (rözsaszín, világos és sötétzöld komponensek) és egy egyszerűsített présszerszám (szürke komponens) végeleemes szimulációhoz.

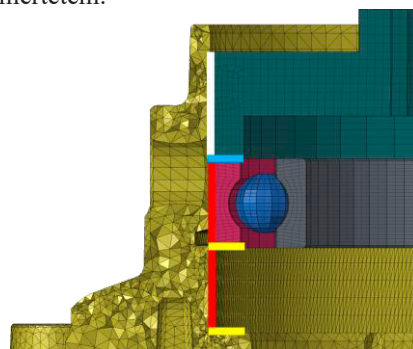


2. ábra Vizsgált lekerekítés régiója

Ez az öt komponens 1.8 millió szilárdtest elemet tartalmazott, mellyen felül a modell stabilitásához lágy rugókat és az erő bevezetéséhez RBE elemeket is használtam. A hálózás során két stratégiát alkalmaztam, a csapágyház lekerekítésénél a háló finomságát szilárdságtani szemponton alapján, míg a kihajtóház további részein, a csapágy régióiban és az egyszerűsített

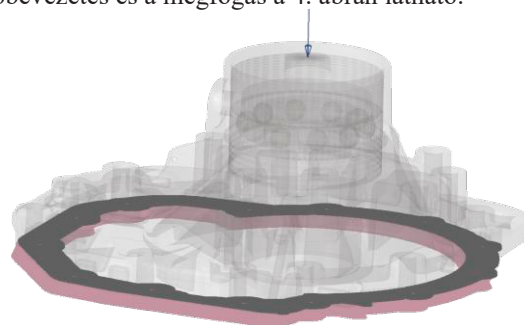
présszerszámnál merevségi szempontok alapján készítettem el [5]. A csapágyfenék környezetének hálója a 2. ábrán látható.

A 3. ábrán láthatóak a kontakt régiók. Sűrűlódásmentes kontaktot alkalmaztam a világoskék színnel jelölt felületek között (présszerszám és a csapágy), valamint a fehér színnel jelölt (présszerszám és csapágyház), és a sárga színnel jelölt (csapágygyűrű „alja” és az ülék alja) felületek között. A piros színnel jelölt felületek esetén (külső csapágygyűrű és csapágyfészek) sűrűlódásod kontaktfelületeket definiáltam. A „piros” felületek között a sűrűlódási tényező 0,2 volt. Ezen felületek között a geometriai áthatást nem a geometria módosításával, hanem a Contact Gap funkción belül negatív kontakt hézaggal modelleztem. Az ipari folyamat vizsgálata során a sűrűlódási tényező értékét is módosítottam, viszont jelen tanulmányban csak a $\mu_{statikus} = \mu_{dinamikus} = 0,2$ esetet ismertetem.



3. ábra Kontakt régiók

A kihajtóházat az „alján” rögzítettem DOF123-as kinematikai kényszerrel, míg préserot egy RBE2-es elem segítségével vezettem be a présszerszám „tetején”. Az erőbevezetés és a megfogás a 4. ábrán látható.

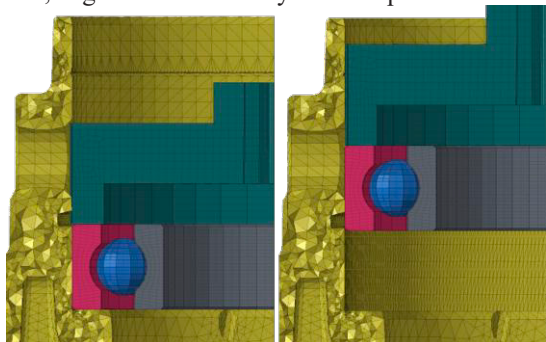


4 ábra. Kihajtóház kinematikai kényszerzése és a préseerő bevezetése

A két különböző szimulációtípus eltérő kezdeti geometriát igényelt. A lineáris statikai szimulációhoz a csapágybeprésselés majdnem végállapotát vettem alapul, azaz a csapágy és a csapágyfészek között 0,001 mm-es hézagot állítottam be. Ezzel szemben a nemlineáris statikai szimuláció esetén a kiinduló állapot a csapágy és a csapágyfészek első érintkezési pontja volt. Ebben az esetben a csapágy beprésselésének axiális útja 19,85 mm volt. E két kezdeti geometria az 5. ábrán látható.

