

MÉLYHÚZÁS SORÁN FELLÉPŐ ELVÉKONYODÁS KÍSÉRLETI ÉS SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATIONS ON THE LOCAL THINNING OF DEEP-DRAWN PART

Béres Gábor J.^{1*}, Dolgos Bálint²,

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

² Mercedes-Benz Manufacturing Hungary Kft., Magyarország
<https://doi.org/10.47833/2022.1.ENG.002>

Kulcsszavak:

DP acélok
mélyhúzás
lokális elvékonyodás

Keywords:

DP steels
deep-drawing
local thinning

Cikktörténet:

Beérkezett 2021. szeptember 27
Átdolgozva 2021. november 10
Elfogadva 2021. november 20

Összefoglalás

Cikkünkben egy, a lemezalkatrészeket gyártó és kutató szakembereket erőteljesen foglalkoztató probléma, a mélyhúzás során fellépő lokális elvékonyodás jelenségének kísérleti és szimulációs eredményeit mutatjuk be. Az alkalmazott lemezanyagok a járműiparban elterjedten használatos DP600 és DP1000 nagyszilárdságú acélok voltak. Kísérleteinkből az vált láthatóvá, hogy az elvékonyodás a Swift-féle mélyhúzó próbával előállított munkadarabokon két helyen is megjelent. Az AutoForm szimulációk során, bár a közelítés globális jóságát a cikkben bemutatott változók (folyási feltételek és végeelem típusok) megváltoztatásával sikerült ugyan javítani, a második nyakképződés helyén még jelentős eltéréseket tapasztaltunk a kísérleti és a szimulált lemezvastagság értékek között. Az eredmények további fejlesztéséhez az egyéb bementi változók vizsgálata és azok parametrikus tanulmányozása szükségeltetik.

Abstract

In this study, local thinning as one of the major problems that concerns the sheet metal community was investigated on both experimental and numerical ways. The applied materials were DP600 and DP1000 high strength steel sheets, which have a wide range of application in the automotive industry. Our experimental results show that two necks were formed in the cups made by Swift-type deep-drawing test. However, the global goodness of the numerical approximations could be improved by the changing of the yield criteria and the element type, the second zone of local thinning was less well evaluated in the software. For further developments of the results, other input parameters' investigation and parametric study are needed.

1. Bevezetés

A lemezalakítás területén jelentkező kihívások tekintetében két fő tönkremeneteli jelenséget, a lokális elvékonyodást és a ráncosodást, valamint a minőségi problémának számító geometriai

* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 30 4326711
E-mail cím: beres.gabor@gamf.uni-neumann.hu

rendellenességet, a visszarugózást szokás kiemelni [1]. A felsoroltak közül talán a legfontosabbnak mondható, és ez által rendkívül intenzíven kutatott terület a kritikus mértékű, lokális elvékonyodás problémaköre. Fontosságából adódóan az elvékonyodás jelensége erőteljesen foglalkoztatja a lemezalkatrész gyártással foglalkozó kutatókat, szoftverkészítőket és fejlesztőket, valamint az ipari szakembereket egyaránt [2].

Ezzel párhuzamosan, a globális környezetvédelmi törekvésekkel összhangban folyamatosan nő a növelt szilárdságú lemezanyagok alkalmazása, és ezzel a szelvényméretek, lemezvastagságok csökkentése több ipari ágazatban is. E téren kiemelkedő szerepet tölt be a járműipar és a karosszériaépítés, az ágazatra jellemző rendkívül nagy gyártási volumennek és a gépjárművekben található számos lemezalkatrésznek köszönhetően.

A járműiparban elterjedten alkalmazott fejlett, nagyszilárdságú acélok rendszerint megfelelő szilárdsággal és egyben kellő alakíthatósággal is rendelkeznek [3]. Ez teszi lehetővé a szilárdságra irányuló vevői-, a csökkentett lemezvastagságokból adódó környezetvédelmi-, és az alakíthatóságban jelentkező gyárthatósági igények teljesülését egy időben. Ezeknek az acéloknak azonban, a mechanikai terhelésre adott válaszreakciói még sok szempontból kérdésesek. Számos kutatás található, melyekben – a teljesség igénye nélkül – vizsgálják ezen anyagok képlékeny alakváltozási hajlandóságát [4], visszarugózását [5], szakadását [6] és ráncosodását [7].

