

ALUMÍNIUM PALACKOK FENÉKBENYOMÓ MŰVELETÉNEK VÉGESELEMES VIZSGÁLATA

Gönczi Dávid 

adjunktus, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: mechgoda@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A cikk az alumínium csomagolópalackok fenékbennyomó műveletének modellezési lehetőségeit vizsgálja. Az alakítási eljárás numerikus szimulációjára az Abaqus CAE kereskedelmi forgalomban kapható végeselemes programrendszer került felhasználásra. Felvázoljuk a fenékkialakítás mechanikai modellezésének lehetőségeit, héjként, illetve kontinuum elemekkel való leírásának jellemzőit, azok előnyeit és hátrányait. A cél a technológiai művelet szempontjából kulcsfontosságú alakítóerő - elmozdulás diagram meghatározása. Megvizsgáljuk az egyes paraméterek (például a geometria, anyagjellemzők stb.) reakcióerőre gyakorolt hatását.

Kulcsszavak: alumínium palack, fenékbennyomás, VEM, alakítóerő

Abstract

This paper deals with the numerical simulation of the forming process in which the bottom part of an aluminium can is shaped. The numerical models are created using commercial finite element software Abaqus CAE. The modelling possibilities of this highly nonlinear shaping process are investigated. The main objective is to get the reaction force – displacement diagram of the forming process. The effect of various parameters (such as the material properties or the geometry) is investigated on the reaction forces.

Keywords: aluminium cans, bottom forming, FEM, reaction forces

1. Bevezetés

Az alumínium palackok az egyik legszélesebb körben alkalmazott csomagolóeszközök, amelyek a csomagolandó anyagoktól, valamint a piaci igényektől függően sokféle formában előfordulnak. Ezen palackok általában vékony falúak, forgásszimmetrikusak, azonban az alakjuk folyamatosan változik, a gyártás szempontjából egyre bonyolultabb és bonyolultabb formavilágú termékek jelennek meg a piacon.

A palackok alsó részén általában egy konkáv, dóm alakú részt alakítanak ki. Ennek célja, hogy egyrészt megnöveljék a palack töltőnyomással szembeni ellenállóképességét, másrészt pedig ennek segítségével lehet egy sík felületre stabilan felhelyezni a palackot.

Az alumínium aeroszolos palackok gyártása egy speciális gyártósoron történik, amely az alábbi főbb technológiai műveletekből áll:

- alumínium pogácsák hátrafolytatása,
- a folytatott darabok méretre vágása, tisztítása, lakkozása, festése,
- fenékbennyomási művelet,

- nyakbehúzás, tágitási-szűkítési lépések sorozata a kívánt alak elnyeréséig,
- befejező forgácsolás, tisztítás, ellenőrzés.

Az első alakítási lépés egy képlékeny hidegalakítási lépés, amelyben maradó feszültségek keletkeznek az anyagban, ami hatással lehet a többi műveletre is. Ezt ellensúlyozza a több rétegben felvitt lakkozás emelt hőmérsékleten végzett beégetése, ami csökkenti ezeket a maradó feszültségeket. Illetve ezen művelet segítségével alakítható ki a kiinduló csésze falvastagság eloszlása.

Az aeroszolos palackok falvastagság/átmérő viszonyszámuk alapján vékony falú héjszerkezeteknek tekinthetők. Számos könyv taglalja a lemezek és héjak mechanikai leírását (Reddy, 2006; Radwanska et al., 2016; Chappelle et al., 2011). Az előző évtizedekben több tanulmány is született a fenékbenyomást megelőző hátrafolyatási művelet szimulációjáról (Patten, 2001; Lukács et al., 2021; Hardy et al. 2007), amelyek többnyire egyszerűbb, kétdimenziós modelleket használtak. Rendelkezésre állnak tanulmányok a palackok szűkítési és tágitási lépéseinek paramétervizsgálatairól, mint például (Folle et al., 2008). Születtek cikkek a nyakbehúzási lépések egyszerűbb, végeelem-módszerrel történő leírásáról (Takeutshi, 1993; Hardy et al., 2007; Belblidia et al., 2013; Gönczi, 2020), avagy speciális alakító eljárások numerikus szimulációjáról (Ceretti et al., 2013). További fontos téma a fém csomagolópalackok gyártása kapcsán az alakítási határállapot meghatározása, azaz a stabilitásvesztési (roppantási) reakcióerők meghatározása, amellyel foglalkoznak a (Gönczi et al., 2019; Kiss et al., 2020; Kiss, 2020) cikkek.

Jelen tanulmány a fenékbenyomó művelet numerikus szimulációjának lehetőségeit vizsgálja Abaqus CAE szoftverrendszerben. Bemutatja a kiválasztott végeelem program hatékonyságát a vékonyfalú héjak erősen nemlineáris hidegalakítási eljárásainak modellezésére.

2. A feladat részletes leírása

A numerikus szimulációkhoz egy 44 mm kiinduló átmérőjű, hengeres palackot választottunk. A palackpalást felső, nagyobb részének falvastagsága 0,36 mm. A kísérletek során egy 0,9 mm fenékvastagságú darabot vizsgáltunk. A palást hossza 200 mm volt a fenékbenyomó és nyakazási műveletek előtt. A palackot az alakítást végző célgépbe az alsó, 35 mm hosszúságú szakaszán fogják be. Többféle fenékkialakítást is használnak alumínium palackok esetén, amelyek közül a leggyakoribbak a gömb alakú –ami az általunk vizsgált verzió–, avagy a kúpos változatok.

A fenékbenyomást egy 20,25 mm sugarú acélszerszám végzi, a fenékvisszadomborítás távolsága 8 mm a vizsgált esetben, amihez a visszarugózás miatt 8,25 mm szerszámelmozdulást kell biztosítani. A peremfeltételek leírására több lehetőségünk is van. A palack palástját radiális irányban, a palack peremét axiális irányban rögzítjük, majd a gömbös végű szerszámot toljuk rá a munkadarabra.

