

KORSZERŰ LEMEZANYAGOK MECHANIKAI VIZSGÁLATAI

MECHANICAL TESTS OF MODERN SHEETMETALS

Béres Gábor ^{1*}, Hareancz Ferenc ¹, Weltsch Zoltán ¹

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

Kulcsszavak:

DP600,
Al 6061,
DC04,
alakíthatóság
mélyíthetőség

Keywords:

DP600,
Al 6061,
DC04,
formability
dome height

Cikktörténet:

Beérkezett: 2017. szeptember 15
Átdolgozva: 2017. szeptember 29
Elfogadva: 2017. október 10.

Összefoglalás

A cikk három különböző lemezanyag szilárdsági és alakíthatósági vizsgálatait mutatja be szabványos próbák alkalmazásán keresztül. Munkánk során a járműipar számára egyre nagyobb fontossággal bíró növelt szilárdságú DP600-as acél és 6061-es típusú nemesített alumínium, illetve a karosszériagyártásban egyre inkább háttérbe szoruló DC04 lágyacél lemezanyagok szakító- és mélyítővizsgálatainak eredményeit foglaltuk össze. Ezek alapján arra lehet következtetni, hogy míg az r képlékenységi anizotrópia tényező és az n keményedési kitevő tekintetében a három teljesen különböző előélet és vegyi összetétel láthatóan kiütözik, addig a mélyíthetőségi jellemzők terén felfedezhető némi kapcsolat a vizsgált anyagok között.

Abstract

This study is about standard strength and formability investigations of three different sheet metal materials. Tensile and dome height tests were carried out on DP600 steel, Al6061 aluminum and DC04 steel materials. Former two materials have increasing importance in the automotive industry day-to-day, while the latter one gradually loses its significance. The results show obvious discrepancy refer to the Lankford-number (r) and the strain hardening exponent (n) due to the three dissimilar manufacturing technology and chemical composition. Besides, in the field of dome height tests, some kind of relationship can be discovered somewhat, between the studied materials.

1. Bevezetés

A közúti járművek folyamatosan növekedő mennyisége különböző társadalmi és környezetvédelmi problémákhoz vezet. Ezért a járműgyártó cégeknek sokszor egymásnak ellentmondó – viszont kicsit sem elhanyagolható - követelményeknek kell megfelelniük és olyan tényezőket kell figyelembe venniük, mint például az üzemanyag hatékonyság, a károsanyag kibocsátás, gyártási anyagveszteség optimalizálása és a globális felmelegedés.

Egy kutatás [1] azt tárja fel, hogy milyen módon lehetne csökkenteni a gyártási anyagveszteséget a gyártott alkatrészek darabszámát illetően. A tanulmány becslése szerint ugyanis, a gyártási anyagveszteség a karosszéria gyártáshoz felhasznált lemezanyag 44%-át tesz ki. Ez nagyjából 25 millió tonna többlet CO₂ kibocsátást és 8 billió angol font ráfordítást eredményez éves szinten, világszerte. A járműgyártás talán legfőbb fejlesztési törekvése azonban továbbra is a járművek tömegének csökkentésére irányul, a káros anyag kibocsátás minimalizálása érdekében.

* Béres Gábor. Tel.: +36 30 4326711
beres.gabor@gamf.kefo.hu

Ennek megfelelően, lehetőség rejlik a karosszéria tömegének csökkentésében, mely a jármű teljes súlyának jelentős részét teszi ki. Ezen cél eléréséhez a gyártók olyan technológiai módszereket és alapanyagokat használnak fel, melyekkel a karosszéria elemek gyártása során elérhető a kívánt tömegcsökkentés, a szilárdság – így a töréssel szembeni ellenálló képesség - megtartása mellett.

Ezen törekvések hatására jelentek meg a nagyszilárdságú acél- és alumínium ötvözetek a karosszéria elemek gyártásában, a lágyacél alkatrészek egyre nagyobb mértékű kiszorítása mellett. Az alumínium alkalmazásával az alkatrészek tömege akár az eredeti tömeg 30-40%-ára is csökkenthető. A nagyszilárdságú acélokból történő gyártás esetén ez az arány 20% körüli [2,3].