Kutatásukban, a fejlett nagyszilárdságú acél lemezanyagok csoportjába tartozó DP600 és DP1000 anyagminőségből kimunkált lemezterítek elvékonyodási hajlamát vizsgáltuk mélyhúzó próbákkal. A kísérleti eredményeket numerikus szimulációkkal is összevetettük, hogy megfigyeljük az elvékonyodás szempontjából meghatározónak számító tényezőket, azok hatásait. A cikkben e átfogó munkának egy szegmensével találkozhat az olvasó.

2. Kísérleti vizsgálati módszerek

2.1. Felhasznált anyagok

Kutatásunkhoz kereskedelmi forgalomban kapható Docol DP600 és DP1000 anyagminőségű, 1 mm névleges lemezvastagságú, bevonat nélküli táblalemezeket használtunk fel. Az anyagok főbb mechanikai tulajdonságait szakítóvizsgálatokkal állapítottuk meg az MSZ EN ISO 6892-1:2010 szabvány utasításait követve, háromszoros mérésismétlési számmal, a hengerlési irányhoz viszonyított 0°, 45° és 90°-os orientációjú próbatesteken. A legfontosabb mérőszámok átlag értékeit, mint a folyáshatárt ($R_{p0,2}$), a szakítószilárdságot (R_m), az egyenes nyúlást (A_g) és az anizotrópia mérőszámokat (r_θ) az 1. táblázatban foglaltuk össze.

1. Táblázat. A felhasznált anyagok átlagos mechanikai tulajdonság jellemzői

	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_g (%)	r_0 (-)	r_{45} (-)	r_{90} (-)
DP600	444	656	12,8	0,803	0,910	1,010
DP1000	758	1099	6,7	0,752	0,730	0,811

2.2. A mélyhúzó kísérletek

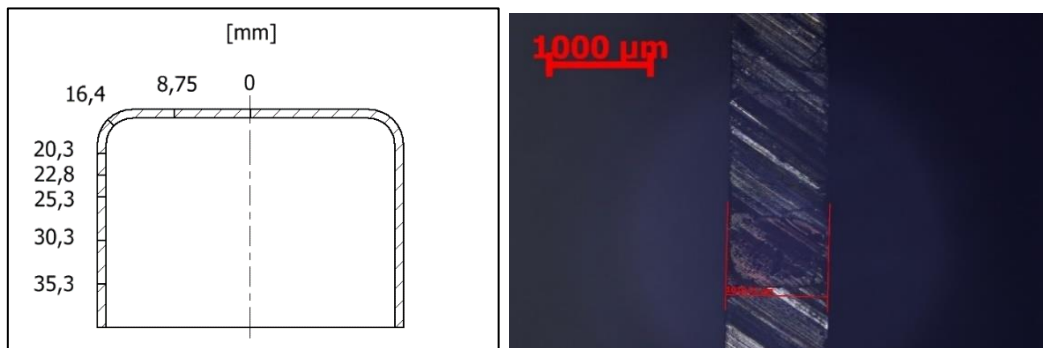


1. ábra. A kísérleti mélyhúzó berendezés (balról) és különböző ráncgátló erővel mélyhúzott csészék egy csoportja (jobbról)

A mélyhúzó vizsgálatokat a Neumann János Egyetem GAMF Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszékén található Erichsen 142 típusú, univerzális lemezvizsgáló géppel végeztük, különböző ráncgátló erő értékek mellett, állandó 30 mm/perc bélyeg-elmozdulási sebességgel, ugyancsak háromszoros ismétlési gyakorisággal. A vizsgálatokhoz a Swift-féle mélyhúzó próbának megfelelő szerszámelrendezést és szerszámgeometriát alkalmaztuk [8]. Az Ø66 mm-es terítékeket a húzógyűrű felőli oldalon vékony kenőolaj réteggel és 0,05 mm vastag polietilén fóliával kentük (ez az ún. 'szendvics' kenés). A teríték bélyeg felőli oldalán nem alkalmaztunk kenést. A vizsgálóberendezést és a mélyhúzott csészék egy csoportját az 1. ábra szemlélteti.