A probléma erősen nemlineáris jellegű, hiszen vékony geometriájú testek nagy alakváltozásáról beszélhetünk (azaz geometriai nemlinearitásról). A palack anyagát rugalmas-képlékeny konstitutív egyenletek segítségével írjuk le, ami az anyagi nemlinearitás forrása. Jelen esetben az időtől (avagy alakváltozási sebességtől) való függőségtől eltekintünk, hiszen az alakítási művelet sebessége általában ezt nem indokolja. Végezetül pedig szintén a problémaforrások közé sorolható a palack-szerszám érintkezés numerikus leírása (azaz peremnemlinearitásról is beszélhetünk).

A palack anyaga alumínium (Al99.5), amelynek anyagjellemzői:

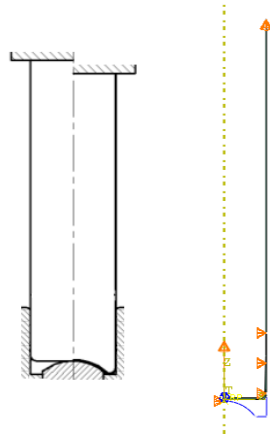
- sűrűsége: 2,7 tmm⁻³;
- rugalmassági modulusza: 70 GPa;
- Poisson szám: 0,4;
- folyáshatára: 120 MPa; illetve $\sigma = 4$ alakváltozáshoz 231 MPa feszültségértéket veszünk,

- a képlékeny anyagi viselkedésének leírására lineárisan keményedő (bilinéaris) anyagmodellt használtunk.

Három különböző modellezési technikával fogjuk megvizsgálni a kitűzött problémát. Az első két esetben kétdimenziós forgásszimmetrikus feladatként először kontinuum elemekkel, majd héjelemekkel vizsgálódunk. Végül pedig a háromdimenziós héjelemekkel való leírási módszer jellegzetességeit és szükségességét vázoljuk fel.

3. Kétdimenziós forgásszimmetrikus modell kontinuum elemekkel

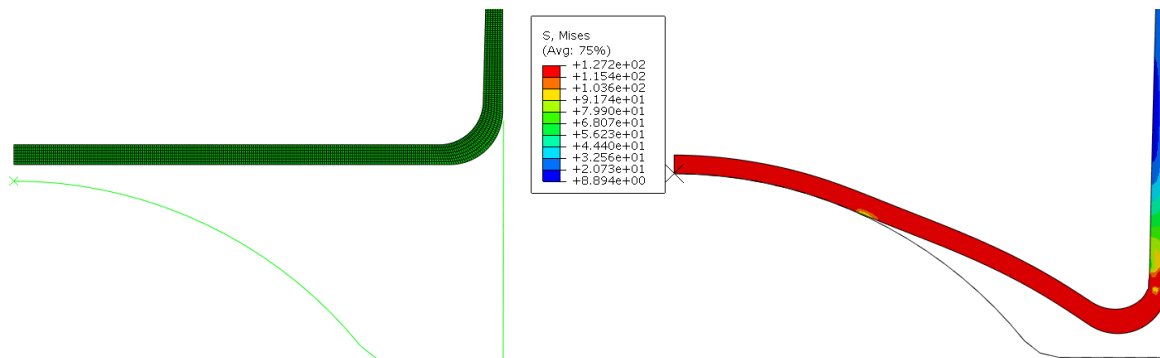
Az első vizsgált esetben az alakítási műveletet forgásszimmetrikus feladatként kezeltük. A feladat vázlata az 1. ábrán látható. A palackot kontinuum elemekkel (zöld színnel), a szerszámot pedig merev felületként (kék színnel jelölve) modellezzük. Az 1. ábrán narancssárga szimbólumok (háromszögek és nyilak) jelölik a felhasznált peremfeltételeket, amelyek megegyeznek az előző fejezetben leírtakkal.



1. ábra. A feladat modellezése forgásszimmetrikus kontinuum elemekkel.

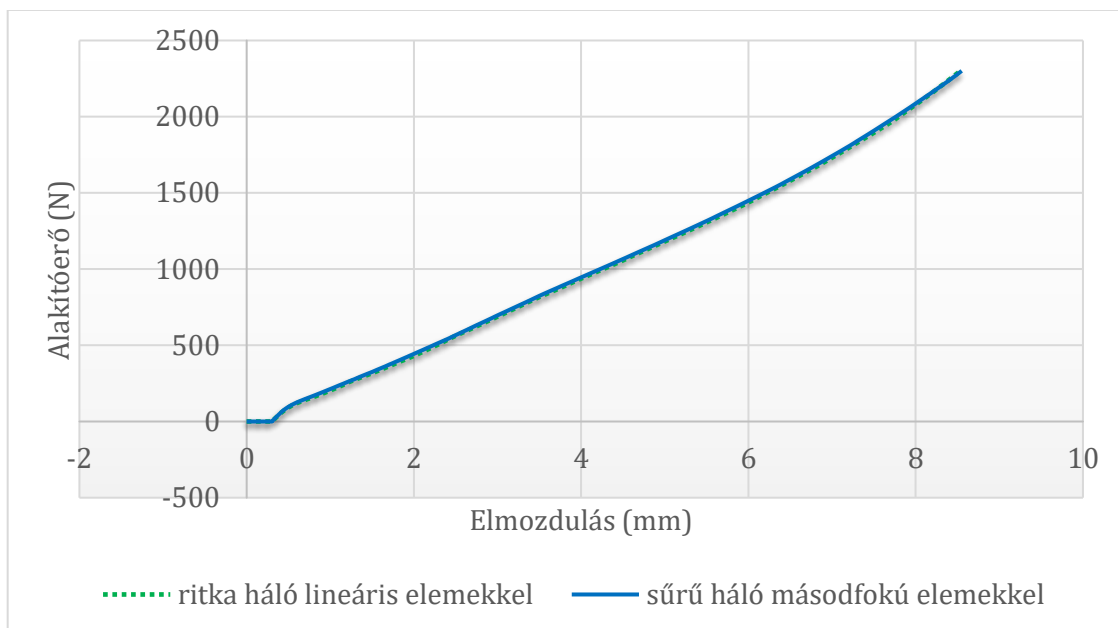
Ahogy az az 1. ábrán is látható, ebben az esetben a geometria hálózása a vékony falvastagság miatt nehézkes, hiszen elegendően sűrű hálót kell létrehoznunk ahhoz, hogy kielégítően pontos megoldást kapjunk. Különösen lényeges ebben az esetben, hogy a gyakori numerikus problémákat, mint az ún. „locking” és a „hourglassing” jelenségeket elkerüljük. Erre több lehetőségünk is van. Az egyik, hogy lineáris elemeket használva a falvastagság mentén több, legalább négy elemsorral dolgozunk, ami a csomópontok számát és így a számítási időt jelentősen megnöveli. Vagy alternatív opciót jelent a kvadratikusan elemek alkalmazása, azonban ez a kontakt jelenléte és a nagy elmozdulások miatt nem mindig kivitelezhető a megoldás numerikus stabilitása miatt. Az Abaqusban forgásszimmetrikus feladatokra két fő algoritmus érhető el, a felület-felület (surface to surface) és az általános kontakt (general contact) opciók. Mind a kettő elég robusztus, hogy számos kétdimenziós feladat esetén megoldáshoz vessenek.