Cikkünkben a 6061-es AlMgSi ötvözet és a DP600-as második generációs, nagyszilárdságú acél mechanikai tulajdonságait hasonlítottuk össze a DC04 jelölésű jól alakítható, jól mélyhúzható acélokéval, kísérleti eredményekre támaszkodva. Az anyagválasztást, egyrészt az indokolja, hogy az autógyártás acélközpontúsága miatt, a szakemberek sok esetben probléma forrásként tekintenek az alumíniumra, mert az acélhoz képest speciális gyártóeszközökre és szaktudásra van szükség [2]. Másrészt a korszerű nagyszilárdságú acélokat tekintve, azok különleges mikroszerkezetének köszönhetően, még sok nyitott kérdés áll a kutatók előtt.

Természetesen, akárcsak az acéloknál, az alumínium karosszériaelemek gyártása során is jelentős szerepet játszanak az alapanyag tulajdonságai. Az alumíniumra jellemző, hogy az acéloknál sok esetben rosszabb alakíthatósága nem tesz lehetővé bonyolult geometriákat, éles karaktereket, így az ilyen tulajdonságú alapanyagból többnyire nagy, sík felületeket borító elemeket készítenek [3,4,5]. A nagyszilárdságú acélokból pedig jellemzően a teherviselő, illetve energia elnyelő szerkezeti elemek készülnek [6].

2. Vizsgált anyagtypusok

A kísérletek során vizsgált három anyagtypus szakítóvizsgálatokból nyert, legalapvetőbb mechanikai tulajdonság jellemzői az 1. Táblázatban található. A vizsgált 6061-es AlMgSi ötvözet a járműiparban széles körben elterjedt, nemesíthető ötvözet. A megfelelő tulajdonságokat eredményező hőkezelés, a lemezelőállítás utolsó fázisában történik. A homogenizációt megeresztés követi, amely során végbemegy a kiválásos keményedés, amely által az alkatrész nemesített állapotba kerül. Így az anyag már elegendően nagy szilárdsággal rendelkezik ahhoz, hogy az előző pontban kifejtett rendeltetésének megfelelően, bár alakíthatósága a nemesítés előtti állapothoz később rosszabbnak mondható. A kísérletek során felhasznált lemezanyag vegyi összetételét a 2. Táblázat mutatja.

1. Táblázat: A vizsgált anyagok legáltalánosabb mechanikai tulajdonság jellemzői

Anyag-minőség	Rugalmassági modulus - E (N/mm ²)	Folyáshatár - R_e (N/mm ²)	Szakítószilárdság - R_m (N/mm ²)	Szakadási nyúlás A_{80} (%)
DP600	210x10 ³	445	656	20,6
DC04	210x10 ³	238	336	37,9
AlMgSi	72x10 ³	109	209	24,3

2. Táblázat: A vizsgált AlMgSi ötvözet vegyi összetétele (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V
1,50	0,35	0,30	0,30	0,9	0,20	0,25	≤0,15	≤0,15

A DP600 nagyszilárdságú, alacsony karbontartalmú acél mikroszerkezetét ferrit és martenzit szövetelemek alkotják. Az acél szilárdsága és alakíthatósága jelentősen függ a martenzit százalékos mennyiségétől, illetve a ferritbe ágyazott martenzit szigetek méretétől, alakjától és eloszlásától [7,8,9]. Ezeknek a paramétereknek a beállítása, a lemezgyártás során történik, a megfelelő hőkezelési hőmérséklet és a karbontartalom helyes párosításával. A kutatómunka során felhasznált DP600-as lemez vegyi összetételét a 3. Táblázat tartalmazza.

3. Táblázat: A vizsgált DP600 acél vegyi összetétele (%)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al
98,6	0,09	0,17	0,87	0,01	<0,01	0,01	0,04	0,04

A DC04 tisztán ferrites, ötvözetlen, jól alakítható, jól mélyhúzható lemezanyag előállításának utolsó fázisa, az előző két anyagtól eltérően a hideghengerlés, melyet hőkezelés már nem követ. Az előállítás ezen sajátossága, és a vegyi összetétel (4. Táblázat) természetesen alapvető befolyással van az 1. Táblázatban feltüntetett, és a későbbiekben részletezendő tulajdonságokra.