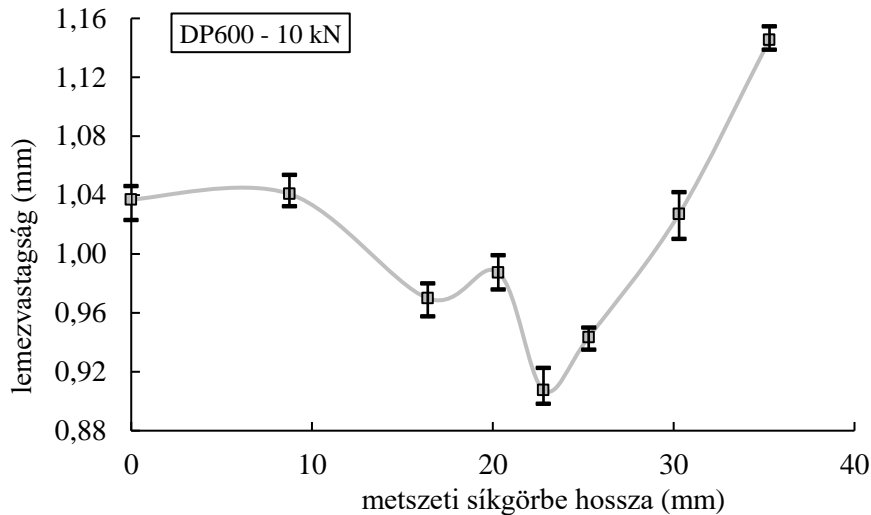
2.3. A lemezvastagság mérések

A lemezvastagság mérésekhez a mélyhúzott csészéket a hossz tengelyük mentén, precíziós vágógépen félbevágtuk. Az elmetezett csészéket egy rugós készülékkel rögzítettük a mérésekhez felhasznált Zeiss Imager M2m típusú fénymikroszkóp tárgyasztalán úgy, hogy a vágott felület minden esetben merőleges legyen az objektív tengelyvonalára. A méréseket, a metszet síkgörbe vonala mentén nyolc különböző helyen végeztük, 50-szeres nagyításban, a 2. ábra bal oldalán feltüntetett pozíciókban. Az ábra jobb oldalán egy csésze egy pontjának a mérése látható.



2. ábra. A mérési helyek sematikus ábrázolása (balról) és egy DP600 anyagú, 10 kN ráncgátló erő alkalmazásával mélyhúzott csésze egyik mérési pontjánál készített mikroszkópi fényképfelvétel (jobbról – a képen a mért érték 1,019 mm)

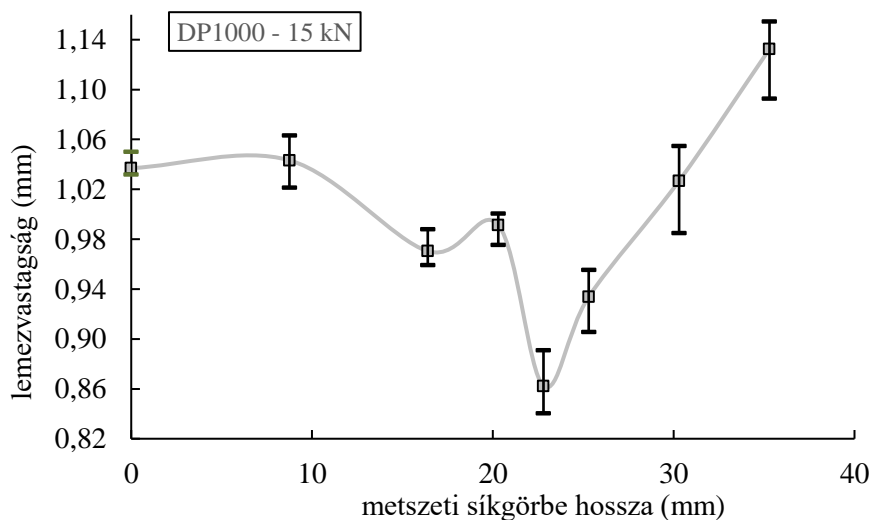
A DP600 és a DP1000 anyagra vonatkozóan, adott ráncgátló erővel mélyhúzott csészék átlagos mérési eredményei láthatók a 3. és a 4. ábrán. A DP600-as anyagú terítéket 10 kN, a DP1000-es anyagút pedig 15 kN ráncgátló erő mellett mélyhúztuk. Ezek az erő értékek közel helyezkednek a Siebel egyenlet szerint javasolt optimális ráncgátló erőkhöz. A ráncgátló erő megváltozása természetesen, a mélyhúzott alkatrészen mérhető lemezvastagságok megváltozását is eredményeznék. Jellemzően, a nagyobb ráncgátló erőkhöz intenzívebb elvékonyodás tartozik.



