

Lankford-féle szám és az alakítási határdiagram kapcsolata

Relationship between the Lankford number and the transformation limit diagram

**BORBÉLY Richárd¹, TÓTH-NAGY Bendegúz Viktor¹, KECSKÉS Bertalan²,
Dr. KERESZTES Róbert Zsolt^{3,4}, Dr. BÉRES Gábor József¹**

¹Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Neumann János Egyetem, Magyarország

²HILTI Szerszám Kft., Magyarország

³GÉTI-Gépüzemfenntartás Tanszék, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Magyarország

⁴Műszaki Tudományok Doktori Iskola, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Magyarország

Abstract

Our research aims to examine the effect of one of the characteristic properties of thin sheets, the r -value, on formability. In our article, we express formability using the material's forming limit diagram (FLD). FLDs typically describe the stretchability of sheet materials, and from the Lillet diagram, it is known that in this case, the limiting uniform strain (or the theoretically corresponding Nádai's n hardening exponent) measured during tensile tests is the key mechanical property. However, the r -value can significantly influence the deformation paths during stretching, which may even lead to changes in stretchability. In our research, we compared the calculated forming limit diagrams of a DP800 material with a typically low r -value and a DC04 material with a typically high r -value to make the effect of the r -value on the calculations visible. Based on the results calculated using the Swift and Stören-Rice theories, the n value is decisive when calculating the FLDs, whether assuming isotropic (Stören-Rice) material properties or considering anisotropy (Swift). For the material with a low r -value (DP800), this is the case. However, for the DC04 material, which has high anisotropy, we found that the effect of the n value on the forming limit curve is influenced by the higher r -value.

Keywords: formability, forming limit diagram, r -value, rolled steel sheets, anisotropy

Kivonat

Kutatásunk célja a vékony lemezek egyik jellemző tulajdonságának, az r -értéknek az alakíthatóság tekintetében kifejtett hatásának a vizsgálata. Az alakíthatóságot cikkünkben az anyag alakítási határdiagramjával (FLC-vel) fejezzük ki. Az FLC-k jellemzően a lemezanyagok nyújthatóságáról számolnak be, és a Lillet-diagramból ismert, hogy ez esetben elsősorban a szakítóvizsgálatokkor mérhető egyenletes nyúlás határa (avagy az ezzel teoretikusan megegyező Nádai-féle n keményedési kitevő) a mérvadó mechanikai tulajdonság. Ugyanakkor, az r -érték a nyújtáskor fennálló alakváltozási utakat jelentősen képes befolyásolni, ami akár a nyújthatóság megváltozásához is vezethet. Kutatásunkban ezáltal egy átlagosan kis r -értékkel rendelkező DP800 és egy átlagosan nagy r -értékkel rendelkező DC04 lemezanyag számolt alakítási határdiagramjait vetettük össze, hogy láthatóvá váljon az r -értéknek a számításokra gyakorolt hatása. A Swift és a Stören-Rice elméletekkel számolt eredményeink alapján az n érték a mérvadó akár izotróp (Stören-Rice) anyagtulajdonságokat feltételező, akár az anizotrópiát is figyelembe vevő (Swift) elmélet alapján számoljuk az FLC-eket, a kis r értékű anyagnál (DP800). A nagy anizotrópiával rendelkező DC04 anyag esetében azonban azt találtuk, hogy az n érték hatását az alakítási határgörbére befolyásolja a nagyobb r -érték.

Kulcsszavak: alakíthatóság, alakítási határdiagram, r -érték, hengerelt acéllemezek, anizotrópia

1. BEVEZETÉS

A nagyszilárdságú lemezanyagok alkalmazása kiemelt szerepet játszik az autóiparban, a repülőgépgyártásban és számos más ipari szektorban. A súlycsökkentési és biztonsági követelmények miatt a mérnökök olyan anyagokat keresnek, amelyek nagy szilárdság mellett megfelelő alakíthatósággal

rendelkeznek. Az alakíthatóságot számos tényező befolyásolja, köztük az anizotrópia, amely meghatározza a lemezek mechanikai viselkedését a hengerlési irány függvényében [1], [2], [3], [4].

Az alakítási határdiagram (Forming Limit Diagram – FLD) egyik legfontosabb eleme az alakítási határgörbe (FLC), amely előrejelzi az adott feszültségállapotban fellépő alakváltozási határértékeket, így kulcsszerepet játszik a lemezalakítási folyamatok tervezésében. A korszerű végelelemes szoftverek lehetővé teszik az alakíthatóságot leíró numerikus modellek alkalmazását, jelentősen javítva a tervezési hatékonyságot. Az anyag anizotrópiájának figyelembevételével még pontosabb és megbízhatóbb modellek hozhatók létre, amelyek csökkentik a selejtarányt, optimalizálják a gyártási folyamatot és javítják a végtermék minőségét.

