

Alumínium palackok alakítási határállapot-szimulációjának előkészítése

Baksa Attila*, Kiss László Péter**, Gönczi Dávid***, Kovács Péter Zoltán****, Lukács Zsolt*****

*, **, ***Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet

****, *****Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet

Miskolc, Magyarország

*mechab@uni-miskolc.hu, **mechkiss@uni-miskolc.hu, ***mechgoda@uni-miskolc.hu

****metkpz@uni-miskolc.hu, *****Lzsolt@kugli.net.uni-miskolc.hu

Összefoglalás - Az alumínium palackok gyártása során az egyik kiemelt kérdés a kiválasztott geometriához tartozó alakítási határállapot és az alakítóerők meghatározása. A csomagolópalack geometriájából kifolyólag héjként modellezendő, és célunk a stabilitásvesztés numerikus szimulációjának kalibrálása a későbbi vizsgálatok előkészítéséhez. A modellt két fázisban validáltuk a modellezni kívánt, gyártásból kivett palack előgyártmány-variánsok kísérleti eredményeit felhasználva. A modellben rugalmas-képlékeny anyagtörvényt alkalmaztunk a lineárisan keményedő alumínium anyagi viselkedésének leírására. Az előírt (tökéletes) geometrián túl foglalkoztunk a gyártási hibákra, azaz imperfekciókra való érzékenységgel is a modellünkben. Nemlineáris stabilitásvizsgálatokat végeztünk a Riks-módszer segítségével talprész nélküli és talprésszel rendelkező palackgeometriák esetén.

Kulcsszavak: alumínium palack, stabilitásvesztés, végeselem, héj.

Abstract - The most critical questions in the production of aluminium cans are the limitations of the forming steps where the loss of stability occurs and the maximum reaction forces during the process. Due to the geometry of these cans, they can be modeled as shells with elasto-plastic linearly hardening constitutive equations. Our main objective was to calibrate the numerical simulations of the forming phases in two steps using experiments conducted on different initial geometries. We dealt with the simulations of ideal shell geometries and investigated the effects of the imperfections and initial stresses on the reaction force – displacement curves. The Riks method was used to tackle the nonlinear stability problems of the aluminium cans.

Keywords: aluminium cans, loss of stability, FEM, shell.

1. BEVEZETÉS

Az alumínium palackok a gyógyszeripartól a kozmetikai iparig számos területen, nagy mennyiségben alkalmazott csomagolóeszközök. Napjainkban azonban új marketing szempontokat figyelembe véve újszerű, összetett geometriák gyártására van szükség. Az új formavilág hatékony tervezéséhez indokolt a palackgyártási technológia kritikus műveleteinek részletesebb numerikus, azon belül is pl. végeselemes szimulációval történő vizsgálata. A modelleket azonban

fontos kísérleti úton kalibrálni, azaz az egyenletrendszer paramétereit beállítani, a módszert validálni. A csomagolópalackok geometriájukból kifolyólag héjként modellezhetők, és számos kérdés felmerül a stabilitásvesztésük leírása kapcsán.

Vékony, hengeres héjak stabilitásvesztésével számos tanulmány foglalkozik, a munkák jelentős része vizsgálja a stabilitásvesztést befolyásoló tényezők, közöttük is a legjelentősebb tényező, a geometriai imperfekciók hatását [1-5]. Ezen cikkek (főként rozsdamentes acélból készült) hengeres héjak horpadásaiból és egyéb gyártási hibáiból származó alakhibák, illetve azok méretének és elhelyezkedésének hatásával foglalkoznak egyszerű geometriájú szerkezeti elemek stabilitásvesztése során. A [6] és [7] cikkek az axiálisan terhelt alumínium palackok (főként üdítőitalos palackok) teherbírásnak végeselemes vizsgálatával foglalkoznak. Belblidia [8, 9] az alumíniumból palackok töltőnyomás alatti viselkedésével és ahhoz kapcsolódó stabilitásvesztésének numerikus szimulációjával foglalkozik.