A PERMAS megoldó lehetőséget biztosít arra, hogy a lineáris statikai szimuláció több lépésben történjen,

miközben a kontaktállapotokat és kontakt erőket CASO (Contact Analysis Status Output) fájlkon keresztül tovább viszi a következő lépésbe. Ezt kihasználva, a szimulációt több lépésenként építettem fel, először aktiváltam a kontaktokat áthatás nélkül, majd bekapcsoltam az interferáló (negatív hézagú) kontaktokat, ezt követte a terhelési erő bevezetése történt, végül a súrlódási tényezőt kikapcsoltam.



Lineáris statika Nemlineáris statika

5. ábra Kezdeti geometriák lineáris statikai és nemlineáris statikai szimulációkhoz

Ez a megközelítés gyorsabb konvergenciát eredményezett, mivel a kontaktállapotok újrafelhasználása csökkentette az iterációk számát. Nemlineáris statikai szimuláció esetén kismértékű kontaktváltozások mellett a CASO fájl alkalmazása hasonlóan előnyös lehet. [6]

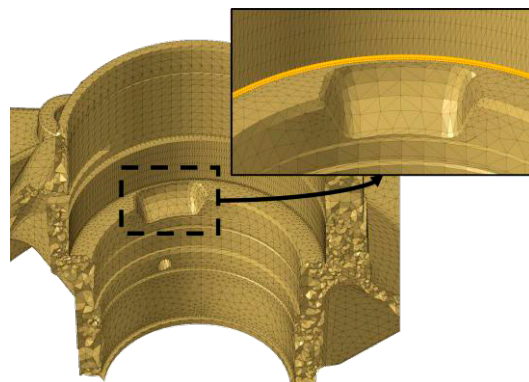
Kétféle anyagmodell alkalmaztam a szimulációk során. A lineáris statikai szimulációhoz lineárisan rugalmas, izotropikus acélt ($E = 210\,000\text{ MPa}$, $\nu = 0,3$) és alumíniumot ($E = 75\,000\text{ MPa}$, $\nu = 0,35$) használtam, míg a nemlineáris statikai szimuláció esetén az alumínium anyagmodellje elasztó-plasztikus (képlékeny) anyagmodell, amely a fenti rugalmas paramétereken túl egy multi-lineáris feszültség - alakváltozás ($\sigma - \epsilon$) görbével lett definiálva, mely az 1. táblázatban látható.

1. táblázat Alumínium képlékeny anyagmodellje a rugalmassági határ felett

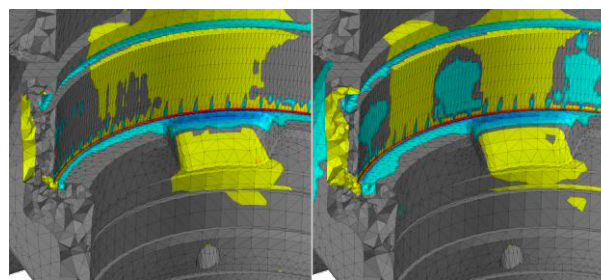
Feszültség (MPa)	Alakváltozás (-)
160	0
170	0,0001
200	0,0030
250	0,0050
990	0,0060

3. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

A szimulációkat lefuttatva a csapágyfészek alján található lekerekítésben ébredtek a legnagyobb feszültségek és azon belül is a kivágás környezetében annak feszültséggyűjtő hatása miatt. E régió a 6. ábrán látható, illetve e régió a feszültségi állapota a 7. ábrán látható.



