

HENGERES CSÉSZÉK MÉLYHÚZÁSOKOR FELLÉPŐ RÁNCOSODÁS BECSLÉSÉNEK ELMÉLETI MÓDSZEREI

THEORETICAL ESTIMATION METHODS ON THE WRINKLING OF CYLINDRICAL DEEP DRAWN CUPS

Béres Gábor^{1*}, Tisza Miklós²

¹Anyagtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

²Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolci Egyetem, Magyarország

Kulcsszavak:

mélyhúzás
hengeres csésze
rāncosodás

Keywords:

deep drawing
axisymmetric cup
wrinkling

Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember
11.
Átdolgozva 2018. október 25.
Elfogadva 2019. március 14.

Összefoglalás

A cikkben, hengeres csészék mélyhúzásakor fellépő ráncosodás jelenségének becslésére szolgáló elméleti módszerekről olvashatunk. A ráncosodás (ráncképződés), a lemezalkatrészek tönkremenetelének második leggyakoribb okozója, a lemez szakadása után. Mérnöki és technológusi szinten is komoly kihívásokat jelent olyan alakító technológiák kidolgozása, melyek egyrészt megakadályozzák a lemez ráncosodását, másrészt ezzel nem kényszerítik ki a lemez idő előtti szakadását. A cikkben bemutatjuk, a napjainkban legelterjedtebben használt elméleti módszerek alapjait, alap feltevéseit, alapegyenleteit. Kihangsúlyozásra kerül, az elsőként Hill által megfogalmazott, majd Hutchinson által tovább-fejlesztett, úgynevezett „bifurcation” módszer és az energia-alapú módszer is. Az áttekintésből természetesen nem hiányozhatnak a véges elemes technikák sem, melyek közül jelen esetben, az AutoForm szoftver megoldásaiba nyерhetünk betekintést.

Abstract

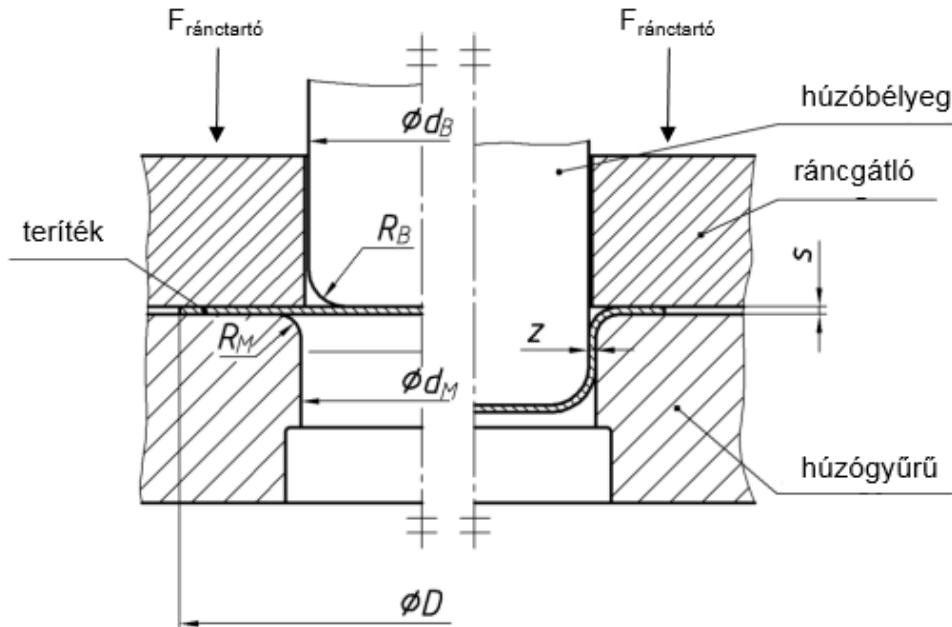
This study presents the theoretical methods for the estimation of wrinkling of cylindrical deep drawn cups. Wrinkling is regarded as the second most frequent failure reason after splitting, in sheet metal industry. Carrying out such forming processes, which are able to eliminate undesirable wrinkling and do not force the early disruption of the blank in the same time, is still a serious challenge for both engineers and technologists. This paper deals with the basic assumptions and equations of recently widely applied theoretical evaluating methods. Hill's bifurcation criterion - later further developed by Hutchinson -, and the energy-based method are primarily highlighted. In the field of finite element techniques, the solutions get by the AutoForm software are described in details.

1. Bevezetés

Mélyhúzás során jellemzően vékony falú, üreges testet állítunk elő, egy sík lemeznek, az ún. terítéknek a húzógyűrűn történő áthúzása, vagy egyéb tetszőleges alakú húzószerszámba történő

1* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 76/516-377
E-mail cím: beres.gabor@gamf.uni-neumann.hu

préselése folytán. A kiinduló sík teríték kerületi részeit a legtöbb esetben, egy úgynevezett ráncgátló szerszám segítségével a húzógyűrű - vagy egyéb húzószerszám - homlokfelületére szorítjuk, míg a teríték középső részeit a bélyeg alakítja a kívánt alakra. A folyamat során, a teríték pereméről az anyagot a bélyeg, a húzógyűrűbe/szerszámba húzza, így a gyártandó munkadarab mélysége egyre nő. A lemezvastagság, a mélyhúzott darab egyes részein, bár kis mértékben ámde sok esetben ismert módon változik a húzóművelet hatására, mégis a gyakorlati egyszerűsítések többnyire állandó lemezvastagságot tételeznek fel a munkadarab egészére [1]. Ez a közelítés természetesen, csak egyszerűbb darabok mélyhúzása esetén állja meg vita nélkül a helyét. A lemezvastagság változására szemléletes példákat találunk a [2, 3, 4] irodalmakban. A mélyhúzás elvi ábráját az 1. ábra szemlélteti.