Az aeroszolos palackok numerikus vizsgálatának kérdéseit taglalja néhány cikk [10-14], amelyek az előállítási folyamat különböző fázisainak egyszerű modellezését vizsgálják, kezdve a pogácsából (mint kiinduló állapotból) való hátrafolyatástól az alakadási fázisok vizsgálatig. Az utolsó tanulmány részletesebben foglalkozik a héjak imperfekcióra való érzékenységgel. A [15] cikk részletesen taglalja a kitézött probléma egyenletrendszerének és megoldási sajátosságainak vizsgálatával.

Jelen cikk az alumínium csomagolópalackok gyártásának végeselemes modellezéséhez kalibrálásával és validálásával foglalkozik, továbbá célul tűztük ki, hogy megvizsgáljuk az alakhibafaktor és anyagi paraméterek, a maradó feszültségek, a lakkréteg és egyéb tényezők hatását a palackok stabilitásvesztésére.

Ezután tekintsük át az aeroszolos palackok gyártásának főbb lépéseit [15]. Az első lépések a képlékeny hidegalakítás, a méretre vágás, a lakkozás és festés, majd a kiégetés. Ezen szakaszok után felmerül számos kérdés, például, hogy a nagy mértékű képlékeny alakítás, majd az azt követő hőkezelés hatására kialakult maradó feszültség, avagy a falvastagság eloszlása, a gyártási hibák milyen mértékben befolyásolják a stabilitásvesztést.

Ezután következik a fő lépés, az alakadás, amely nyakbehúzási és szűkítési-tágítási lépések sorozatából áll. Az ezt végrehajtó célgépet szemlélteti az 1. ábra. Az utolsó lépésekben forgácsolják a palackokat, majd ellenőrzik és csomagolják.

Az aeroszolos palackok anyaga Al99.5 (EN AW 1050) jelű alumínium, amelynek legfontosabb mechanikai jellemzői a rugalmassági modulusz $E=75000$ MPa, a Poisson tényező $\nu=0,33$, a sűrűség $\rho= 2,75 \cdot 10^{-9}$ t/mm³, az egyezményes folyáshatár és a szakítószilárdság, amelyek rendre: 120 MPa és 150 MPa. A modellünkhöz lineárisan keményedő rugalmas-képlékeny anyagmodellt használtunk.



1. ábra: A palack alakítását végző gép

2. A TALP NÉLKÜLI PALACK

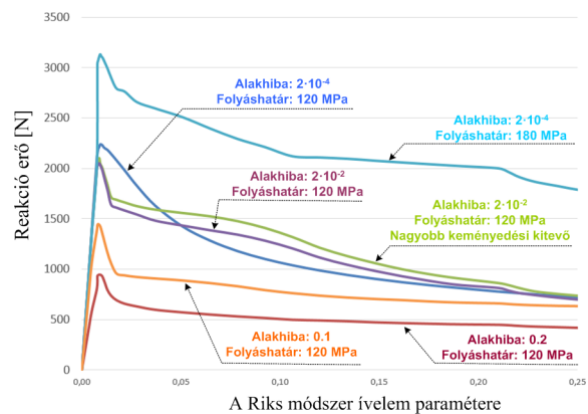
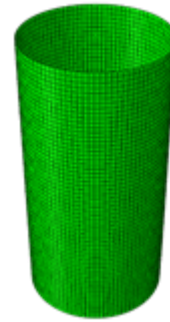
Az első kalibrálási lépésben vettünk egy adott palackgeometriát ($\varnothing 50$ mm), amelyen a főbb paraméterek hatását vizsgáltuk. Az anyagi paramétereket szakítóvizsgálat segítségével határoztuk meg. A palack különböző zónáiból vágunk ki próbatesteket, amelyek diagramjait felvéve adtuk meg a palack egyes zónáiban (partícióiban) az anyagjellemzőket.