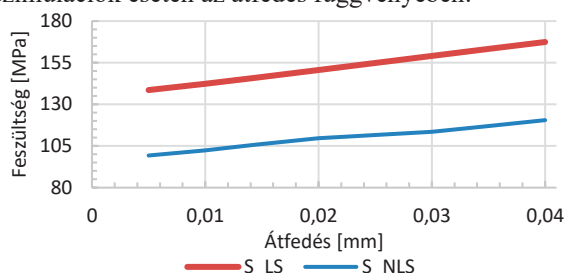
6. ábra Veszélyes régió a csapágyház alján található lekerekítés környezetében



Lineáris statika Nemlineáris statika

7. ábra Feszültségi állapot a kivágás környezetében

A csapágyfészek lekerekítésében ébredő legnagyobb feszültségérték nem azonos helyen ébredt. A 8. ábrán egy szabadon választott node-ban ébredő feszültségértékek láthatóak lineáris statikai és nemlineáris statikai szimulációk esetén az átfedés függvényében.



8. ábra Feszültség a csapágyfészek lekerekítésében egy kiválasztott ponton az átfedés függvényében

Kiértékelési szempontból a nemlineáris statikai szimuláció eredményeit tekintem mérvadónak, mivel ebben az esetben a megoldás az aktuális időlépésben az előző állapottól függ, azaz időlépéses megközelítést alkalmaz, mely kiterjed a kontaktállapotokra, valamint az anyagmodell nemlinearitására felül a geometriai nemlinearitásra is (a szimulációt „Large Displacement”- azaz nagy elmozdulás funkcióval futtattam). A nemlineáris szimuláció feszültségértékeihez képest a lineáris statikai szimuláció a kiválasztott csomóponttól függően $\approx 130\text{-}140\%$ -kal túlbecsülte a feszültség értékeket.

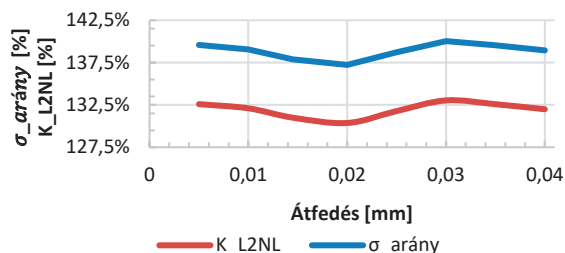
A lineáris statikai szimuláció előnye, hogy kisebb számítási erőforrást igényel, kevesebb pre- és posztprocesszási időt vesz igénybe, valamint stabilabb futást biztosít. A nemlineáris szimulációk esetében

előfordult, hogy a számítás nem futott le hibamentesen, és az időlépések finomhangolására volt szükség a konvergencia eléréséhez.

Az előbbi tényezők miatt hasonló feladatok esetén célszerű lehet a lineáris statikai (σ_{LS}) szimuláció alkalmazása, amelyet a nemlineáris (σ_{NLS}) eredményekhez viszonyított korrekciós szorzótényezővel lehet pontosítani. A két feszültség érték arányát az (1)-es egyenlet ismerteti.

$$\sigma_{arány} = \sigma_{LS} / \sigma_{NLS} \quad (1)$$

Az feszültség arány alakulása és az általam javasolt biztonsági tényező ($K_{L2NL} = \sigma_{arány} \cdot 0,95$) az átfedés függvényében a 9. ábrán láthatóak.



9. ábra Feszültségek aránya és K_{L2NL} arány

A K_{L2NL} korrekciós tényező túlbecsüli a valós feszültséget a biztonsági irányába. E korrekciós tényező értéke ≈ 120 - 135% közötti, az átfedés és a vizsgált pozíció függvényében. A korrigált feszültség (σ_{korr}) érték a (2)-es egyenlettel számítható ki.

$$\sigma_{korr} = \sigma_{LS} / K_{L2NL} \quad (2)$$

A számolás 16 CPU magon futott párhuzamosítva. Az átlagos számolási idő lineáris statika esetén átlagosan 2,4 óra volt, míg nemlineáris statika esetén 88,9 óra. A leghosszabb számolási idő lineáris statikánál 3,5 óra, míg nemlineáris statika esetén 170,4 óra volt. Ezek az értékek egy mag esetén értendők, valós emberidőben ezek az értékek a magok számával osztandóak.