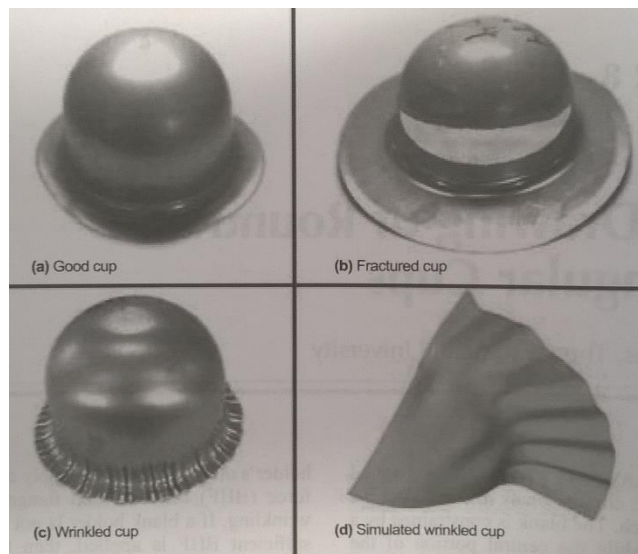


1. ábra: A mélyhúzás elvi ábrája [4]

A mélyhúzási folyamat végezhető egyszeres és kettős működésű prégépeken is. A NJE-GAMF Anyagtechnológia Tanszékén, egy kettős működésű Erichsen-142 típusú hidraulikus lemezvizsgáló berendezés áll a rendelkezésünkre, mely kezelése során külön-külön működtethető a ráncgátló szerszám és a bélyeg mozgása.

A mélyhúzási műveletben résztvevő alkatrész egyik legkritikusabb része a darab pereme, amelyet egyszerre terhel tangenciális (érintő) irányú nyomófeszültség és radiális irányú húzófeszültség. A bonyolult feszültségi állapot következtében, a geometriai viszonyok és az anyagjellemzők függvényében a teríték ráncosodhat. Ennek megakadályozása érdekében szükséges a ráncgátló szerszám használata, mely az előbb jellemzett feszültségi állapotot, a saját maga által kifejtett ráncgátló nyomással (az 1. ábrán függőleges irányú nyomófeszültséggel) tovább bonyolítja. A ráncgátló szerszám, és így az alkalmazott ráncgátló nyomás fő feladata a teríték-peremrész ráncosodásának megakadályozása. Ez egyrészt az axiális irányú nyomófeszültséggel, másrészt pedig a súrlódás útján történik. Előbbi, egyszerűen gátolja a peremrésznek, a lemezteríték síkjából való kitérését, utóbbi pedig nehezíti a perem behúzóását a húzógyűrűbe/szerszámba, így növelve a radiális irányú húzófeszültséget, mely részben szintén a ráncosodás ellen hat. A nem elégséges ráncgátló erő (vagy a perem felületére vonatkoztatott ráncgátló nyomás) a munkadarab peremének ráncosodását, míg a túl nagy ráncgátló erő a munkadarab idő előtti szakadását eredményezheti. A 2. ábra (a) – (c) képe mélyhúzással gyártott hengeres csészéket mutat, melyeken megfigyelhető a ráncosodás (c) és a szakadás (b) jelensége is. A (d) ábrarészleten egy véges elemes szimuláció eredménye látható, a peremén ráncosodott

egynegyed csészével (a szimmetria miatt elegendő mindössze a munkadarab egynegyed részének vizsgálata) [1].

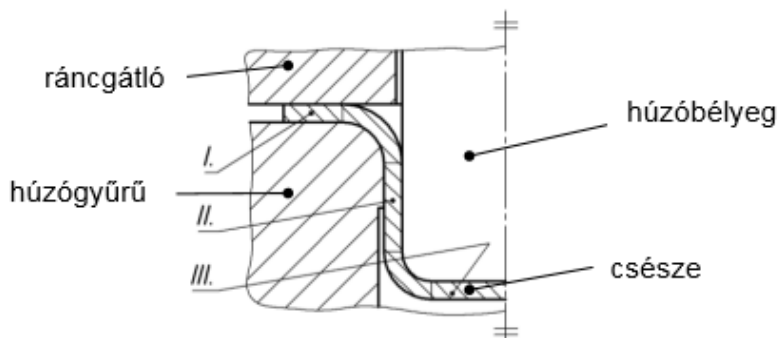


2. ábra: Kísérleti (a), (b), (c) és szimulációs úton előállított mélyhúzott csészék [1]

2. Alakváltozás a mélyhúzás során

A mélyhúzott darab ráncosodásának mélyebb megértése érdekében, előbb tekintsük át, hogy milyen alakváltozási állapotok és erőtani viszonyok uralkodnak a mélyhúzási folyamat során. A mélyhúzás ugyanis, az egyik legbonyolultabb, gyakran alkalmazott lemezalakító művelet, így a lemez alakváltozása a darab egyes részein, nem minden esetben magától értetődő.

Egy jellemző, hengeres mélyhúzott csésze a következő részekre és alakváltozási állapotok szerint bontható fel (3. ábra):



3. ábra: Hengeres csésze mélyhúzásának elvi vázlata és a különböző alakváltozási állapotokkal bíró szakaszok [4]

I szakasz: a peremrész. A képlékeny alakváltozás legnagyobb részben a darab peremén játszódik le, melyet radiális irányú húzó, és tangenciális, illetve tengely irányú nyomófeszültség terhel – ahol a tengely irány a mélyhúzó bélyeg szimmetria tengelyével párhuzamos. Ahogy a bélyeg a folyamat során egyre több és több anyagrészt húz be a húzógyűrűbe, a perem átmérője csökken, ami a perem ráncosodásával és/vagy vastagodásával járhat. Szintén a bélyeg mozgása folytán, a húzószerszám lekerekítéséhez közel lévő lemezrészek viszont vékonyodnak, ami nem egyenletes lemezvastagsághoz és ráncgátló nyomáshoz vezethet [1].

I és II közötti szakasz: a húzószerszám lekerekítési sugarával érintkező anyagrészek. A ráncgátló szorításából kiszabaduló lemezrész a húzószerszám lekerekítési sugarán hajlításnak van kitéve, majd a rádiust elhagyva újra kiegyenesedik. A feszültségi állapot itt radiális húzásnak, és a hajlításra jellemző állapotnak felel meg. Túl kicsi lekerekítési sugár a lemez szakadását idézheti elő,

míg túl nagy sugár esetén csökkenhet a munkadarab mélysége. A lekerekítési sugár optimális értékére, szabványok, szakirodalmak tesznek ajánlásokat [4,5].