3. ábra. DP600 anyagú teríték mélyhúzásakor kapott lemezvastagság értékek, 10 kN ráncgátló erő alkalmazása mellett

Az ábrák azt mutatják, hogy a legnagyobb mértékű elvékonyodás a metszet null-pontjától mért 22,8 mm-es távolságra eső pontnál található, mindkét lemezanyag esetén. A DP1000 anyagminőséget erőteljesebb elvékonyodás jellemzi, amely a lemez nagyobb szilárdságából és a (szilárdsághoz arányosan) nagyobb ráncgátló erő alkalmazásából következik. A kettős nyakképződés (két lokálisan elvékonyodott szakasz) is mindkét lemezanyagnál megfigyelhető. Az enyhébb elvékonyodás, ahol a lemezt a bélyeg és a matrica közötti húzórésben tisztán húzófeszültség terheli, egységesen 20,3 mm-nél található. A nagyobb mértékű elvékonyodás a fal kezdetén, a hajlítással párosult húzófeszültségekből adódik.

Mindkét esetben, a 30,3 mm-hez tartozó pontnál a csésze falvastagsága megközelíti a fenék null-pontjában mérhető vastagságot, majd még tovább haladva a fal mentén (a fenéktől távolodva), lemezvastagság növekedés figyelhető meg. E jelenségek szokásosnak mondhatók a Swift-féle mélyhúzó próbának kitett lemezek esetében.



4. ábra. DP1000 anyagú teríték mélyhúzásakor kapott lemezvastagság értékek, 15 kN ráncgátló erő alkalmazása mellett

3. A numerikus szimulációk felépítése

A végeelemes szimulációkhoz az AutoForm R7® szoftvert használtuk. Az 5. ábra baloldalán látható elrendezés szerint merev elemekként definiáltuk a húzóbélyeget és a húzómatricát. A ráncgátló szerszám erővel szabályozott, kényszerműködésű szerszámelemként került

meghatározásra. A ráncgátlón működtetett erő értékek minden esetben megfeleltek a gyakorlatban alkalmazott ráncgátló erőknek. A súrlódást a Coulomb-féle súrlódási modellel adtuk meg, $\mu = 0,20$ és $0,05$ értékkel rendre a bélyeg és a matrica felőli oldalon.

Az anyagok hidegalakítási keményedési görbéjét a Swift egyenlettel [9] írtuk le:

$$\bar{\sigma} = A \cdot (\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \quad (1)$$

ahol A , ε_0 és n anyagfüggő paraméterek.

Az anyag képlékeny viselkedését két különböző modellel írtuk le az eredmények összehasonlítása, azaz a folyási feltételek befolyásoló mértékének a vizsgálata céljából. Barlat és Lian [10] a képlékeny alakváltozás megindulásának feltételét az

$$f = a|K_1 + K_2|^M + a|K_1 - K_2|^M + c|2K_2|^M = 2\bar{\sigma}^M \quad (2)$$

alakban írták le, ahol

$$K_1 = \frac{\sigma_x + h\sigma_y}{2} \quad (3)$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{(\sigma_x - h\sigma_y)^2}{2} + p^2\sigma_{xy}^2} \quad (4)$$

$$a = 2 - c = 2 - 2\sqrt{\frac{r_0}{1+r_0} \cdot \frac{r_{90}}{1+r_{90}}} \quad (5)$$