A testet az alsó peremén befogtuk, az összenyomást a felső peremén elmozdulással (gyakorlatilag tengelyirányú nyomással) modelleztük. Tehát egyelőre a valódi feladat érintkezési jellegétől (alsó él-síklap) eltekintettünk. Ebben az esetben a roppantóerő, azaz a stabilitásvesztéshez tartozó reakcióerő 4,78 kN nagyságú volt. Ha az alsó peremet nem falaztuk be, csak a tengelyirányú mozgását kötöttük le, akkor a roppantóerő érdemben nem változott az ideális geometria mellett, az értéke 4,71 kN lett. Ezután megvizsgáltuk az alakhibával ellátott palacktestet is.

A modál analízis során igen változatos sajátalakokat kaptunk, amelyek kombinációjával megzavartuk az ideális kezdeti-, geometriai viszonyokat. Ezeknél jellemzően a húzó, hajlító és csavaró lengésképek egyszerre, kapcsolatosan jelentkeznek.

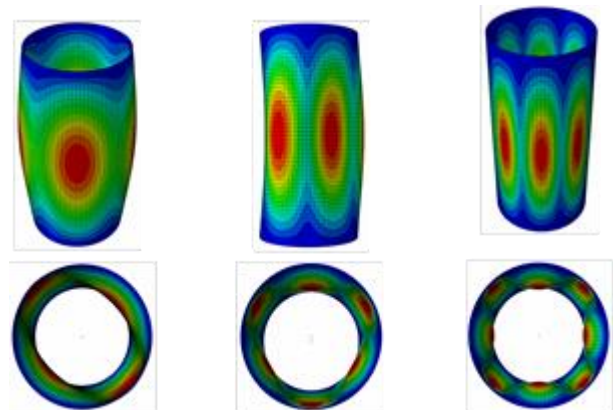
A különféle alakhibákkal (sajátalakokkal) a gyártási tőrésmezőn belül megzavart (skalázott) geometriákon végeztünk stabilitásvizsgálatokat a Riks-módszer segítségével az alakítási határállapotok és roppantóerők megkeresése érdekében. Vizsgáltuk néhány paraméter hatását erre az egyszerű elrendezésre, pl. a folyáshatárt, az alakhiba hatását és a keményedési kitevőt. A végelelemes hálót és az eredményeket mutatja be a 2. ábra. Ahogy az látható, az alakhiba és a folyáshatár nagyban befolyásolja a stabilitásvesztéshez tartozó

reakcióerő nagyságát. Az ideális geometriával összevetve, a roppantóerő – a körülményektől függően – körülbelül feleződött.



2. ábra: A levágott aljú palack végelelemes hálóval leképezett ideális geometriája és a paraméterek hatása a reakcióerőre

Ezek után tekintsünk egy $\varnothing 45 \times 90$ mm hosszúságú, méretre levágott, 0,34 mm-es falvastagságú palackot. Ezt a munkadarabot a hátrafolytatás, a belső felület festése és a hőkezelés utáni állapotában vizsgáltuk és felvettük a roppantóerő-elmozdulás diagramokat. A modál analízis során nyert néhány jellemző sajátalakot mutat a 3. ábra. Az itt látható alakok a valósághoz képest jelentősen fel vannak nagyítva a szemléltetés kedvéért. A különböző színek a különböző mértékű elmozdulásokat jelentenek a lengésképen a kezdeti, forgásszimmetrikus alakhoz viszonyítva (de egységre normálva).



3. ábra: Néhány jellemző skalázott sajátalak

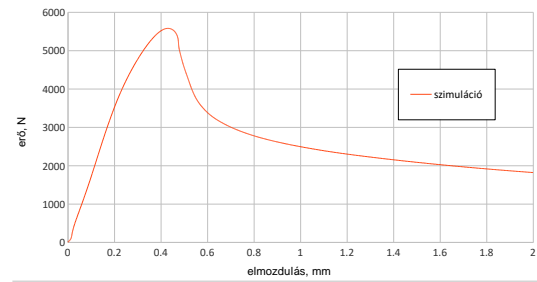
Összhangban a változatos imperfekciókkal, különféle kihajlott alakok adódtak eredményül, mint ahogy annak két esetét a 4. ábra is szemlélteti.