Az alakítási lépést Statikus, általános lépésben (Step) oldottuk meg. A 2. ábra szemlélteti az alkalmazott finom hálót kvadratikusan elemek esetén és a palack alsó részének Huber-Mises-Hencky-féle redukált feszültségeloszlását. Ebben az esetben a keresett alakítóerő-elmozdulás görbét a 3. ábra kék folytonos vonala jelöli. Itt az alakítóerő 2307 N, amely a kísérleti eredményekkel összhangban van.



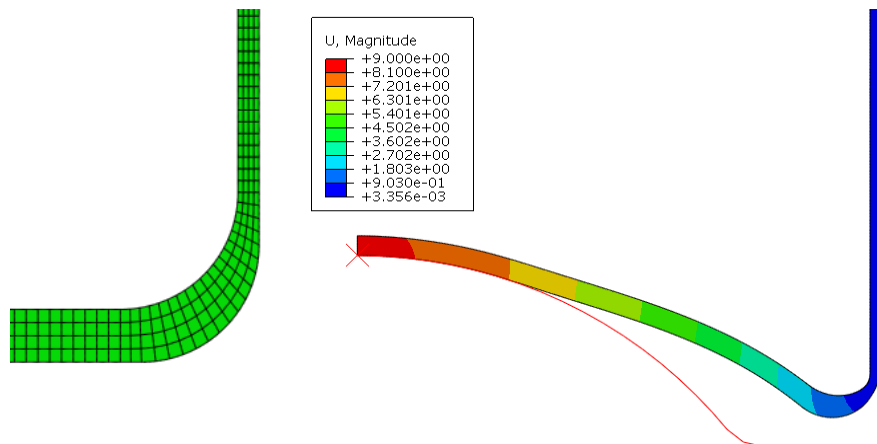
2. ábra. A forgásszimmetrikus kontinuum elemekkel behálózott geometria és a redukált feszültségek eloszlása.

A 2. ábrán látható finom háló (19600 csomópont) mellett megvizsgáltunk több, kevesebb csomópontot tartalmazó és kisebb fokszámú közelítést használó hálót is. A konvergencia vizsgálat végén egy vastagság mentén 4 lineáris elemsort tartalmazó durvább háló (4410 csomópont) mellett maradtunk, mivel az eredmények közötti eltérés elhanyagolható (kevesebb, mint 1%), ahogy az a 3. ábrán is látható, azonban a számítási idő jelentősen lerövidíthető.

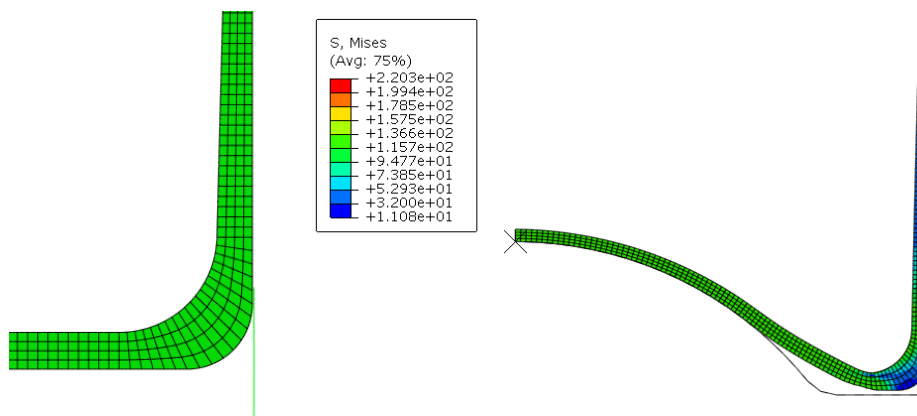


3. ábra. A forgásszimmetrikus kontinuum elemek kapott reakcióerő – elmozdulás görbék.