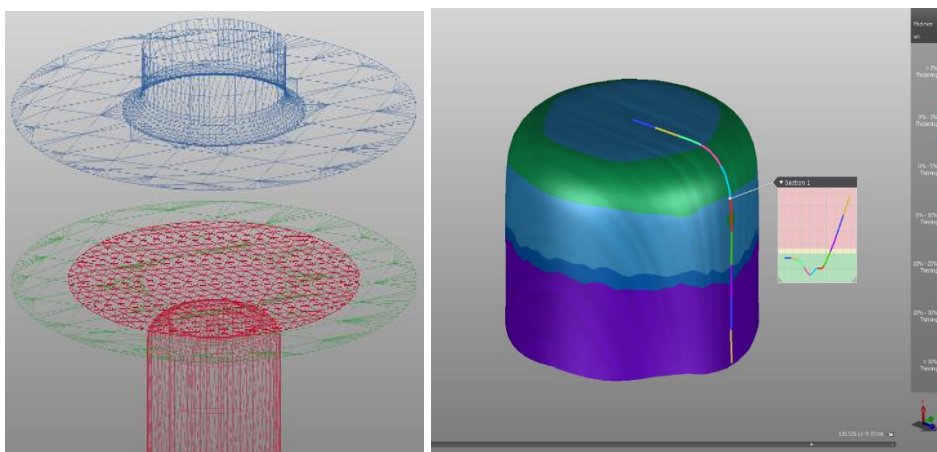
és

$$h = \sqrt{\frac{r_0}{1+r_0} \cdot \frac{1+r_{90}}{r_{90}}} \quad (6)$$

A fenti egyenletekben σ_x , σ_y a fő normál-, míg σ_{xy} a fő nyírófeszültségeket jelentik, M az anyag rácsszerkezetétől függő kitevő, p pedig anyagfüggő paraméter, mely csak numerikus módszerekkel határozható meg. A másik alkalmazott elmélet a Hill'48 folyási feltétel [11] volt, amely a képlékeny viselkedést sík feszültségi állapotban a

$$2f = H(\sigma_y - \sigma_x)^2 + G\sigma_x^2 + F\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 \quad (7)$$

alakban adja meg. Az egyenletben szereplő H , G , F és N anyagfüggő állandók az r értékekből és az egytengelyű feszültségi állapotban mérhető folyáshatárokból számolhatók. Az egyenletben szereplő konstansok bővebb megismerését például a [6] cikk szolgálja.



5. ábra. A mélyhúzási szimulációk felépítése (balról) és a lemezvastagság-változás mérése a szoftverben (jobbról)

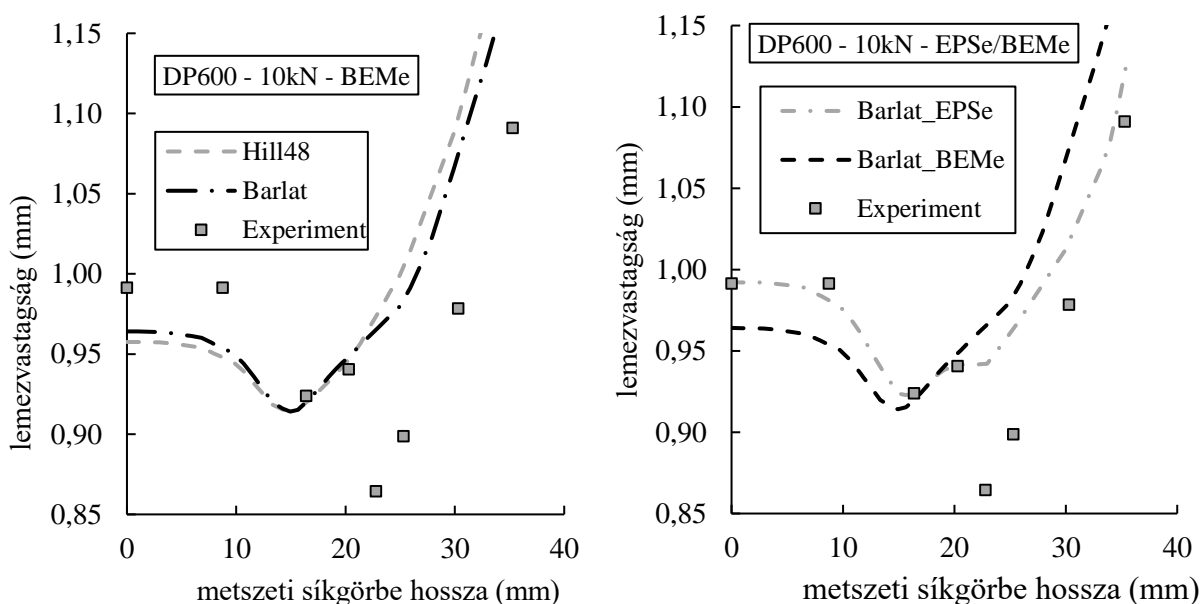
A szimulációkban, a folyási feltételeken kívül az alkalmazott végeelem típusát is változtattuk, hogy megfigyeljük a hálózási stratégia hatását is az elvékonyodás számolt értékeire. Az AutoForm szoftver által használt mindkét hálózási típussal, az EPS (elasto-plastic shell) és a BEM (bending

enhanced membrane) elemekkel is végeztünk szimulációkat. Az 5. ábra jobb oldalán a lemezvastagság mérésének módja látható a szoftverben, EPS elemek és a Barlat és Lian folyási feltétel alkalmazása mellett.