4. ábra: Szimulációs és kísérleti eredmények

A színek jelen esetben a redukált feszültség-eloszlást mutatják meg. A kihajlás minden esetben a folyáshatárnál kisebb feszültségi szinten indult meg. Ez összhangban van azzal a feltevéssel, hogy a rugalmas szakaszban indul meg a stabilitásvesztés. Ezek az eredmények egyezést mutatnak az aeroszolos palackok tömeggyártásánál szerzett tapasztalatokkal, ugyanis a valóságban hasonlóképpen, igen változatos formákban szokott jelentkezni a tönkremenetel. Az előző ábrán megjelenített első palackhoz tartozó alakítóerő-elmozdulás diagramot vázolja az 5. ábra. Az alakhiba faktort ebben az esetben a legyártott palackok geometriájának méréséből kaptuk, a végelemmódszer módszer imperfekciójának skálázási tényezőjét ez alapján állapítottuk meg. Mértünk radiális ütest, körköröségtől való eltérést és egyéb geometriai méreteket, amelyek alapján állapítottuk meg a skálázási faktort.

A maximális alakító erő, aminél bekövetkezik a kihajlás a lokális maximumhoz tartozik és mintegy 5568 N, a vonatkozó elmozdulás (alakítási hossz) pedig 0,442 mm. Megjegyzendő, hogy a 4. ábrán látható alakok nem a kihajlás pillanatában lettek kirajzolva, hanem a szemléltetés céljából jóval később. Egyéb jellegű, túrészmon belüli megzavarásoknál azt tapasztaltuk, hogy a kritikus erő ehhez az értékhez képest mintegy $\pm 12-14\%$ -os eltérést mutat. Ugyanakkor tökéletes geometria modellezésénél a maximális terhelés jóval nagyobb értékre adódott. Illetve fontos kiemelni, hogy kétdimenziós forgásszimmetrikus modellt választva a kihajlott alak forgásszimmetrikus – ilyenkor a tömeggyártás során nem lehet találkozni, tehát a stabilitásvesztés modellezésénél sem fordítunk rá a továbbiakban figyelmet, azonban az alakítóerő közelítéséhez használható.

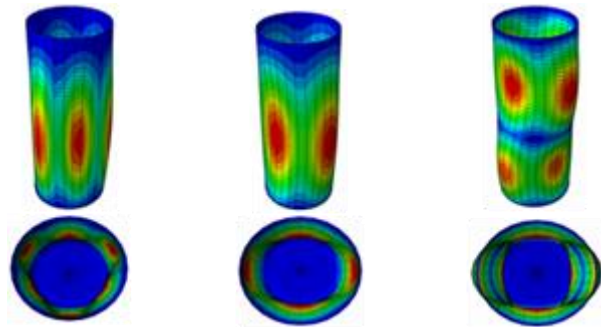


5. ábra: Egy tipikus, szimulációs úton felvett erő-elmozdulás diagram

3. A TALPAS PALACK

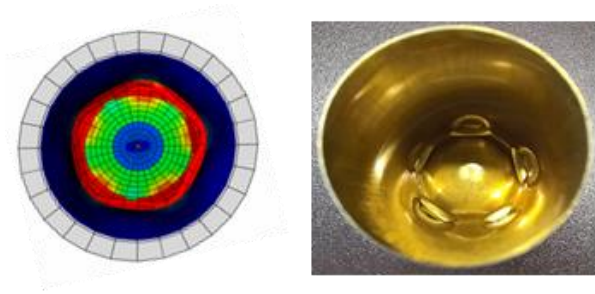
A soron következő szimuláció tárgya az $\text{Ø}45 \times 134$ mm-es palack volt. Itt a fenékrész már nincs levágva, meghagytuk a hátrafolytatás utáni állapotban. Az érintkezés az alsó megtámasztással sík felület mentén történhet. A feladatban tehát megjelenik egy erős nemlinearitás típus, a kontakt. A megoldás lépései egyeznek az előzőekkel.