4. Táblázat: A vizsgált DC04 acél vegyi összetétele (%)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu
99,5	0,050	0,023	0,233	0,012	0,009	0,014	0,027	0,041	0,024

A fenti mechanikai jellemzők és a kémiai összetétel fontos kiinduló pontként szolgálnak a lemezanyagok tulajdonságainak elsődleges áttekintése terén. Azonban jól ismert tény, hogy az alakíthatóság összetett fogalom, ezért kísérleteink során mélyebbre ható módon tanulmányoztuk az alakíthatósági, technológiai kérdéseket.

3. Kísérleti eredmények

Munkánk során egytengelyű szakítóvizsgálatokat és mélyítő vizsgálatokat végeztünk. Előző a lemezanyag tulajdonságairól átfogó képet ad, míg utóbbi, jellemzően a járműiparban alkalmazott igénybevételekhez igazodik.

3.1. Szakítóvizsgálatok

A lemezanyagok általános szilárdsági és alakváltozási jellemzőit, szabványos előírások szerint kialakított lemezpróbatetek szakítóvizsgálatával állapítottuk meg. A hengerlési iránnyal párhuzamosan, arra merőlegesen és azzal 45°-os szöget bezáróan is több próbatestet szakítottunk mindhárom anyagból, majd számoltuk az „r” képlékenységi anizotrópia tényezőt és az „n” keményedési kitevőt.

Az r érték alatt, a lemez próbatest egytengelyű szakítóvizsgálata során mért, próbatest szélesség/vastagság megváltozás arányt értjük [10,11]:

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad (1)$$

ahol φ_b a lemez szélességi méretének φ_s pedig a lemez vastagság irányú méretének valódi (logaritmikusan) alakváltozása, azaz:

$$\varphi_b = \ln \frac{b_0}{b} \quad (2)$$

$$\varphi_s = \ln \frac{s_0}{s} \quad (3)$$

Itt b és s a szakítóerő hatására megváltozott szélesség és vastagság irányú méretek, b_0 és s_0 pedig a lemez próbatest kiinduló méretei. A megváltozott b és s méreteket az egyenes nyúlás szakaszában mértük, nagyjából a 20%-os mérnöki alakváltozási mérték pillanatában.

A vékony lemezek vastagágának mérése, a megengedhető mérési pontatlanságon belül nem, vagy csak nehezen kivitelezhető. Így a térfogat-állandóság törvényéből kiindulva a vastagság irányú méret kifejezhető a próbatest hossz-, és keresztirányú méreteinek segítségével:

$$l_0 \cdot b_0 \cdot s_0 = l \cdot b \cdot s \quad (mm^3) \quad (4)$$

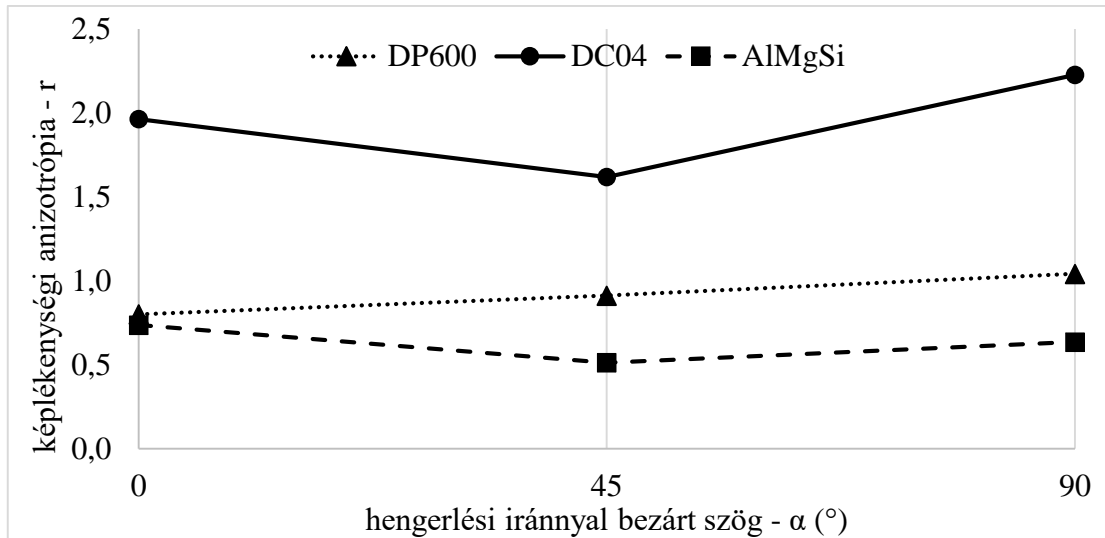
$$\frac{s_0}{s} = \frac{l \cdot b}{l_0 \cdot b_0} \quad (5)$$