II szakasz: a csésze fala. A csésze fala tisztán húzó feszültségi állapotban van, mind a radiális, mind pedig az érintő irányt illetően. Amennyiben a bélyeg és a húzószerszám közötti húzóérés elegendően nagy, úgy a fal is képes a peremrészre jellemző ráncosodáshoz hasonlóan hullámosodni, melyet az angol nyelvű szakirodalom „puckering” –nek nevez [1]. (Bizonyos esetekben ettől eltérően, például a karosszéria elemek préselésénél az angol szakirodalom „buckling”-nak nevezi mindazon ráncokat, melyek nem a ráncgátló szerszám és a húzószerszám közötti összeszorított részben, tehát nem az alkatrész peremén alakulnak ki [6].) Az optimálisnál kisebb húzóérés viszont a lemez vasalását eredményezi. Az optimális húzóérés értékére a szakirodalomban találunk ajánlásokat, például Oehler és Kaiser könyvében [7], miszerint az az acélokra a következő képpen számítható:

$$u_{opt} = s_0 + 0,07 \cdot \sqrt{10} \cdot s_0 \quad (1)$$

ahol s_0 a kiinduló terítékvastagság.

A bélyeg által kifejtett húzóerőt, a csésze fenekéről a csésze falának kell továbbítania a fő alakváltozási zónába, ami a peremrész. A húzószerszám lekerekítési sugarán történő hajlítás majd kiegyenesítés következtében megnövekedett szilárdságú fal, az ebben a szakaszban fennálló húzófeszültség hatására már tovább képlékenyen nem alakváltozhat, mert az a csésze szakadását jelentené.

II és III közötti szakasz: a bélyeg lekerekítési sugarával érintkező anyagrészek, melyek hajlító igénybevételnek és radiális irányú húzásnak vannak kitéve a folyamat során. Mivel az itt jelenlévő anyagrészek nem mennek át olyan mértékű alakítási keményedésen, mint a csésze falát alkotó – és korábban a húzószerszám lekerekítési sugarán meghajlított majd kiegyenesedett – lemezrész, a csésze szakadása elsősorban itt várható.

III szakasz: csésze fenékrész. Az itt található anyagrészek a súrlódás miatt, kedvező esetben, tulajdonképpen közel nulla képlékeny alakváltozáson esnek át. Az [1] irodalom kifejezetten javasolja az LDR növelése érdekében a súrlódás növelését a húzóbélyeg/munkadarab határfelületén, és ezzel egy időben a súrlódás csökkentését a lemez/húzógyűrű érintkezési felületeken. Az LDR a „Limit Drawing Ratio” kifejezéseket összeolvasztó betűszó, jelentése „határ húzási viszony”, mely annak a legnagyobb kiinduló terítékátmérőnek, amelyből még a csésze szakadás nélkül kihúzható, és a magának a csésze közepes átmérőjének a hányadosát jelenti, hengeres csészek mélyhúzása esetén. A súrlódást több tényező is befolyásolhatja, például a szerszámelemek felületi jellemzői, vagy a ráncgátló erő. A mélyhúzás során a Coulomb-féle súrlódási tényező értéke, jellemzően 0,04 és 0,10 között mozog megfelelő kenési feltételek esetén az [1] leírása alapján.

3. A mélyhúzott alkatrészek ráncosodása

A mélyhúzott terítékek ráncosodását, a fentiek tükrében, a teríték peremén - a radiális húzófeszültség (σ_1) okozta átmérőcsökkenés következtében - ébredő tangenciális irányú nyomófeszültség ($-\sigma_2$) okozza (4. ábra). Már korai kísérletek rámutattak, hogy a ráncosodási hajlamot az anyagtulajdonságok és geometriai paraméterek befolyásolják elsősorban. Ez a két tényező, a ráncosodás megindulásához szükséges kritikus feszültség becslésére szolgáló, első félempirikus képletben is szerepel, amely Geckelertől származik még 1928-ból [8]. Elmélete szerint a σ_c kritikus, ráncosodást okozó feszültség a

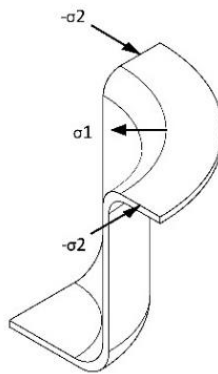
$$\sigma_c = 0,46 \cdot \frac{E_0 t^2}{W^2} \quad (2)$$

egyenlet szerint alakul, melyben t a lemezvastagság, W a közepes peremszélesség (azaz $W = R - r_M$, ha R a teríték külső sugara, r_M pedig a húzógyűrű belső sugara (ld. 1. ábra)), és E_0 a ráncosodási modulus. A ráncosodási modulusot Ramberg és Osgood [9] a következőképpen definiálta:

$$E_0 = \frac{4E_p E}{(\sqrt{E_p} + \sqrt{E})^2} \quad (3)$$

mely egyenletben E a rugalmassági (Young) modulus, E_p pedig a képlékenységi modulus (4). Utóbbi paraméter a valódi feszültség ($\bar{\sigma}$) valódi alakváltozás ($\bar{\varepsilon}$) diagram, egy adott pontjához tartozó érintő meredeksége, mely így a görbe mentén folyamatosan változik, és ezzel egy konkrét értékének meghatározása nehézségekbe ütközik. Ennek ellenére, a napjainkban használatos analitikus elméletek mind figyelembe veszik a ráncosodási modulusot, és ezáltal a képlékenységi modulusot is, bár azok sok esetben tökéletesen képlékeny anyagot tételeznek fel, aminek következtében az E_p állandó értékűnek vehető.

$$E_p = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} \quad (4)$$



4. ábra: A mélyhúzott csésze peremén uralkodó feszültségi állapot [6]