Az alakítóerőket jelentősen befolyásolják a palack fenékrészének és a palástnak a találkozásánál lévő geometria viszonyok. A lekerekítési rádiuszok és a vastagsági méretek hatását szemlélteti a 4. ábra, ahol három változatot vizsgáltunk. A kiinduló eset mellett vettünk egy 0,9 mm fenékvastagságból 0,36 mm palástvastagságba átmenő $R=2$ mm lekerekítésekkel rendelkező geometriát (4. ábra) és egy $R=1,5$ mm belső és $R=2,4$ mm külső lekerekítésekkel rendelkező (5. ábra) változatot is.



4. ábra. A 2 számú geometria változat és a hozzá tartozó deformált alak az elmozdulásmezővel.

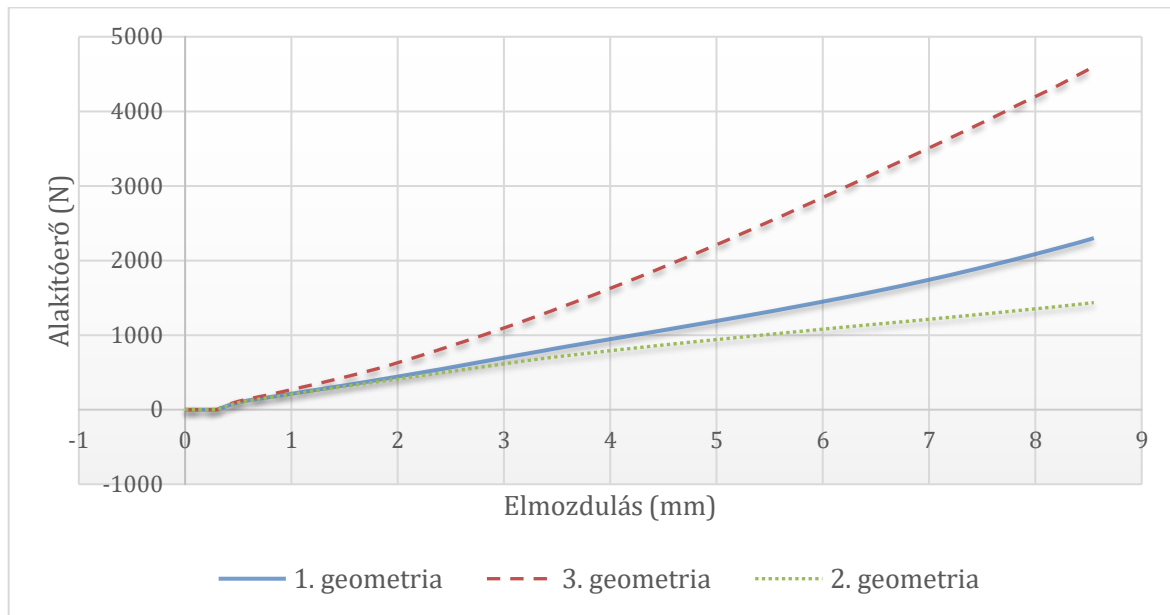


5. ábra. A 3 számú geometria változat és a hozzá tartozó deformált alak a Huber-Mises-Hencky-féle redukált feszültségeloszlással.

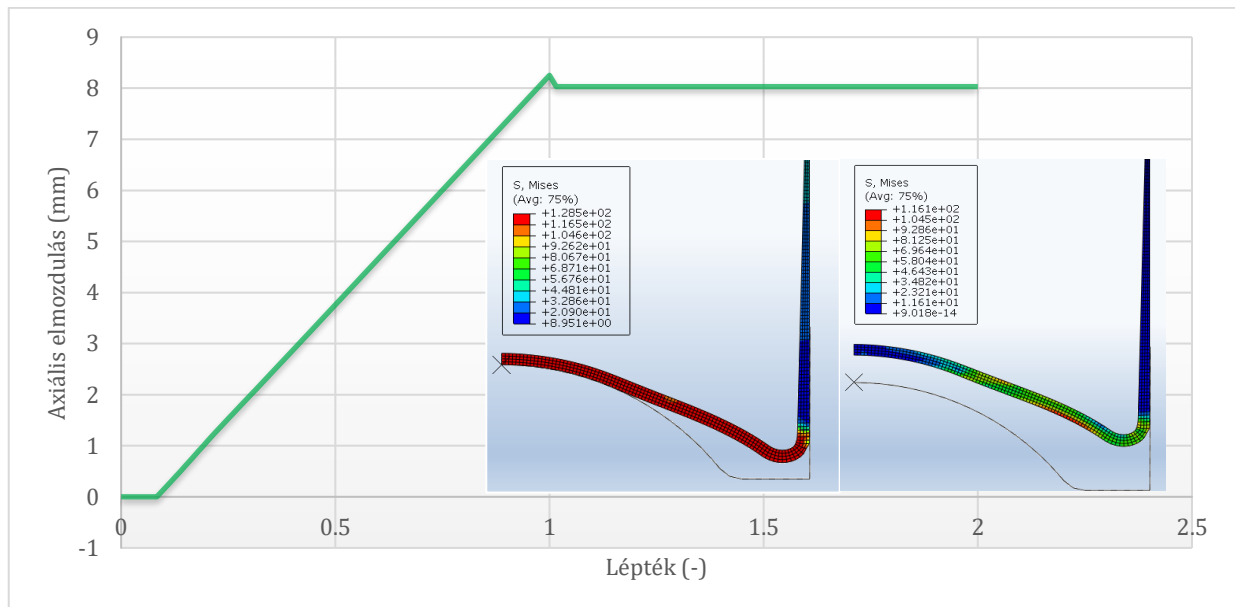
A rádiuszkombinációkhoz tartozó alakítóerő görbéket a 6. ábra szemlélteti. A reakcióerőkben jelentkező nagymértékű eltérés mutatja, hogy a geometria ezen része nagyban befolyásolja az alakítás erőszükségletét és ezáltal a kivitelezhetőségét is az alakítási határállapotának tükrében.