Az alakítási határdiagram módszerét Keeler és társai [5] dolgozták ki, akik a próbadarab felületére vitt mérőháló segítségével határozták meg a különböző főalakváltozásokat. Ezt a módszert továbbfejlesztették, és a teljes alakváltozási állapotot lefedő diagramokat alkottak meg [6]. Számos kutató épített erre az alagra [7], [8], [9], míg mások eltérő módszerekkel határozták meg az alakítási határdiagramot [10], [11].

Keeler és Brazier [12] megfigyelték, hogy a lágyacélok alakítási határdiagramjai hasonlóak, eltérés főként a síkalakváltozásra jellemző feszültségállapotban (FLC₀ pont) tapasztalható, amelyet a lemezvastagság és a keményedési kitevő alapján számoltak. Stören és Rice [13] a vékonylemezek inhomogenitásait vizsgálták, feszültséglokalizációs helyeket azonosítva, amelyek a tönkremenetel kiindulópontjaként szolgálnak. Az alakítási határdiagram meghatározási módszereit folyamatosan fejlesztették, mígnem 2008-ban a technológiai fejlődés és az empirikus kísérletek révén szabványosították [14].

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS KÍSÉRLETI MÓDSZEREK

Kísérleteink során kereskedelmi forgalomban kapható, közel tisztán ferrites szövetszerkezetű 1.0338 anyagminőségű (továbbiakban DC04) és ferrit-martenzites szövetszerkezetű HCT780X (továbbiakban DP800) lemezanyagokat használtunk fel. Az anyagtulajdonságok részletezése a következő alfejezetekben olvashatók.

2.1. DC04 és DP800 bemutatása

A DC04 hidegen hengerelt, alacsony széntartalmú lágy acél, ami elsősorban jó megmunkálhatóságával, alakíthatóságával jellemezhető. Főként azokon a területeken alkalmazzák ahol az alakíthatóság előnyt élvez a nagy szilárdsággal szemben. Az autóiparban főként funkcionális vagy esztétikai elemek gyártására alkalmazzák.

A kettős fázisú acélok a második generációs, nagy szilárdságú acélok közé tartoznak, és az autóiparban széles körben alkalmazzák. A lágyabb ferrit jó alakíthatóságot biztosít, míg a kemény martenzit magas szakítószilárdságot eredményez. Kiválóan alkalmasak a járműszerkezetek merevségének és energiaelnyelő képességének növelésére anélkül, hogy jelentősen növelnék a tömeget, így hozzájárulnak az üzemanyag-fogyasztás csökkenéséhez. [15] Tanulmányunkban a DP800 lemezanyagot vizsgáltuk 1 mm. névleges vastagságban, meghatározott fázisaránytal és szemcsemérettel. A felhasznált anyagok spektrometriás vizsgálattal megállapított anyagösszetételét az 1.táblázat foglalja össze.

1.táblázat Felhasznált anyagok anyagösszetétele

Anyagösszetétel (%)									
Anyag	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
DP800	97,70	0,10	0,21	1,58	0,01	0,00	0,05	0,04	0,05
DC04	99,50	0,05	0,02	0,23	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03

2.2. Szakítóvizsgálati eredmények

A szakítóvizsgálatot a korábban említett anyagokon, esetenként 3-3 db, a hengerlési iránnyal 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° fokot bezáró lemez szakító próbatesteken végeztük. A szakítóvizsgálatok Instron 4482 típusú anyagvizsgáló berendezésen végeztük, a hossz-és keresztirányú elmozdulások mérésére pedig

egy Instron 5585 típusú video-extensometert alkalmaztunk. A vizsgálat szobahőmérsékleten (23°C) folyt, a keresztfej mozgási sebessége pedig 4 mm/perc (8×10^{-4} 1/s).