A gyakorlatban a ráncképződés eredményesen megakadályozható a ráncgátló szerszám és a megfelelően megválasztott ráncgátló erő (ráncgátló nyomás) alkalmazásával. Siebel [10] szerint az optimális ráncgátló nyomás (p_{BH}) értéke a

$$p_{BH} = 10^{-3} \cdot c \cdot \left[(DR - 1)^3 + \frac{0,005d_0}{s_0} \right] \sigma_u \quad (5)$$

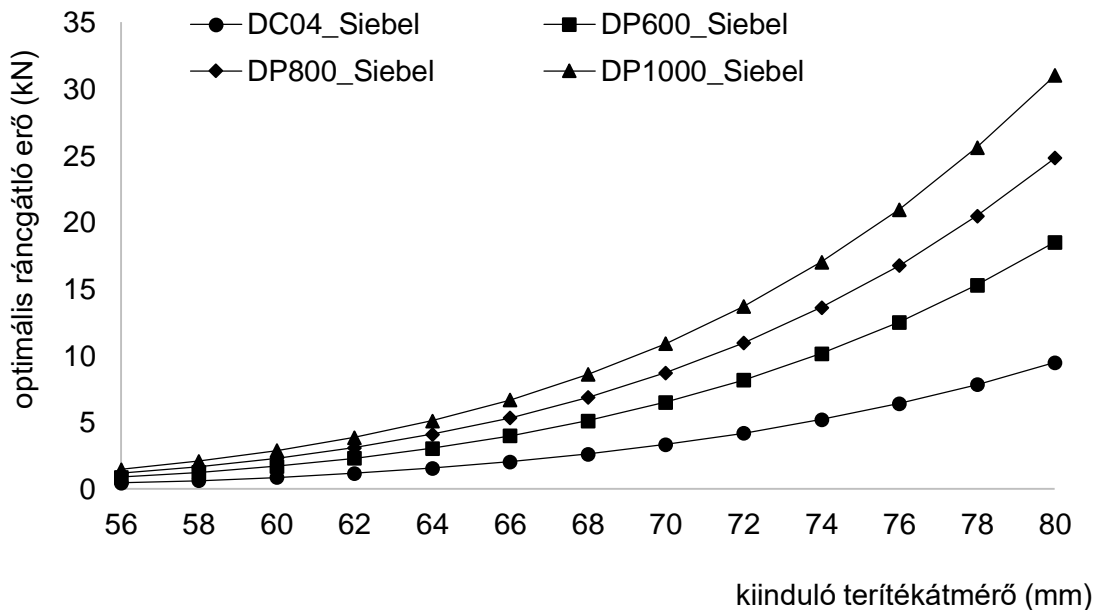
kifejezéssel becsülhető, és így a ráncgátló erő (F_{BH}) az

$$F_{BH} = p_{BH} \cdot A_{BH} \quad (6)$$

formában adható meg. Az egyenletekben s_0 a kiinduló teríték vastagság, d_0 a kiinduló teríték átmérő, c egy tapasztalati alapokon nyugvó tényező, értéke 2 és 3 között változhat, σ_u a lemezanyag szakítószilárdsága, DR a húzási viszony (terítékátmérő/csésze átmérő), illetve A_{BH} a lemez ráncgátló alatti területe. Az egyenletből látszódik, hogy ahogy a d/s viszony növekszik, úgy növekszik a ráncok kialakulásának veszélye is, és ezzel növekszik az azok megakadályozásához szükséges ráncgátló nyomás is. Ez összhangban van Geckerel elméletével (2), melyben a ráncok kialakulásához szükséges kritikus feszültség a lemezvastagsággal növekszik, a terítékátmérővel arányosan pedig csökken, tehát a nagyobb terítékátmérő és a kisebb lemezvastagság kedvez a ráncok kialakulásának. A fenti egyenletekből az is megállapítható, hogy a mélyhúzási folyamat során egyre csökkenő terítékátmérő stabil állapotban tartásához, azonos lemezvastagság mellett, egyre kisebb ráncgátló erő is elegendő. Ez magyarázza, a mélyhúzási folyamat alatt időben változó ráncgátló nyomás alkalmazását, melyre példát találunk a [1,11] irodalmakban.

Az 5. ábrán, a Siebel-egyenlet felhasználásával szerkesztett diagramok láthatók, járműipari, jól mélyhúzható DC04 és különböző növelt szilárdságú DP-s anyagok optimális ráncgátló erőszükségletére vonatkozóan. A geometriai tényező mellett, a ráncosodás illetve annak akadályozása terén másik fontos szerepet játszó tényező, a lemezanyag szilárdságának hatása is szemléletesen nyomon követhető az ábrán. Mindemellett megjegyzendő, hogy a gyakorlatban, egy

adott terítékátmérő/lemezvastagság viszonyszámhoz, nem csupán egy konkrét ráncgátló erő/nyomás érték tartozik, hanem létezik egy tágabb technológiai ablak, amelyben a mélyhúzás megvalósítható.



5. ábra: A Siebel-egyenlet felhasználásával szerkesztett optimális ráncgátló erő diagramok, különböző anyagminőségek és terítékátmérők esetén

3.1. Az úgynevezett „bifurcation” módszer

A „bifurcation” szó a Hill [12] által, rugalmas-képlékeny anyagokra általánosan kidolgozott elméletből származik („theory of bifurcation in elastic-plastic solids”). Jelentése szétválás, kettéválás, de igazából, itt nem ebben az értelmezésben használatos. Az elméletet Hutchinson és Neale [13] fejlesztette tovább és javasolta ráncosodási folyamatok vizsgálatához. Ez alapján a ráncosodás akkor következik be, ha a „bifurcation” funkcionál (F) értéke zérus.

$$F = \iint (M_{ij}\kappa_{ij} + N_{ij}\varepsilon_{ij}^0 + N_{ij}w_{,i}w_{,j}) dS \quad (7)$$