Az Abaqus végelem szoftverben könnyen megvizsgálhatjuk az alakítás utáni visszarugózás jelenségét is. A 7. ábra szemlélteti a kapott eredményeket a palacktalp alsó középpontjának függőleges, axiális irányú elmozdulásának kirajzolásával.

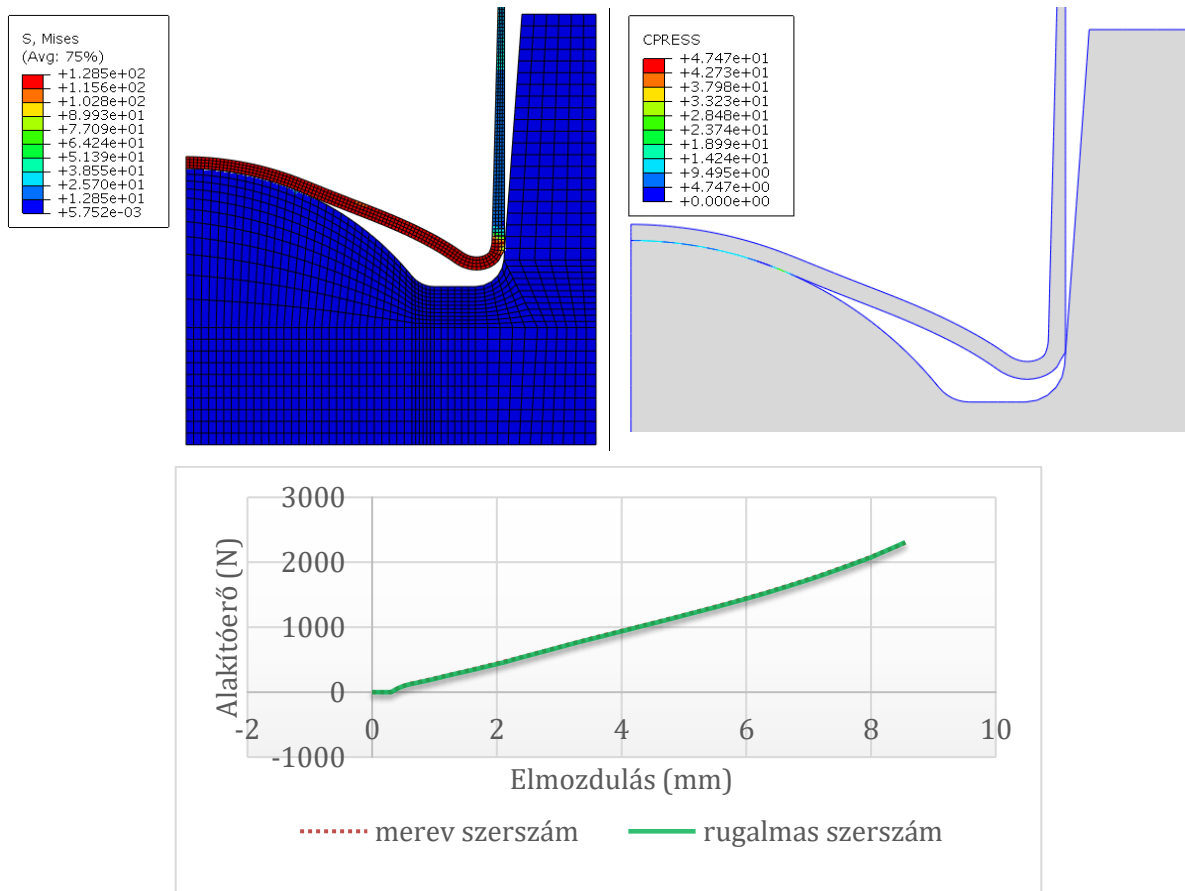
A fenékbenyomás szerszámát az előzőekben merev testként, azon belül is csak egy felületként modelleztük. Megvizsgálhatjuk a szerszámra ható erőket, a kontaktnyomást avagy a kialakuló feszültségeloszlást is. A 8. ábra szemlélteti egy acélból (rugalmassági modulusz 210 MPa, Poisson szám 0,3) készített szerszám feszültségeloszlását és a kontaktnyomást az érintkező felületek mentén. Az alakítóerő görbét összevetve a kiinduló esettel minimális eltérés tapasztalható.



6. ábra. A reakcióerő görbék az egyes geometriai változatok esetén.



7. ábra. A visszarugózás görbéje és a palackban ébredő feszültségeloszlások az alakítószerszám két végállapotában.



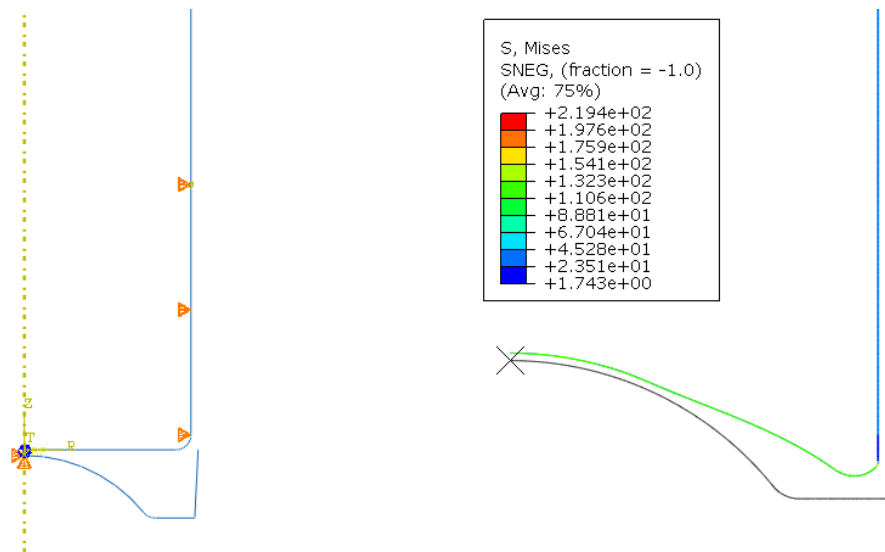
8. ábra. A rugalmas szerszám hatása.