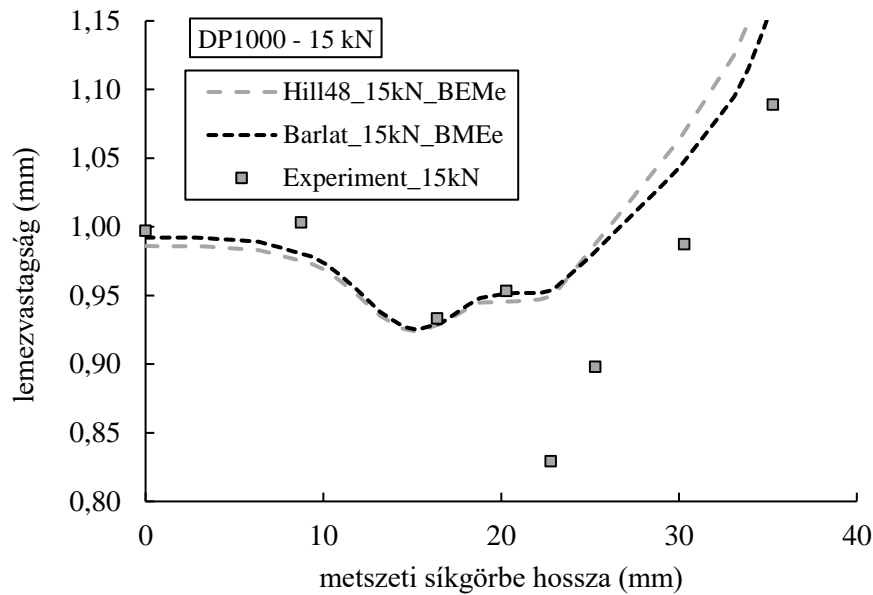
4. A kísérleti és a szimulációs eredmények összehasonlítása

A numerikus szimulációkból kapott és a csészék keresztmetszetében mért átlagos lemezvastagság értékek viszonylatát a 6. és 7. ábra szemlélteti. A 6. ábra bal oldalán a DP600 anyagra vonatkozóan, a Hill48 és a Barlat és Lian folyási feltételek alkalmazásával kapott eredmények összehasonlítása látható, BEM végeelem típus alkalmazása mellett. A szimulációs eredmények csak a kevésbé intenzív, első nyakképződés környezetében becsülik megfelelően a lemezvastagságot, mindkét folyási feltétel esetén. Az elemtípus megváltoztatásával viszont már a csésze fenék és fal részén is jobb egyezés tapasztalható. Elmondható, hogy az EPS elemtípus és a Barlat és Lian folyási feltétel együttes alkalmazása növelte a közelítés jóságát. Fontos megjegyezni, hogy a második (intenzívebb) nyakképződést ez esetben sem sikerült kielégítő közelítéssel szimulálni, ezért még újabb bemeneti paraméterek vizsgálata is szükségessé vált. A terjedelmi korlátok miatt azonban, egyéb bemenő paraméterek hatására jelen cikkben nem térünk ki.

Hasonló jelenség figyelhető meg a DP1000-es anyag esetében is. Az alkalmazott folyási feltétel nem bír meghatározó szereppel a lemezvastagság értékekre a 7. ábrán sem. Itt a BEM elemtípus is megfelelő közelítést szolgáltatott a második nyakképződés zónájától eltekintve, amelyre nézve nem sikerült a közelítés pontosságát az EPS elemtípussal sem számottevően javítani. Ez az oka annak, hogy a DP1000-es lemezanyagnál nem tartalmaz külön ábrát a cikk a BEM és az EPS elemek összehasonlítására. A második nyakképződés jelenségének szimulációs módszerekkel történő reprodukálását, ennél az anyagnál is egyéb bemeneti paraméterek vizsgálatával, meghatározásával, valamint beállításával lehetőség elérni.