A funkcionálban w a ráncosodással járó és egyben az adott helykoordinátától (r, θ) függő elmozdulás-vektor a csésze peremrészén, M_{ij} az egységnyi szélességre eső hajlítófeszültségek tenzora, κ_{ij} a hajlítással járó alakváltozási tenzor, N_{ij} a membrán (síkban ható) feszültségek tenzora, ε_{ij}^0 a nyújtási alakváltozási tenzor, és S jelenti a lemez (vagy héj) elem középfelületének azon részét, amelyen a ráncosodás bekövetkezik. Az egyenlet jobb oldalának első tagja a hajlító (ha $i=j$), vagy a csavaró (ha $i \neq j$) feszültségek munkája, a második a membrán feszültségek által okozott alakváltozások munkája, míg a harmadik tag úgy értelmezhető, mint a lemez középfelületén működő sík-feszültségi tagok munkája. Ha egy kinematikailag lehetséges u, v, w elmozdulás-mező esetén $F > 0$, akkor ráncosodás nem jöhet létre, mivel a ráncok megjelenése a rendszer potenciális energiáját növelné, ami termodinamikailag nem lehetséges. Tehát az $F=0$ feltétel tartozik a ráncosodás bekövetkezéséhez, egy nem nulla elmozdulás-mező esetén.

Az elmozdulás-mező leírására több irodalom [16,17,18] egységesen a

$$w(r, \theta) = c(r - r_M)(1 + \cos n\theta) \quad (8)$$

formulát alkalmazza, amelyben c egy konstans, n a ráncok (hullámok) száma, r és θ pedig az adott pont helykoordinátái. A [15] ettől eltérő módon adja meg az elmozdulás mező leírását, de ott az a csésze falának ráncosodására, és nem a perem ráncosodására vonatkozik.

A funkcionált legtöbb esetben numerikus módszerekkel integrálják (pl. [14,15]), de van példa az irodalomban analitikus megoldásra is. Bizonyos egyszerűsítő feltételek mellett (kétdimenziós ráncosodási modell) M. Kadkhodayan és F. Moayyedian [16] zárt alakú megoldást dolgozott ki a „bifurcation” módszer funkcionáljából kiindulva. Elméletük szerint, hengeres csésze mélyhúzásakor a ráncosodás akkor következik be izotróp, tökéletesen képlékeny anyag feltételezése és a Tresca-féle folyási feltétel felhasználása esetén, egyrészt ha fennáll a feszültségekre (σ), hogy

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \bar{\sigma} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) > 0 \text{ és} \\ \sigma_\theta &= \bar{\sigma} \cdot \left[\ln\left(\frac{R}{r}\right) - 1\right] < 0\end{aligned}\quad (9)$$

másrészt ha a

$$\sqrt{\left(\frac{E}{\bar{\sigma}}\right)} \cdot \frac{t}{R} < \sqrt{-3(1-\nu^2) \frac{H^{ep}(m,n)}{\frac{G^{ep}(m,n,\nu)}{4} + \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \psi_{1+m}^{1-m}}}}\quad (10)$$

kifejezés teljesül. Az egyenletekben R a teríték külső sugara, r a vizsgált pont sugara, θ pedig a vizsgált pont szöge a hengerkoordináta rendszerben. A (10) összefüggésben

$$m = \frac{r}{R}\quad (11)$$

a H^{ep} és a G^{ep} az m paramétertől, a kialakuló ráncok számától (n) és a Poisson-tényezőtől (ν) függő tényezők. Mivel m , a húzás folyamán bármelyik tetszőleges időpillanatban ismert, ν pedig fémekre, a képlékeny alakváltozás tartományában jó közelítéssel 0,5-nek vehető, a ráncok számának (n) függvényében H^{ep} és G^{ep} a [16]-ban leírtak alapján számolható. A különböző feltételek mellett várható n értékére, a [16] cikkben találunk utalásokat.

A (10) összefüggésben a ψ jelenti a ráncgátló hatását, amelyet rugós működtetésű ráncgátlóra a szerzők, a

$$\psi = \frac{S}{D}\quad (12)$$

formában adnak meg, ahol

$$S = k\pi \cdot (R^2 - r_M^2)\quad (13)$$

amelyben k a ráncgátló rugómerevségi együtthatója, illetve D a rugalmas hajlító merevség:

$$D = \frac{E_0 t^3}{12(1-\nu^2)} \approx \frac{E_0 t^3}{9}\quad (14)$$

A képlékeny alakváltozás szilárdságnövelő hatását a

$$\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n\quad (15)$$

egyenlettel figyelembe véve, és azt mindig az adott $\bar{\varepsilon}$ alakváltozásokhoz tartozónak tekintve, és így a D értékét is az adott alakváltozás függvényében változóként kezelve, a (11) – (17) egyenleteknek a (10)-be történő behelyettesítésével szerkesztett diagramokat mutat a 6. ábra. Az ábrán szürke vonallal jeleztük a (10) egyenlet jobb oldalának értékeit különböző ráncgátló rugómerevségi együtthatókra vonatkozóan (N/mm), míg fekete folytonos vonal mutatja a (10) baloldalának értékeit a mélyhúzási folyamat előrehaladtával, $\varnothing 74$ mm-es kiinduló teríték méret esetén ($1-r/R = 0,39$), DC04 anyagra. Az ábrából az látható, hogy ekkora átmérőnél biztosan számíthatunk ráncosodásra a mélyhúzás kezdetén, amennyiben a ráncgátló rugómerevségi együtthatója nem éri el legalább az 50 N/mm értéket.