4. Héjelemekkel történő modellezés

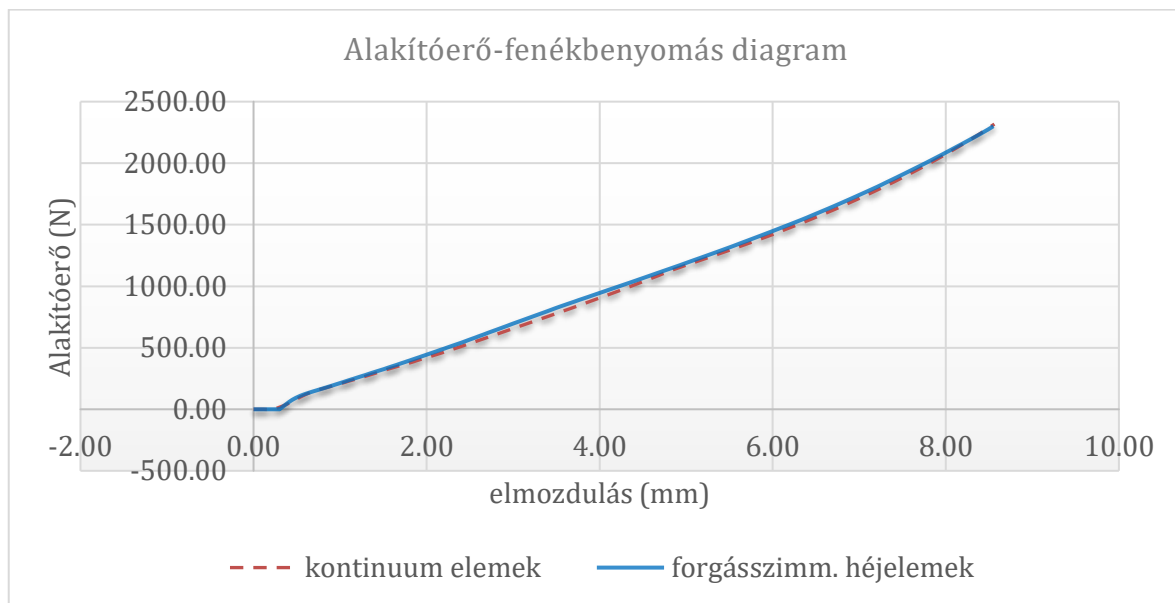
A második esetben a palackot forgásszimmetrikus, kétdimenziós héjelemekkel modellezzük. Ekkor nagyságrendekkel kevesebb elemre és csomópontra van szükségünk, ami által a megoldási idő is töredéke az előző, kontinuum elemeket alkalmazó módszernek. A kezdeti konfiguráció és a deformált geometria a redukált feszültség eloszlásával a 9. ábrán látható.

Az alakítóerő-fenékbenyomás görbék előző, kontinuum elemeket alkalmazó módszer eredményeivel való összevetését tartalmazza a 10. ábra. Jól látható, hogy az eredmények egybeesnek.

A héjelemek alkalmazásának tehát nagy előnye a kisméretű modell és az ebből fakadó gyors megoldási idő, azonban jelentős hátránya, hogy bonyolultabb geometriák (pl. rádiuszviszonyok) esetén nem, vagy csak nehézkesen alkalmazható. Ezen utóbbi megállapítás különösen annak fényében fontos, hogy a geometria a maximális erők és ezáltal a folyamat kivitelezhetősége szempontjából lényeges - amit a 6. ábra is megerősít. Az Abaqus CAE szoftverben rendelkezésünkre áll a héjelemek vastagságának szakaszonként való beállítása és függvényekkel való leírása, azonban ez a leképezés időigényes folyamat, gondoljunk csak a 4. és 5. ábrákon vázolt viszonyokra.

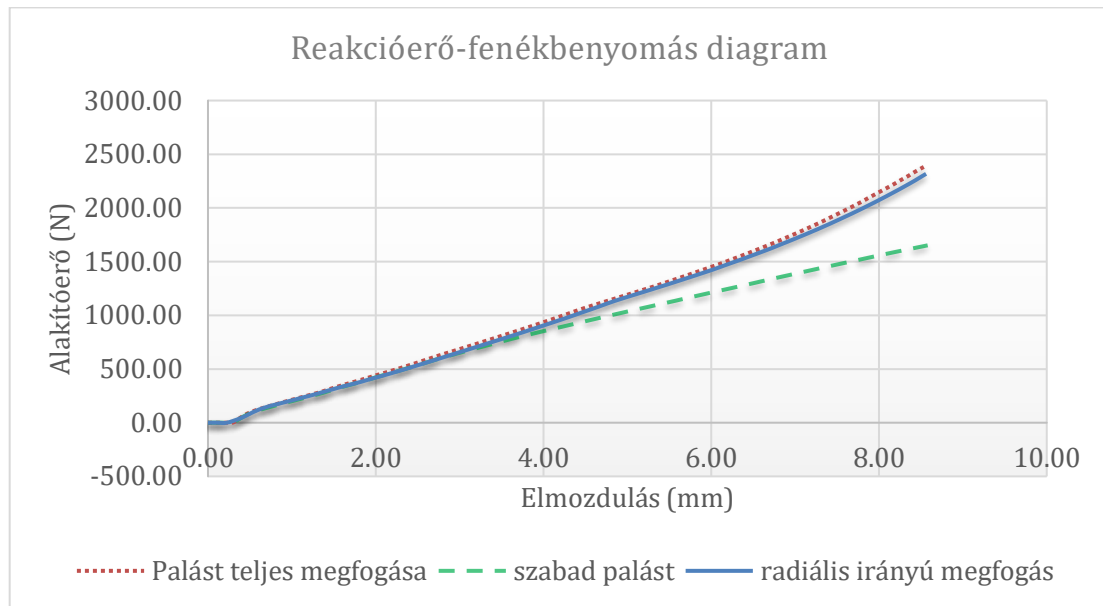


9. ábra. A forgásszimmetrikus héjelem-model és a redukált feszültségeloszlása.