A pre- és posztprocesszási idő jelen feladatnál nem volt mérve. A sikertelen futások esetén az időlépések nagysága és az időfüggvények finomhangolása miatt a nemlineáris statika többlet időt igényel a lineáris statikához képest.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás célja egy golyóscsapágy bepréselési folyamatának vizsgálata egy váltó kihajtóházába. A csapágyfészek lekerekítésében kialakuló feszültségi állapotokat különböző átfedések ($G = 0,005 - 0,025$ mm) mellett vizsgáltam lineáris és nemlineáris statikai szimulációval. A nemlineáris modell pontosabb eredményeket adott, mivel komplexebb modellezési lehetőségeket tartalmaz, míg a lineáris gyorsabb és stabilabb futást biztosított.

A két módszer közötti eltérés alapján korrekciós szorzótényezőt határoztam meg (K_{L2NL}), amely lehetővé teszi a lineáris statikai szimulációk eredményeinek pontosítását egy 5%-os biztonsági tartománnyal. A

módszer segítségével a nemlineáris szimulációk részben kiválthatók, és csak kritikus esetekben szükségesek.

4. SUMMARY

This study investigates the press fitting process of a ball bearing into the output housing of a gearbox. Stress distribution around the bearing seat fillet was analyzed using linear and nonlinear static simulations across various overlap values ($G = 0.005-0.025$ mm). The nonlinear model provided more accurate results due to its ability to incorporate more complex modeling features and functions, while the linear model ensured faster and more stable simulation runs.

Based on the differences between the two methods, I determined a correction factor (K_{L2NL}), which allows the refinement of linear static simulation results within a 5% safety margin. With this method, nonlinear simulations can be partially replaced and are only necessary in critical cases.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a haszongépjárműves divízió szimulációs osztályának Simulation technology/Methodology research projektjén belül készült el a ZF Hungária Mérnököközpontjának és a magyarországi szimulációs csapat vezetésének támogatásával.

6. IRODALOM

- [1] OSWALD F. B., ZARETSKY E. V., POPLAWSKI J. V.: *Interference-Fit Life Factors for Ball Bearings*, NASA Technical Memorandum, NASA/TM—2010-216913, Glenn Research Center Cleveland, Ohio, USA, 2010
- [2] IZARD E., GARCÍA-MARTÍN R., RODRÍGUEZ-MARTÍN M., LORENZO M.: *Finite Element Analysis of Friction-Induced Stress Concentrations in Press Fits with Chamfer Hubs*, Lubricants Vol. 13, No. 5, 2025, pp. 231. DOI: 10.3390/lubricants13050231
- [3] LACROIX R., KERMOUCHE G., TEISSEIRE J., BARTHEL E.: *Plastic deformation and residual stresses in amorphous silica pillars under uniaxial loading*, Acta Materialia Vol. 60, No. 15, 2012, pp. 5555-5566. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.07.016
- [4] DELLA CORTE C., STANFORD M. K., Jett T. R.: *Rolling Contact Fatigue of Superelastic Intermetallic Materials (SIM) for Use as Resilient Corrosion Resistant Bearings*, Tribology Letters, Vol. 57, No. 26, 2015, pp. 1-15. DOI: 10.1007/s11249-014-0456-3
- [5] MADIER D.: *Practical Finite Element Analysis for Mechanical Engineers*, FEA Academy, ISBN 978-1999047504, 2021.
- [6] INTES GmbH.: PERMAS - User's Reference Manual (PERMAS Version 20.00.189), INTES GmbH, Stuttgart, 2024.