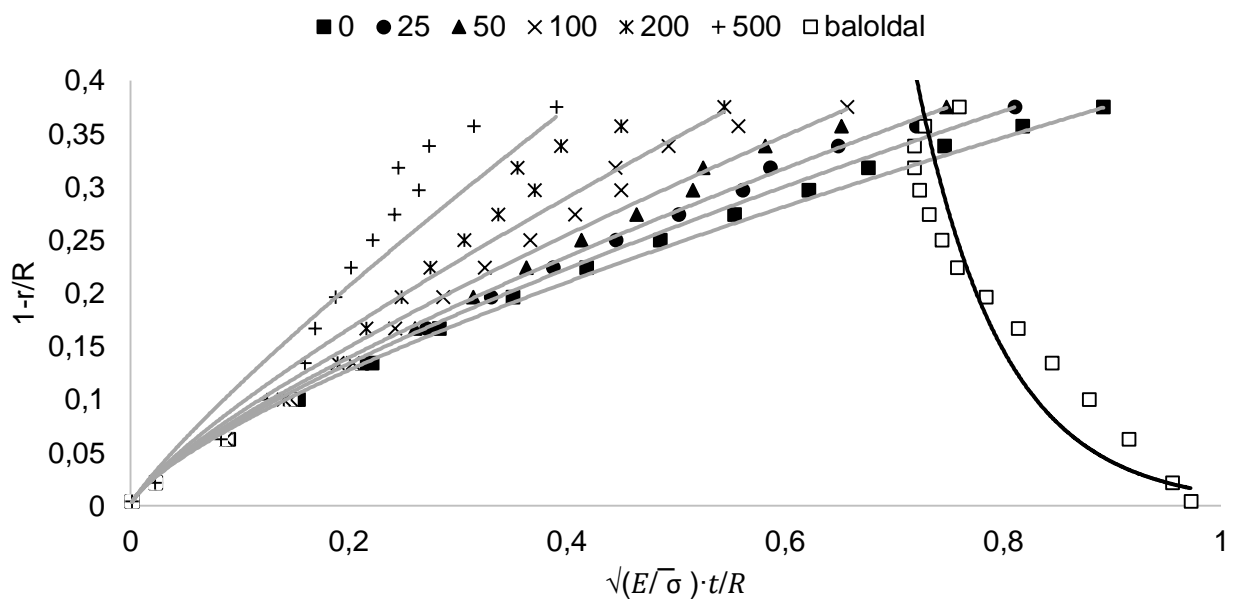
Az $\bar{\varepsilon}$ számításnál azt az egyszerűsítő feltételt alkalmaztuk, hogy [2] szerint a mélyhúzás során a lemezvastagságot állandónak feltételezve írható, hogy

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d}{D}, \varepsilon_2 = 0 \text{ és } \varepsilon_3 = \ln \frac{D}{d} \quad (16)$$

továbbá, hogy

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (17)$$

amelyből (15) már számolható.



6. ábra: A Hutchinson és Neale –féle funkcionálból, M. Kadkhodayan és F. Moayyedian [16] megoldásával analitikai úton számolt ráncosodási kritérium diagramok

3.2. Az energia alapú módszer

Az energia alapú módszer úgy értelmezi a ráncok megjelenését, mint egy nyomófeszültségi instabil állapot elérésekor bekövetkező jelenséget („compressive instability”) [6]. A módszer alapja az a feltételezés, hogy a membrán feszültségek (a lemez síkjában ható feszültségek) munkája egyenlő kell legyen, a ráncosodáshoz szükséges hajlítási energiával, és a ráncgátló visszatartó hatásából származó energiával, azaz

$$\Delta T^p = \Delta U^p + E_s \quad (18)$$

amelyben ΔT^p a kerületi, nyomófeszültségek energiája, ΔU^p a hajlítási energia, és E_s a ráncgátló szerszám visszatartó energiája. Ennél a módszernél is szükséges a ráncosodással kialakuló hullámforma előzetes becslése, mely peremfeltételként épül be a megoldandó egyenletekbe. Így a ráncok száma a feladat során, tulajdonképpen oda-vissza hat, így fontos annak előzetes, helytálló becslése. Becslésére utalást a [16] mellett a [17]-ben és [18]-ban is találunk, melyek közül a két utolsó irodalom tartalmazza a (18)-ben felsorolt energia tagok részletesebb kifejtését is.

Yu és Johnson [17] - tökéletesen képlékeny, izotróp anyagokra, állandó lemezvastagság mellett – zárt alakú megoldást dolgozott ki a (18) differenciálegyenlet megoldására, bizonyos peremfeltételek betartása mellett (19). Többek között, ez az elmélet szolgáltatja az alapot (mintegy

harminc évvel korábbról) a [16] cikk szerzői számára, a „bifurcation” módszerből történő zárt alakú megoldás kidolgozásához (ld. (10) összefüggés). Ez magyarázza a két elmélet közötti alaki hasonlóságot.

$$\sqrt{\left(\frac{E}{k_f}\right)} \cdot \frac{t}{R} < \frac{3}{2} \sqrt{\frac{H^{ep}}{F^{ep} + \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \psi_{1+m}^{1-m}}} \quad (19)$$

A H^{ep} és F^{ep} tényezők ebben az esetben is m -től és n -től függenek, számítási módjuk a [17] irodalomban megtalálható.

Itt érdemes megjegyezni, hogy a ráncgátló szerszám hatását mindkét elmélet úgy értelmezi, mint a ráncosodás által okozott hullámosságnak ellentartó energiát, azaz a ráncgátló szerszámokban tárolódó energia mennyiségét egységes módon az

$$E_s = \frac{1}{2} k \cdot w_{max}^2 \quad (20)$$

összefüggéssel adják meg. Ez azt az energia mennyiséget jelenti, amelyet a ráncok fejtenek ki a k rugómerevséggel rendelkező ráncgátló szerszám megemeléskor.