ahol l a megnyúlt hossz, l_0 pedig az eredeti jeltávolság. Innen a képlékenységi anizotrópia képlete:

$$r = \frac{\ln\left(\frac{b_0}{b}\right)}{\ln\left(\frac{l \cdot b}{l_0 \cdot b_0}\right)} \quad (6)$$

Az eredményeket, az egyes irányok szerint átlagolva az 1. ábra mutatja. Az ábra alapján a DP600-as anyag izotróphoz közeli állapotúnak mondható, mivel az r értéke mindhárom irányban egy

körül. Ez a szám az alumínium ötvözetnél jelentősen egy alatt marad, de csak kissé változik a hengerlési irány változásával. A leginkább anizotróp (irányfüggő) viselkedést a hidegen hengerelt DC04 mutatja. Ennél az anyagnál az r érték jelentősen egy feletti és változásában az irányfüggés is felfedezhető.



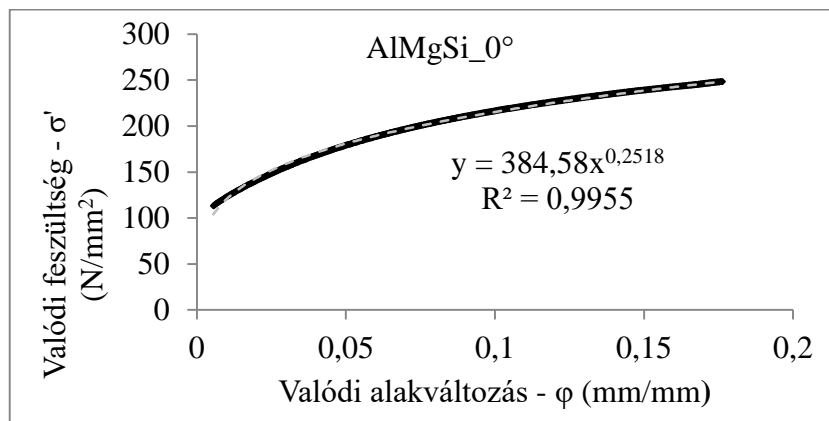
1. ábra: Az átlagos képlékenységi anizotrópia változása a hengerlési iránnyal bezárt szög függvényében

A keményedési kitevő (n) a lemezek képlékeny alakíthatósága szempontjából a másik kiemelten fontos mérőszám. A keményedési kitevőt az anyag folyásgörbéjének kiszervezésével, illetve a görbét leíró Nádai-féle matematikai modell meghatározásával kaptuk:

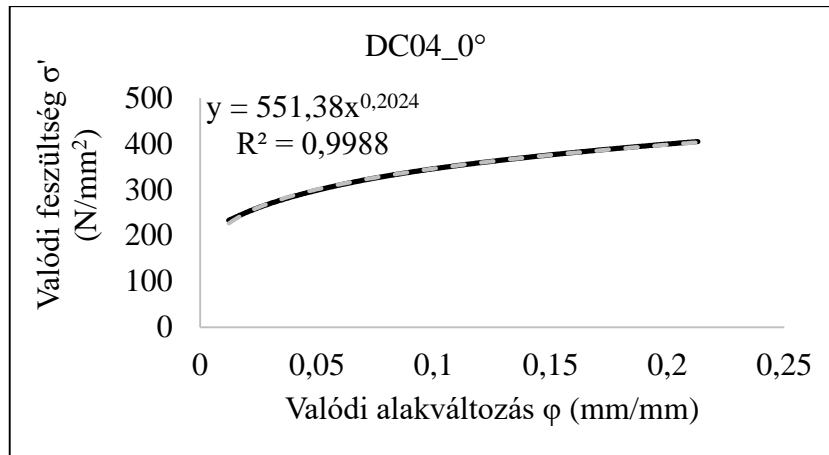
$$\sigma' = k\varphi^n \quad (N/mm^2) \quad (7).$$

A képletben σ' és φ az egytengelyű feszültségi állapotban mérhető, ún. egyenértékű valódi feszültség és valódi nyúlás, k pedig anyagra jellemző szilárdsági konstans. A keményedési kitevő – melynek értéke az egyes anyagokra nézve, matematikailag igazolhatóan megegyezik az egyenletes valódi nyúlás határával - a nyújtó-jellegű műveletek talán legfontosabb befolyásoló tényezője.

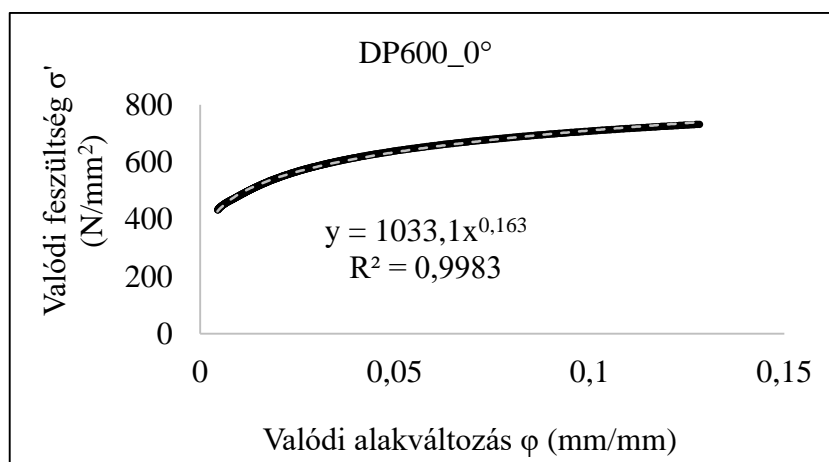
A 2. ábra a hengerlési iránnyal párhuzamosan kimunkált (0°) próbatestekre vonatkozó folyásgörbéket szemléltet az AlMgSi anyagra vonatkozóan. A keményedési kitevő értékei és a mért egyenletes nyúlások egyezése avagy eltérése alapján elmondható, hogy a Nádai-féle keményedési törvény a DC04 anyag esetében jól közelíti a valóságot (3. ábra). Ezzel szemben a DP600-as anyagnál (4. ábra) kismértékű, az alumíniumnál pedig jelentős eltérés mutatkozik e két jellemző tekintetében még úgy is, hogy a korrelációs együtthatók értékei ezt nem vetítik előre.



2. ábra: Az AlMgSi alumínium folyásgörbéje: kísérleti (fekete folytonos vonal) és az illesztett görbe (szürke szaggatott vonal)