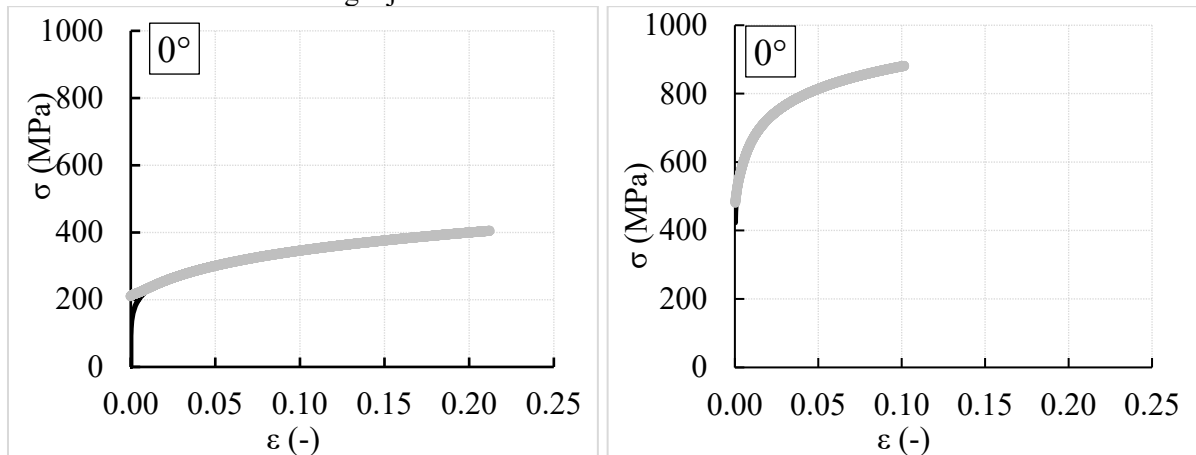
A kapott eredményekből meghatároztuk az anyagot jellemző folyásgörbét, amelyhez a közelítést a Nádai-féle folyásgörbe elmélettel végeztük:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (1)$$

ahol σ és ε az egyenértékű feszültséget és alakváltozást jelölik, K a szilárdsági konstans, n pedig a keményedési kitevő.

A különböző anyagok, hengerlési iránnyal 0° -ot bezáró mintadarabjainak folyásgörbéjét az 1. ábra szemlélteti.

Ezt követően meghatározásra kerültek a szakítóvizsgálatból meghatározható, legfontosabb mechanikai paraméterek. Ezeket a 2. táblázat foglalja össze.



1. ábra. DC04 (balról) és DP800 (jobbról) lemezanyagok folyásgörbéi; szürke jelölők: kísérleti eredmény; fekete folytonos vonal: Nádai-féle közelítés

A közelítés pontossága $R^2 = 0,966$ a DC04 anyagra és $0,997$ a DP800-ra.

2. táblázat – Szakítóvizsgálatból meghatározott mechanikai tulajdonság jellemzők

	Rp _{0.2} _átlag	UTS_átlag	K_átlag	n_átlag	r_átlag
DC04	229	336	533	0,174	1,601
DP800	462,8	763,8	1134,7	0,124	0,800

Ahol Rp_{0.2} a folyáshatár, UTS pedig a szakítószilárdságra utal. Az r-értékeket az egyenletes valódi nyúlás-1% értéknél adtuk meg a táblázatban.

3. ELMÉLETI SZÁMÍTÁSOK

Az elméleti számításokat a szakítóvizsgálatokból nyert anyagjellemzők segítségével, a Swift-féle legnagyobb erő kritérium elmélet és a Storen-Rice féle ún. vertex hipotézis elmélet felhasználásával végeztük. A levezetések mellőzésével a Swift-féle elmélet a (2-3) egyenletre, míg a Storen-Rice modell a (4) egyenletre vezet.

A Swift a legnagyobb erő kritérium (Maximum Force Criterion – MFC) elméletéből, a következő képletekkel számolja az ε_1 és az ε_2 értékeit, ha a Hill'48 folyási feltételt alkalmazzuk a differenciálások során:

$$\varepsilon_1 = \frac{[1+r(1-\alpha)] \cdot (1 - \frac{2*r}{1+r} \alpha + \alpha^2)}{(1+r)(1+\alpha) \cdot [1 - \frac{1+4*r+2*r^2}{(1+r)^2} \alpha + \alpha^2]} * n \quad (2)$$