3.3. Az AutoFom szoftver megoldásai

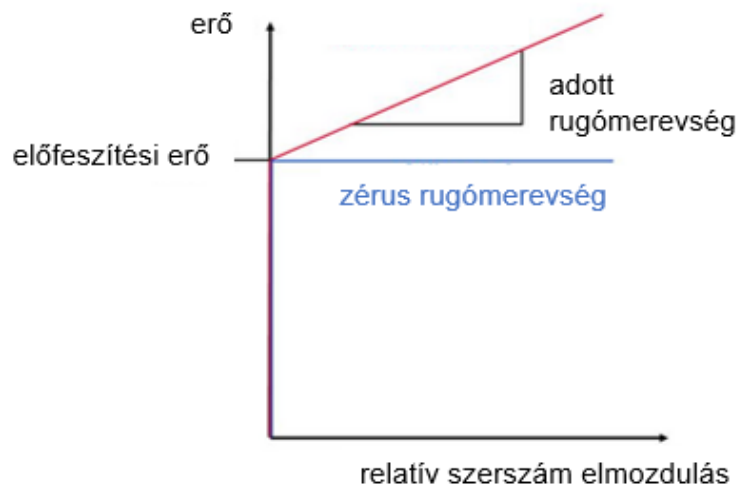
Az AutoForm véges elemes szimulációs szoftverben több lehetőség kínálkozik a ráncgátló szerszám kinematikájának, illetve a ráncosodás jelenségének definiálására. A mélyhúzási folyamat virtuális felépítésekor alkalmazhatunk

- állandó erővel záró ráncgátló megoldást,
- rugós működtetésű ráncgátló szerszámot, illetve
- húzóerő szabályozású ráncgátlót.

Az állandó erőre szabályozott ráncgátlós szerszám esetében megadható a szerszámok zárásakor felépülő erő, mely később a szerszámok mozgása során nem változik. Ennél a megoldásnál a munkadarab nem emeli el a ráncgátlót, akkor sem, ha a lemez ráncosodásából származó reakcióerő nagyobb, mint a záróerő. Ilyen esetben a program automatikusan megnöveli a záróerőt, a reakcióerő értékénél nagyobb értékre. A mérnöki alkalmazásoknál így becsülhető, hogy adott esetben mekkora az a szükséges legkisebb záróerő, melyet a húzási folyamat igényel.

Rugós működtetésű ráncgátlós szerszámokban, ezzel ellenben, túl kicsi rugóerő mellett, elemelheti a teríték ráncosodása által kifejtett reakcióerő a ráncgátlót. A rugós szerszám kinematikája és az általa kifejtett erő a rugó paramétereitől függenek. Ezek a rugóparaméterek az előfeszítési erő és a rugómerevség. Ahogy azt a 7. ábra szemlélteti, a rugómerevség, a záróerő megváltozási karakterisztikáját jelenti a szerszám elmozdulásának függvényében (piros folytonos vonal). A program feltételezi, hogy az alkalmazott rugók lineáris karakterisztikával rendelkeznek, ahogy az az acél, vagy a gáz rugóknál a gyakorlatban legtöbbször megfigyelhető. A rugó merevségének nulla értékre történő megválasztásával (kék folytonos vonal) tulajdonképpen, állandó erővel, méghozzá az előfeszítési erővel megegyező erővel záró szerszámot kapunk.

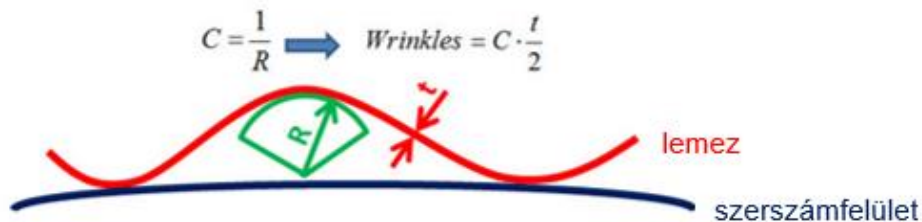
A húzóerő szabályozás azt jelenti, hogy a program, a folyamat során, a ráncgátló szerszámot a húzószerszám felületéhez képest egy előre meghatározott állandó értéken tartja. Ez tulajdonképpen azt az esetet szimulálja, amikor nincs ráncgátló nyomás, ami a valóságban távtartók használatakor állhat elő.



7. ábra: A rugós működtetésű ráncgátlás elve az AutoForm szoftverben

A munkadarab ráncosodásának, ráncosodási hajlamának becslésére a program két eredményváltozó lehetőségének vizsgálatát szolgáltatja. Az egyik változó geometriai alapú, míg a másik feltétel a feszültségi/alakváltozási állapotból következtet a ráncosodásra.

A geometriai alapú kritérium számításakor a szoftver, a munkadarab görbületét veti össze a referenciaként szolgáló szerszámfelülettel (8. ábra). A ráncok kialakulása akkor következik be, amennyiben megszűnik az érintkezés a munkadarab és a referencia szerszámfelület között. A változó értéke dimenzió nélküli szám, számítási módja az ábrán látható.

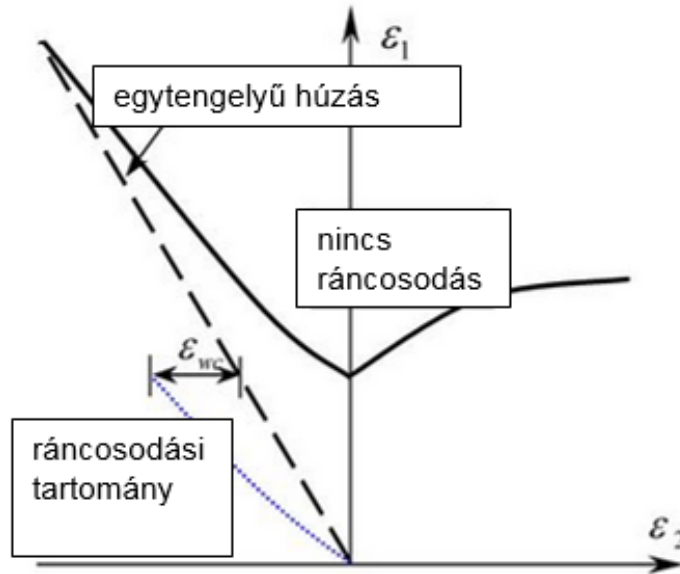


8. ábra: A ráncosodás geometriai értelmezése és eredményváltozója az AutoFormban

Az alakváltozási (és ebből feszültségi) állapoton alapuló eredményváltozó, az úgynevezett „ráncosodási potenciál”, melynek alap definíciója a

$$\varepsilon_{wc} = \max \left[- \left(\varepsilon_2 + \frac{R}{1+R} \cdot \varepsilon_1 \right), 0 \right] \quad (21)$$