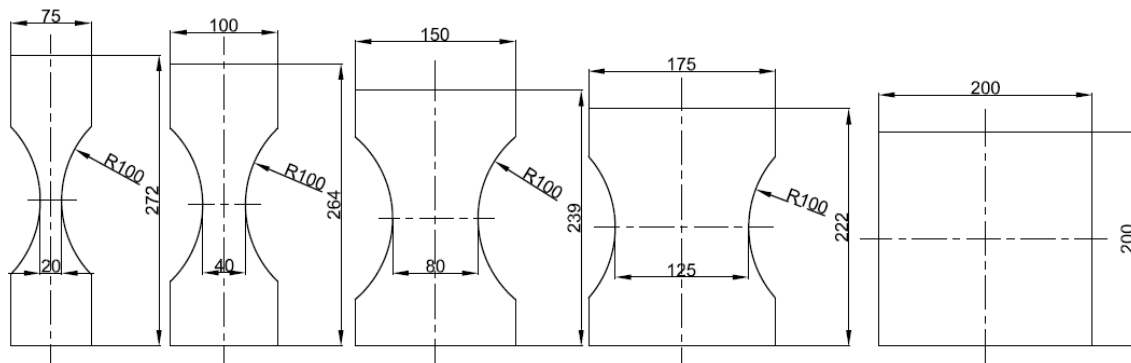
3. ábra: A DC04 anyag folyásgörbéje kísérleti (fekete folytonos vonal) és az illesztett görbe (szürke szaggatott vonal)



4. ábra: A DP600 anyag folyásgörbéje kísérleti (fekete folytonos vonal) és az illesztett görbe (szürke szaggatott vonal)

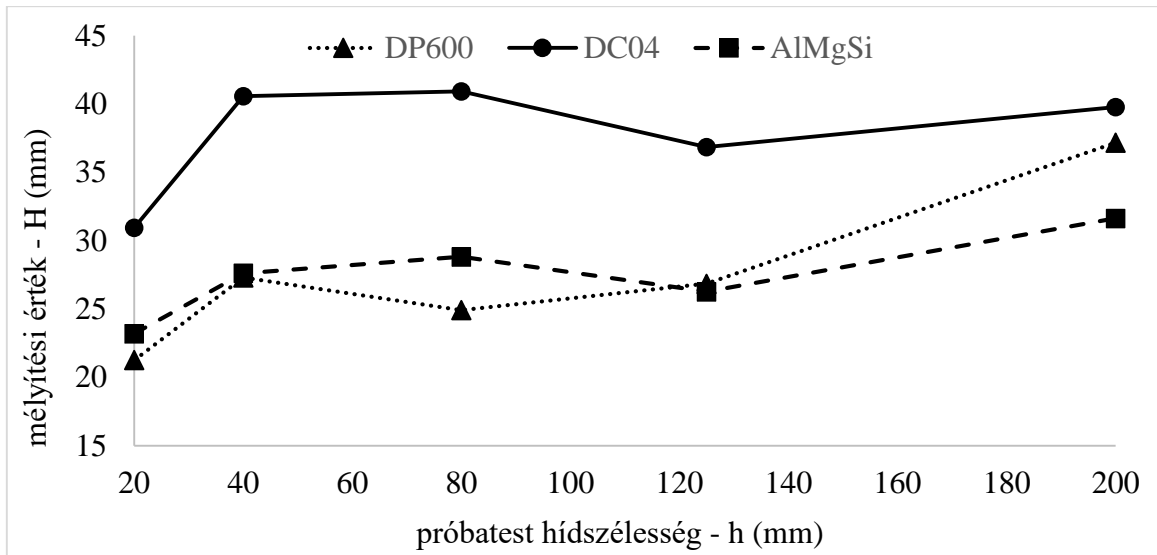
3.2. Mélyítő vizsgálatok

A mélyítő vizsgálatokhoz öt különböző geometriájú próbatestet készítettünk a [12,13] irodalmak leírása alapján (5. ábra). Ezeket a próbatesteket, a szakirodalom, *módosított Nakazima próbatesteknek* nevezi. Eredetileg, a Nakazima próbatestek hídszélessége (az ábrán rendre: 20, 40, 80, 125, 200 mm) a vizsgált hosszön azonos, így a szakadás, a próbatest hosszengelye mentén bárhol bekövetkezhet. Viszont, az 5. ábrán látható próbatest-kialakításoknak köszönhetően, a szakadás a legkisebb hídszélesség közelében fog várhatóan bekövetkezni, ami megkönnyíti a vizsgálat kiértékelését. A lemezek vastagsága 1 mm.