10. ábra. A kontinuum és héjelemek eredményeinek összevetése.

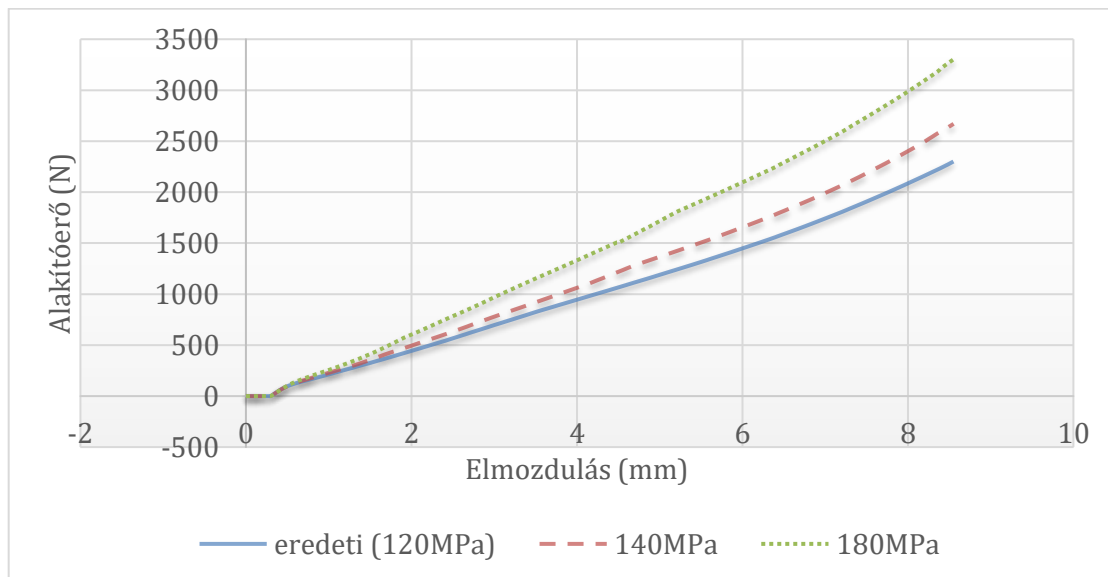
A következő lépésben az alsó, 35 mm magas palástfelület megfogásának hatását vizsgáljuk az alakítóerőkre. Ehhez három peremfeltétel kombinációt tekintünk. Az eredeti, radiális irányú megfogás mellett a teljesen lerögzített palást és a szabadon hagyott (azaz csak felül, a palack szájánál rögzített) eseteket vizsgáljuk. Ezeket szemlélteti a 11. ábra.



11. ábra. A palack befogásának hatása.

Látható, hogy az eredeti és a teljesen megfogott (azaz minden irányú elmozdulást megakadályozó esetek) között minimális, néhány százaléknyi eltérés tapasztalható.

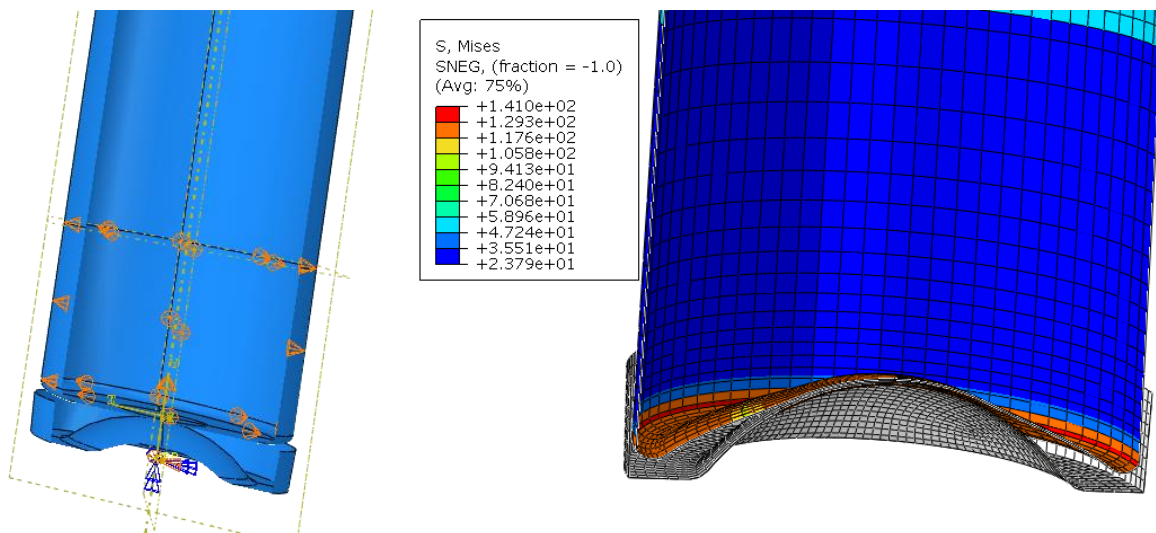
Az anyagi jellemzők közül vizsgáljuk meg a folyáshatár hatását (azaz az előalakítás mértékét) a maximális alakítóerőre. A 12. ábráról leolvasható, hogy a folyáshatár növekedésével (120 MPa, 140 MPa és 180 MPa értékek mellett) a maximális alakítóerő is növekszik.



12. ábra. A folyáshatár hatása a maximális alakítóerőre.