egyenlettel írható le, melyben R az anizotrópia tényező, ε_1 és ε_2 pedig a nagyobb és kisebb főalakváltozások. Ez nem más, mint a vizsgált anyagi pont alakváltozási állapotának, az alakítási határdiagrammban, az egytengelyű húzófeszültség által létrehozott alakváltozási állapothoz történő viszonyítása. Ettől az állapottól a diagramban balra, a negatív kisebbik főalakváltozás irányában ugyanis nyomó feszültségnek kell hatnia az ott található pontokra. Így ez a változó, a nyomófeszültség nagyságából következtet a ráncosodásra. Amennyiben (21) nagyobb mint nulla, úgy fenn áll a lehetősége a ráncosodásnak, továbbá minél nagyobb ez az érték, annál nagyobb a ráncosodás valószínűsége is. Ha (21) értéke zérus, úgy az alakváltozási állapot megegyezik az egytengelyű húzás okozta alakváltozási állapottal, tehát a ráncosodás megjelenése nem lehetséges, ahogy az a 9. ábrán látható.



9. ábra: A ráncosodási potenciál értelmezése

Összefoglalás

A cikkben, a mélyhúzás technológiája során mintegy annak velejárájaként fellépő ráncosodás jelenségének okát, értelmezését, illetve elméleti leírasi lehetőségeit mutattuk be. Az alkalmazott matematikai módszerek a ráncosodást, a kontinuummechanika törvényszerűségeiből levezetve határozzák meg. A ráncosodást okozó feszültségek, és a ráncosodást jelentő alakváltozások energiái által definiált differenciálegyenletek sokszor csak numerikus úton oldhatók meg, de találunk példát az irodalomban zárt alakú megoldásokra is. Általában véve elmondható, hogy ezeket az energia tagokat számos – és sok esetben a folyamat során változó – tényező befolyásolja, mint például a munkadarab anyagi jellemzői, geometriai viszonyai, illetve egyes technológiai tényezők is, mint a súrlódás, vagy a szerszámgeometria, vagy a ráncgátló nyomás. Ez koránt sem kedvez a számítások pontosságának és egyszerűsítési lehetőségeinek, amiből az is következik, hogy azok eredményeinek értelmezése nem minden esetben magától értetődő, és azok nem is alkalmazhatók bármilyen tetszőleges körülmények között.

A képlékenyalakítási feladatok megoldása terén egyre elterjedtebb módszer, a véges elemes technika is kínál megoldásokat a ráncosodás becslésére. Ezek a ráncosodási kritériumok geometriai alapon, illetve a feszültségi/alakváltozási állapot vizsgálatának eredményeiből következtetnek a ráncok kialakulásának mértékére. A véges elemes módszer bár az esetek nagy többségében pontosabb megoldásra vezet, mint az egyéb matematikai algoritmusok, de a ráncosodás jelenségének bonyolult mivoltából következően, ezeknek a feltételeknek a megfelelő alkalmazása is megköveteli a technológiai/szerszámozási körülmények pontos ismeretét, és a szimulációs eredmények felelős kiértékelését.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.



Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült

Irodalomjegyzék

- [1] Taylan Altan, A. Erman Tekkaya: Sheet Metal Forming Fundamentals, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002 USA, (2012).
- [2] Kurt Lange: Handbook of Metal Forming, SME, Dearborn, Michigan 48121 USA, (1985).
- [3] Gál Gaszton, Dr. Kiss Antal, Dr. Sárvári József, Dr. Tisza Miklós: Képlékeny hidegalakítás, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, (2008).
- [4] Dr. Danyi József, Dr. Végvári Ferenc: Lemezmegmunkálás, Kecskemét, (2011).
- [5] MSZ 52 Hidegalakító és térformázó szabványgyűjtemények (visszavont szabvány), Szabványkiadó, Budapest, (1986).
- [6] Roger Pearce: Sheet Metal Forming, The Adam Hilger Series on New Manufacturing Processes and Materials, IOP Publishing Ltd. (1991).
- [7] Oehler Gerhard, Kaiser Fritz: Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (1969).
- [8] J. W. Geckeler: Plastische knicken der wandung von hohlzylindern und einige andern faltungserscheinungen. Z. Angewandte Mathematik und Mechanik 8, 341-352 (1928).
- [9] W. Ramberg, W. R. Osgood: Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 902, Washington, (1943).
- [10] E. Siebel, H. Beisswanger: Deep Drawing, Munchen, Carl Hanser, (1955).
- [11] T. Yagami, K. Manabe, Y. Yamauchi: Effect of alternating blank holder motion of drawing and wrinkle elimination on deep-drawability, Journal of Materials Processing Technology 187–188 (2007) 187–191.
- [12] R. Hill: A general theory of uniqueness and stability in elastic/plastic solids, Journal of Mechanics and Physics of Solids, 6, pp. 236–249 (1958).
- [13] J. W. Hutchinson, K. W. Neale: Wrinkling of curved thin sheet metal, Proceedings of International Symposium on Plastic Instability, Paris, France, pp. 1841–1914 (1985).
- [14] J. P. De Magalhães Correia, G. Ferron: Wrinkling of anisotropic metal sheets under deep-drawing: analytical and numerical study, Journal of Materials Processing Technology 155–156 (2004) 1604–1610
- [15] M. Abbasi, M. Ketabchi, T. Labudde, U. Prah, W. Bleck: New attempt to wrinkling behavior analysis of tailor welded blanks during the deep drawing process, Materials and Design 40 (2012) 407–414.
- [16] M. Kadkhodayan és F. Moayyedian: Analytical elastic–plastic study on flange wrinkling in deep drawing process, Scientia Iranica B (2011) 18 (2), 250–260
- [17] T. X. Yu, W. Johnson: The buckling of annular plates in relation to the deep-drawing process, Int. J. Mech. Sci. Vol. 24, No. 3, pp. 175-188, (1982).
- [18] Anupam Agrawal, N. Venkata Reddy, P.M. Dixit: Determination of optimum process parameters for wrinkle free products in deep drawing process, Journal of Materials Processing Technology 191 (2007) 51–54