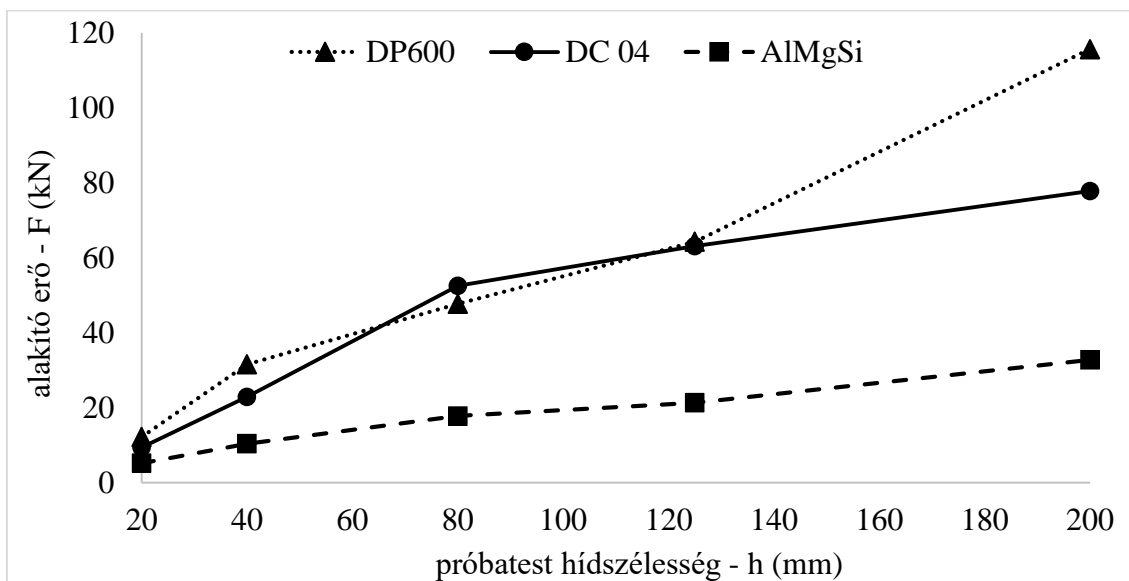
5. ábra: Próbatestek geometriája (méretek mm-ben)

A 6. ábra a szakadáshoz tartozó mélyítési értékek változását mutatja a hídszélesség függvényében. Megfigyelhető, hogy a szakadáshoz tartozó mélyítési szám (H), az egyes geometriáknál hasonló tendencia szerint alakul. Láthatóan hasonló a három, amúgy teljesen különböző mechanikai tulajdonságokkal és kémiai összetétellel rendelkező anyag mélyítési érték karakterisztikája. A jól alakítható DC04 minták mindegyike a várakozásoknak megfelelően nagyobb alakváltozás (mélyítés) elérése után szakadt, mint a nagyszilárdságú DP600-as acél vagy a nemesített alumínium. Utóbbi kettő esetében azonban a mélyítési mélység közel azonosnak tekinthető, jelentősebb eltérés a 200 mm-es hídszélességű darabnál figyelhető meg először. Az a tény, hogy ezen két anyag eddig megfigyelt tulajdonságaiban korábban észrevehető különbség mutatkozott, ugyancsak az alakíthatóság összetett mivoltát bizonyítja.



6. ábra: Mélyítési érték a hídszélesség függvényében

A mélyítési erő változása a hídszélesség függvényében a 7. ábrán követhető. Mivel az alumínium próbatessetek a DC04-hez képest kisebb mélyítési értéknél szakadtak, és egyben a vizsgált anyagok közül a legkisebb szilárdsággal is ezek rendelkeznek, a mélyítés erőszükséglete az acél próbatessetek esetében a nagyobb. Az erő változásában két törés jellegű átmenet tapasztalható a 40 és a 125 mm-es hídszélességű DP600 próbatesseteknél, ami az alumíniumra kevésbé jellemző. A DC04 egy jól látható törésponttal rendelkezik, a 80 mm-es hídszélességnél.