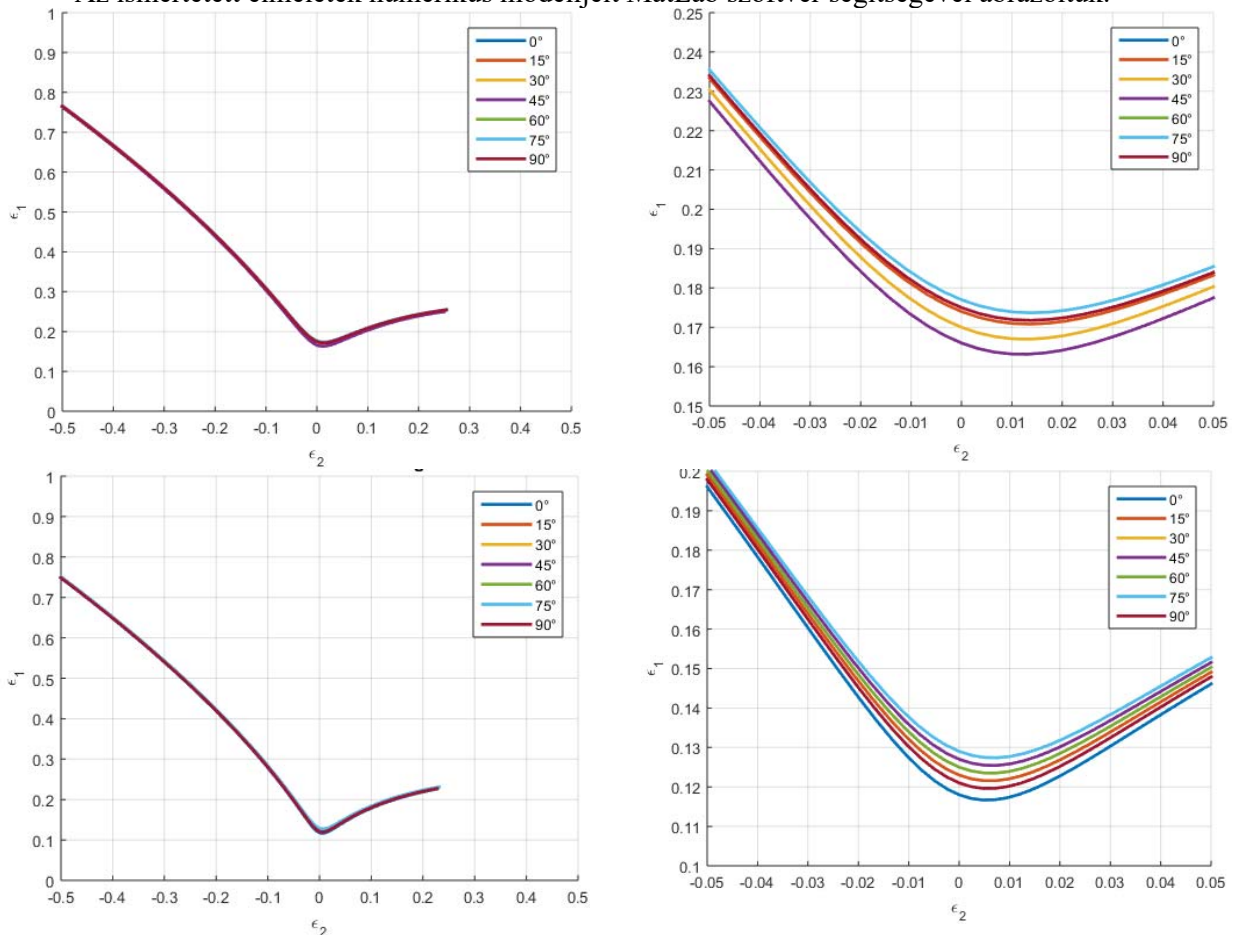
$$\varepsilon_2 = \frac{[(1+r)\alpha - 1] \cdot (1 - \frac{2*r}{1+r} \alpha + \alpha^2)}{(1+r)(1+\alpha) \cdot [1 - \frac{1+4*r+2*r^2}{(1+r)^2} \alpha + \alpha^2]} * n \quad (3)$$

Stören és Rice a tönkremenetelt (esetünkben lokális befűződést, vagy másnéven kontrakciót) jelentő főalakváltozásokat az alakváltozási elmélet (deformation theory) felhasználásával vezette le a különböző feszültségi (avagy alakváltozási-) állapotokra. Levezetésük eredményeként a nagyobb tönkremeneteli főalakváltozás számítható a

$$\varepsilon_1 = \frac{3\beta^2 + n(2+\beta)^2}{2(2+\beta)(1+\beta+\beta^2)} \quad (4)$$

3.1. Storen-Rice FLC modell alkalmazásával kapott eredmények

Az ismertett elméletek numerikus modelljeit MatLab szoftver segítségével ábrázoltuk.



2. ábra. DC04 (fent) és DP800 (lent) lemezanyagok alakítási határgörbéi 0...90 fok orientációkban...