A 6. ábrán megfigyelhetjük, hogy a talprész meghagyása teljesen eltérő sajátalakokat eredményezett, mint korábban. Ez az alsó rész merevítő hatásának tudható be.



6. ábra: Sajátalakok, amennyiben az alsó rész nincs levágva

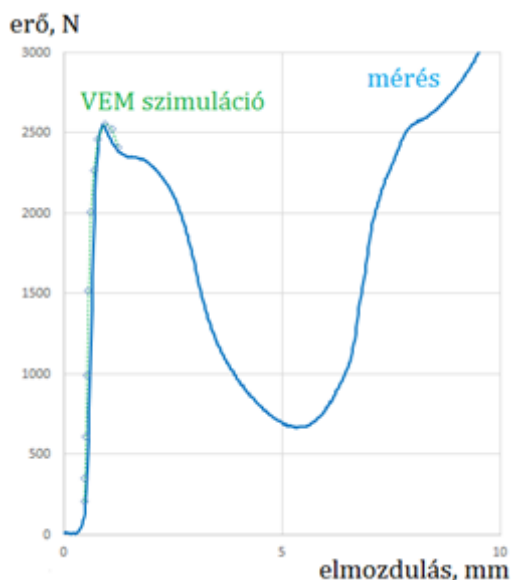
Visszatérve az $\text{Ø}45 \times 134$ -es palackokhoz, kihajlással kapcsolatban az előző feladathoz képest jelentős eltérés, hogy a stabilitásvesztés utáni alak mindig a 7. ábrán látható helyen adódott. Azaz a különböző megzavarásoknak nem volt látható hatása. A kritikus erő is igen hasonlóan alakult a különböző futtatások során (8. ábra), az eltérések minimálisak voltak. Vagyis megállapítható, hogy ez a geometria a talp miatt nem érzékeny a geometriai imperfekciókra. Ezzel együtt a kritikus terhelő erő érezhetően lecsökkent a levágott aljú palackhoz képest, mintegy 2613 N-ra, amit 0,55 mm-es elmozdulásnál lehetett tapasztalni.



7. ábra: A szimulációkkal kapott kihajlás utáni alak és a kísérleti eredmények

Az elvégzett szimulációkat mérésekkel is összevetettük, ezek eredményei is láthatók a 8. ábrán.

Az elkészített hálót konvergencia vizsgálatnak is alávetettük, hogy megállapítsuk az eredmények használhatóságát (főként a feladat hibaanalíziséhez). Ebben az esetben egy finomabb hálót és másodfokú közelítést is vettünk, a reakcióerő jelentősen nem változott. Nyilván a szimulációk futtatása a stabilitásvesztéssel járó limitpont megtalálásáig lesz érdekes a későbbi szimulációs feladat szempontjából, az utána lévő szakasz (post-buckling) számunkra jelenleg nem releváns.



8. ábra: A mérés és a szimulációk összevetése

További fontos észrevétel a mérések során, hogy a lakkozott és lakkozatlan palackok, azaz a bevonathőkezelt és a bevonatlan-hőkezetlen palackok roppantóerői és stabilitásvesztése között nem volt jelentős eltérés. Ebből arra is következtethetünk, hogy a hátrafolyatás során kialakuló kezdeti feszültségállapot hatása minimális a palack stabilitásvesztésére. Fontos azonban megjegyeznünk, hogy az alakítóerőre a lakkozás hatása a súrlódási tényezőkön, és ezáltal a kontakt egyenletekben bekövetkező változáson keresztül jelentkezik.

Ezen lépések után a modell paramétereinek kalibrálása megtörténik, a későbbi, gyártási fázisok vizsgálata a felvett input adatokkal megkezdődhet.