7. ábra: Mélyítési erő érték a hídszélesség függvényében

4. Összefoglalás

Munkánk során három különböző, korszerű lemezanyag mechanikai tulajdonságait vizsgáltuk. A szabványos szakító próbák mellett mélyítővizsgálatokat végeztünk, melyek segítségével összetett képet kaptunk a szóban forgó anyagok, azaz a DC04 jólalakítható acél, a DP600 növelt szilárdságú acél és az AlMgSi nemesített alumínium alakíthatósági, szilárdsági jellemzőiről. Kiemelnénk, hogy az r - n vizsgálatok által tükrözött eltérő tulajdonságok mellett, a mélyítési tesztek eredményei némi szabályszerűséget mutatnak a különböző anyagok különböző mechanikai tulajdonságainak ellenére. Megfigyelhető, hogy a tiszta nyírás állapotához legközelebb álló 20 mm-es hídszélességű (h) próbatestek szakadnak a legkisebb mélyítési mélységnél, a kéttengelyű húzásnak kitett 200 mm-es hídszélességű próbatestek pedig a legnagyobbánál, a vizsgált anyag minőségétől függetlenül. A két szélső állapot között a mélyítési értékek, anyagonként közel állandónak mondhatók.

Fontos ezen kívül hangsúlyozni, hogy az alkalmazott folyásgörbe modell felhasználásával kapott keményedési kitevő értéke a DC04-nél ugyan rendkívül jól közelíti a valóságot, de a DP600-nál kis, míg az AlMgSi anyagnál nagyobb különbséget mutat a matematikailag igazolható fizikai tartalmához képest.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Pallasz Athéné 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.

Irodalomjegyzék

- [1] Philippa M. Horton, Julian M. Allwood: Yield improvement opportunities for manufacturing automotive sheet metal components, *Journal of Materials Processing Tech.* 249 (2017) 78–88.
- [2] Budai D., Tisza M., Kovács P. Z.: Autóipari alumínium ötvözetek alakíthatóságának vizsgálata növelt hőmérsékletű alakítás esetén, *GÉP, LXVII.* 2016, 23-28.
- [3] J. Hirsch: Aluminium in Innovative Light-Weight Car Design, *Materials Transactions*, Vol. 52, No. 5, 2011, 818-824.
- [4] M. A. Omar: *The Automotive Body Manufacturing Systems and Processes*, 2011, John Wiley & Sons, 61.
- [5] Han HN., Clark JP.: Lifetime costing of the body-in-white: steel vs. aluminium, *JOM* 1995; 47(5):22–8.
- [6] S. Keeler, M. Kimichi: *Advanced High Strength Steels Application Guidelines Version 5.0*, WorldAutoSteel, 2014.
- [7] X. Sun, K.S. Choi, A. Soulami, W.N. Liu, M.A. Khaleel: On key factors influencing ductile fractures of DP steel, *Materials Science and Engineering A* 526, 2009, 140–149.
- [8] F Ozturk, A Polat, S Toros, R C Picu: Strain Hardening and Strain Rate Sensitivity Behaviors of Advanced High Strength Steels, *Journal of Iron and Steel Research, International.* 2013, 20(6): 68-74.
- [9] W.J. Dan, Z.Q. Lin, S.H. Li, W.G. Zhang: Study on the mixture strain hardening of multi-phase steels, *Materials Science and Engineering A* 552, 2012, 1–8.
- [10] R. Pearce: 4000 years of sheet metal forming, *Formability of Metallic Materials – 2000 A.D.*, ASTM Special Technical Publication 753, (1982.) pp. 3-18.
- [11] Tisza Miklós: *Anyagvizsgálat*, Miskolci Egyetemi Kiadó (2010)
- [12] Kovács P. Z., Tisza M.: *Korszerű alakíthatósági vizsgálatok*, Tanulmány, készült a TÁMOP-4.2.2.A-11/1 KONV-2012-0029 Járműipari anyagfejlesztések project keretében, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, 2011.
- [13] Kovács P. Z.: *Alakítási határdiagramok elméleti és kísérleti elemzése*, PhD értekezés, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, 2012.