Utolsó lépésben háromdimenziós héjfeladatként kezelnénk a problémát. Ennek oka, hogy ekkor kontinuumelemeket gazdaságosan nem használhatunk, illetve héjszerkezetek alakítási határállapotának meghatározásához nem alkalmazhatunk kétdimenziós, forgásszimmetrikus elemeket a jelenség természetéből fakadóan (Gönczi et al., 2019). Az alakítási határállapothoz, azaz stabilitásvesztéshez tartozó roppantóerő és a fenékbenyomás reakcióerőjének viszonya azonban szintén fontos tervezési adat. Ezek arányából egy biztonsági tényező képezhető, ami a gyártáshoz tartozó selejtarány szempontjából lehet lényeges. Továbbá a megvalósítható geometriára tudunk következtetéseket levonni belőle.

Jelen tanulmány keretein belül nem foglalkozunk a stabilitásvesztés szimulációjával, csak a fenékbenyomáshoz tartozó reakcióerő görbét szeretnénk meghatározni. A 13. ábra szemlélteti a palack háromdimenziós modelljét és annak deformált alakját. Ebben az esetben a kétdimenziós modellhez hasonló elemméreteket használva 4%-kal nagyobb alakítóerőt kapunk, azaz 2420 N értéket.



13. ábra. A háromdimenziós geometria vázlata (metszete) és a háló szemléltetése az eredményekkel.

5. Összefoglalás

A tanulmány a fém csomagolópalackok fenékkialakítási lépésének modellezési lehetőségeit taglalta. Megmutattuk a kereskedelmi végeselem szoftverek hatékonyságát ezen erősen nemlineáris numerikus szimulációk kivitelezése kapcsán. Vizsgáltuk a probléma modellezési lehetőségeit kontinuum- és héjelemekkel, összevetettük őket egymással és kísérleti eredményekkel, felvázoltuk és példákon keresztül szemléltettük az előnyeiket, hátrányaikat és jellemzőiket, felvettük a folyamat leírásához nélkülözhetetlen alakítóerő-fenékbenyomási görbéket. Vizsgáltuk az alakítás utáni visszarugózást, a megfogás hatását a peremfeltételeken és egyéb modellezési megfontolásokon keresztül. Megnéztük a geometria és az anyagjellemzők hatását is. Megállapítottuk, hogy a sarokrádiuszoknak és falvastagságoknak lényegesen befolyásolják a maximális alakítóerőt, ezáltal a palack kivitelezhetőségét.

Irodalom

- [1] Reddy, J. N. (2006). *Theory and analysis of elastic plates and shells*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780849384165>
- [2] Radwanska, M., Stankiewicz, A., Wosatko, A., Pamin, J. (2016). *Plate and shell structures: Selected analytical and finite element solutions*. John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118934531>
- [3] Chapelle, D., Bathe, C. J. (2011). *The finite element analysis of shells - Fundamentals*. 2nd edition, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16408-8>
- [4] Patten, S. (2001). *Design and optimisation of aluminium aerosol cans produced by the back extrusion process*. MPhil thesis, University of Wales, Swansea.
- [5] Lukács, Zs., de Carvalho, L. A., Jemal, E. (2021). Numerical simulation of impact extrusion for pure aluminum aerosol can manufacturing. *GÉP*, 72, 67–70.
- [6] Hardy, S. J., Abdusslam, R. M. (2007). Finite element modelling of the extrusion process for aluminium aerosol cans. *Proc. IMechE, Part L, J. Materials: Design and Applications*, 221, 265–274. <https://doi.org/10.1243/14644207JMDA153>
- [7] Folle, L. F., Nettó, S. E. S., Schaeffer, L. (2008). Analysis of the manufacturing process of beverage cans using aluminum alloy. *Journal of Material Processing Technology*, 205, 347–352. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.249>
- [8] Takeutshi, H. (1993). Numerical simulation technology for lightweight aluminium can. *Journal of Material Processing Technology*, 38, 675–687. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(93\)90043-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(93)90043-6)
- [9] Hardy, S. J., Abdusslam, R. (2007). Finite element modelling of the manufacturing process for aluminium aerosol cans. *Journals of Materials: Design and Applications*, 221(4), 265–274. <https://doi.org/10.1243/14644207JMDA153>
- [10] Belblidia, F., Corft, N., Hardy, S. J., Shakespeare, V., Chambers, R. (2013). Simulation based aerosol can design under pressure and buckling loads and comparison with experimental trials. *Materials and Design*, 52, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.041>
- [11] Gönczi, D. (2020) Finite element investigation in the forming process of aluminium aerosol cans. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, 13(4), 19–22.
- [12] Ceretti, E., Attanasio, A., Fiorentino, A., Giorleo, L., Giardini, C. (2013). Aluminium can shaping by hydroforming: simulative feasibility study and prototype production. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 1797–1807. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4978-x>
- [13] Gönczi, D., Baksa, A., Kiss, L. P. (2019). Alumínium palackok nyakazási lépéseinek és stabilitásvesztésének modellezési sajátosságai. *Multidiszciplináris Tudományok*, 9(2), 56–63. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.2.9>
- [14] Kiss, L. P., Gönczi, D., Baksa, A., Kovács P. Z., Lukács Zs. (2020). Experimental and numerical investigations on the stability of cylindrical shells. *Journal of Engineering Studies and Research*, 26(4), 34–39. <https://doi.org/10.29081/jesr.v26i4.233>
- [15] Kiss, L. P. (2020). The effect of various imperfections on the buckling of aluminium shells. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, 13(1), 49–52.
- [16] Gönczi, D. (2021). Topológiai optimalizálási feladatok alapvető sajátosságai Abaqus vége-seleemes programrendszerben. *Multidiszciplináris Tudományok*, 11(4), 177–187. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.4.22>