4. ÖSSZEGZÉS

A dolgozat Al99.5 anyagú alumínium csomagolópalackok kezdeti alakadási lépéseinek stabilitásvesztési problémájával foglalkozott. Az aeroszolos palackok talpas és talp nélküli, továbbá lakkozott és lakkozatlan, hátrafolyatás utáni alakítási lépését vizsgáltuk végeelem módszer segítségével. Héjmodelleket és a Riks módszert használtunk a numerikus modell elkészítéséhez. Az alakhibák hatásának vizsgálatához előállítottunk néhány jellemző lengésképet, majd ezek alapján a tökéletes geometriát megzavarva kiszámítottuk a roppantóerőket, azaz a stabilitásvesztéshez tartozó reakcióerőket. Vizsgáltuk különböző paraméterek hatását is, mint például az alaki hibák, az anyagjellemzők avagy a lakkozás, és ezzel együtt a kezdeti feszültségi állapot hatását is. A vizsgált palackokon fizikai kísérleteket is végeztünk a számítások verifikálására. A nyert tapasztalatokat az alakadás többi lépésében tudjuk felhasználni a palackok alakítási határállapotának, és ezzel a legyártható formavilág határainak megállapítására és az alakítóerők számításához.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

"A cikkben/előadásban/tanulmányban ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg."

HIVATKOZÁSOK

- [1] W.T. Koiter (1970). The Stability of Elastic Equilibrium. PhD értekezés, Technische Hooge School at Delft, Delft.
- [2] K.T. Hautala (2003). Buckling reduction factors of stainless steel shell structures. Steel Construction Institute.
- [3] Prabu B., N. Bujjibabu, S. Saravanan, A. Venkatraman (2007). Effect of a dent of different sizes and angles of inclination on buckling strength of a short stainless steel cylindrical shell subjected to uniform axial compression. *Advances in Structural Engineering*, 10(5): 581-591
- [4] B. Prabu, A.V. Raviprakash A. Venkatraman (2009). Neighborhood effect of two short dents on buckling behavior of thin short stainless steel cylindrical shells. *International Journal of Computer Aided Engineering & Technology*, 12.
- [5] P. Bala, A.V. Raviprakash, N. Rathinam (2010). Parametric study on buckling behaviour of thin stainless steel cylindrical shells for circular dent dimensional variations under uniform axial compression. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(4), 134-149.
- [6] D.A. Sawant, M.A. Venkatesh (2016). Buckling and crushing analysis of cylindrical aluminium cans & optimizing the parameters effecting crush strength using fem. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3(6): 3081-3085.
- [7] V. Hegadekatte, Y. Shi (2011). Buckling of beverage cans under axial loading. *Simulia India Regional Users Meeting*.
- [8] F. Belblidia, N. Corft, S.J. Hardy, V. Shakespeare, R. Chambers (2013). Simulation based aerosol can design under pressure and buckling loads and comparison with experimental trials. *Materials and Design*, 52: 214-224.
- [9] F. Belblidia, N. Corft, S.J. Hardy, D.C. Bould, J. Sienz (2014). Aerosol cans under pressure and buckling loads. *Sustainable Design and Manufacturing*, 1, 13-17.

- [10] S.J. Hardy, R. Abdusslam (2007). Finite element modelling of the manufacturing process for aluminium aerosol cans. *Journal of materials: Design and Applications*, 221(4), 265-274.
- [11] E. Ceretti, A. Attanasio, A. Fiorentino, L. Giorleo, C. Giardini (2013). Aluminium can shaping by hydroforming: simulative feasibility study and prototype production. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 1797-1807.
- [12] L.F. Folle, S.E.S. Netto, L. Schaeffer (2008). Analysis of the manufacturing process of beverage cans using aluminum alloy. *Journal of Material Processing Technology*, 205, 347-352.
- [13] E. Ceretti, C. Giardini, A. Attanasio (2005). Comparison between simulative and experimental results of necking operations on aluminium can. *Archive of IRIS*, 12.
- [14] T. Chen (2014). On Introducing Imperfection in the Non-Linear Analysis of Buckling of Thin Shell Structures. Delft University of Technology Delft, the Netherlands.
- [15] Gönczi, D., Baksa, A., Kiss, L. P.(2019): Alumínium palackok nyakazási lépéseinek és stabilitásvesztésének modellezési sajátosságai. *Multidiszciplináris Tudományok*, 9(2), 56-63.