6. ábra. A kísérleti és a szimulációs lemezvastagság eredmények összevetése: BEM elemtípus és a Barlat és Lian illetve a Hill48 folyási feltételek felhasználásával (balról); továbbá BEM és EPS elemtípusok illetve a Barlat és Lian folyási feltétel felhasználásával (jobbról). Anyag: DP600



7. ábra. A kísérleti és a szimulációs lemezvastagság eredmények összevetése: BEM elemtípus és a Barlat és Lian illetve a Hill48 folyási feltételek felhasználásával. Anyag: DP1000

5. Összefoglalás

Cikkünkben két, a járműiparban elterjedten alkalmazott nagyszilárdságú lemezanyag (DP600 és DP1000) elvékonyodási hajlamának kísérleti-vizsgálati és numerikus szimulációs eredményeinek egy részletét mutattuk be. A téma aktualitását jelzi, hogy a járműkarosszéria gyártásban talán legnagyobb kihívást jelentő jelenség, a lokális elvékonyodás szimulációja még ilyen egyszerűsített munkadarabok esetén sem triviális. A szimulációs eredményeket számos bemeneti paraméter befolyásolja, amelyeknek csak korrekt kimérése/megválasztása esetén juthatunk megfelelő eredményre.

Kutatásunkban vizsgáltuk két, gyakran használatos folyási feltétel (Hill48 és Barlat és Lian) és az AutoForm szoftverbe beépített mindkét végeelem típus (BEM és EPS) hatását az elvékonyodásra nézve. Eredményeinkből az látható, hogy a folyási feltétel megválasztása mindkét anyag esetében csak kis mértékben befolyásolta az eredményeket, míg az elemtípusok közül az EPS elem alkalmazása mutatott a kísérletekkel jobb összhangot a DP600-as anyagnál. A DP1000-es lemeznél az elemtípus hatása ennél kisebb befolyással bírt az eredményekre.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00052 „Haszonjárművek felépitményének és alvázának tömegcsökkentése hibrid anyagpárosításokkal” pályázat keretében valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Banabic, D., Bunge, H.J., Pöhlant, K., Tekkaya, A.E., 2000. Formability of Metallic Materials, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 173-178.
- [2] Banabic, D., Barlat, F., Cazacu, O., Kuwabara, T., 2010. Advances in anisotropy and formability. Int J Mater Form 3, 165–189. <https://doi.org/10.1007/s12289-010-0992-9>
- [3] Kuziak, R., Kawalla, R., Waengler S., 2008. Advanced high strength steels for automotive industry. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol VIII, 103-117.
- [4] Yong Hou, et al.: Journal of Materials Processing Tech., <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116314> (Investigation of evolving yield surfaces of dual-phase steels)
- [5] Münstermann S, Sparrer Y, Yao Y, Lian J, Meya R, Clausmeyer T and Tekkaya AE. Effect of plastic strain and ductile damage on elastic modulus of multiphase steel and its impact on springback prediction. Proceedings of the 22nd International ESAFORM Conference on Material Forming. AIP Conference Proceedings 2113, 180001 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5112739>

- [6] Lian, J., Shen, F., Jia, X., Ahn, D-C., Chae, D-C., Münstermann, S., Bleck, W., 2018. An evolving non-associated Hill48 plasticity model accounting for anisotropic hardening and r-value evolution and its application to forming limit prediction. *International Journal of Solids and Structures*, Volume 151, 20-44.
- [7] Neto, D.M., Oliveira, M.C., Santos, A.D., Alves, J.L., Menezes, L.F., 2017. Influence of boundary conditions on the prediction of springback and wrinkling in sheet metal forming. *International Journal of Mechanical Sciences* 122, 244–254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.01.037>
- [8] Swift, H.W., 1939. Drawing tests for sheet metal. *Proceedings Institution of Automobile Engineers*, Vol. 34: 361.
- [9] Swift, H. W., 1952. *J. Mech. and Phys. of Solids* 1, 1-18.
- [10] Barlat, F., and Lian, J., 1989. Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions. *International Journal of Plasticity*, Vol. 5, 51-66.
- [11] Hill, R., 1947. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *The hydrodynamics of non-Newtonian fluids. I*, 281-297.