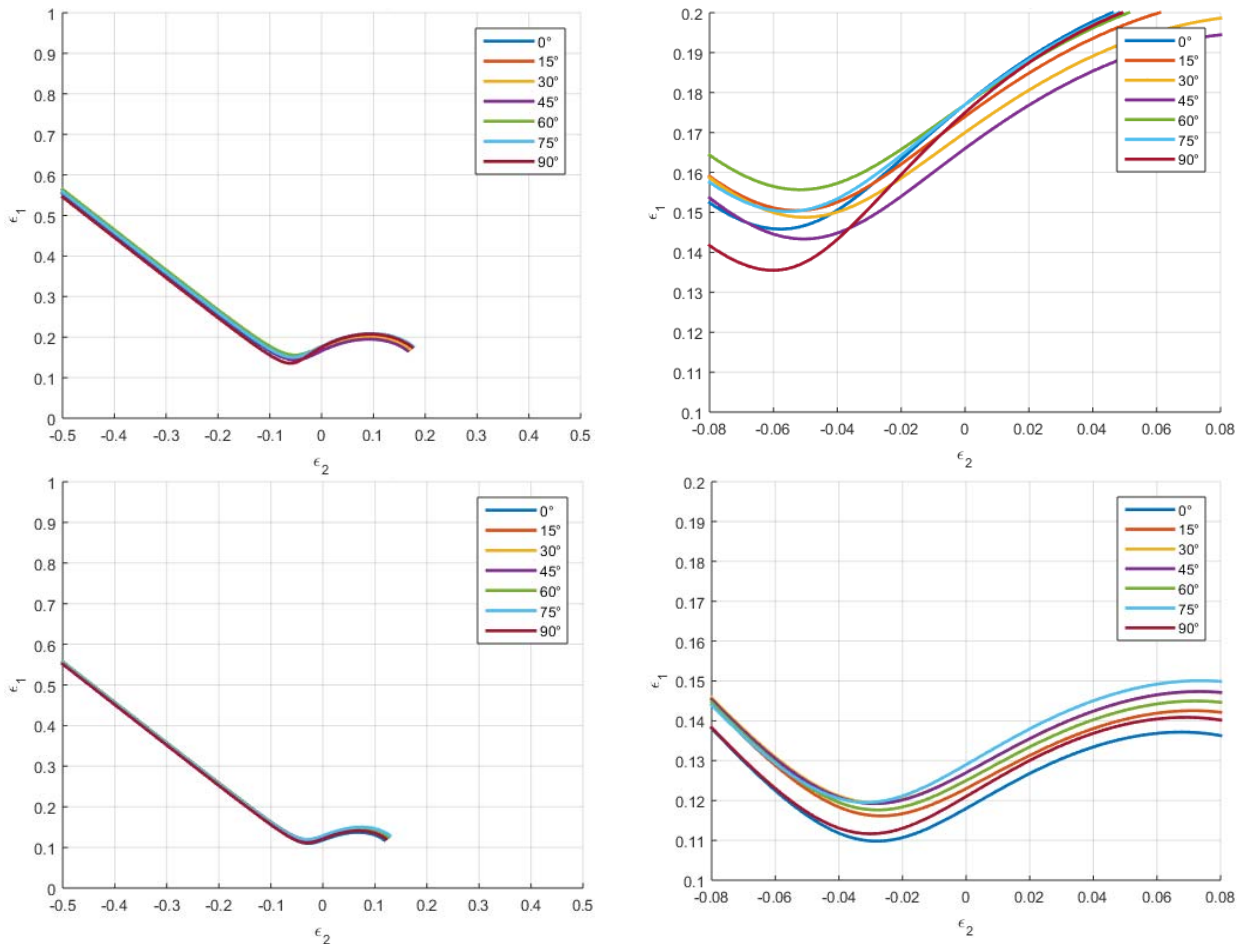
Az 2.ábráról leolvasható, hogy a DC04 esetében az alakítási határgörbék közül a legkritikusabbak a: 45, 30, 15°-os amelyek ebben a sorrendben növekedve helyezkednek el az alakítási határdiagramon. Ezen sorrend egybevág az egyes fokokhoz tartozó próbatestek n értékének alakulásával (sorrendben: $n = 0,166 - 45^\circ < n = 0,17 - 30^\circ < n = 0,174 - 15^\circ$). Hasonlóan a DP800-nál ahol az alakíthatóság tekintetében legalacsonyabb értékeket növekvő sorrendben a: 0, 90, 15°-os próbadarabok eredményezték, ami egybevág az n értékek alakulásával (sorrendben: $n = 0,118 - 0^\circ < n = 0,121 - 90^\circ < n = 0,123 - 15^\circ$). Ebből következik, hogy a Storen-Rice modell esetében a legkisebb n értékkel rendelkező minták FLC-je fogja a legalacsonyabban elhelyezkedő FLC-t eredményezni. Ez érthető, mert a Storen-Rice képletben csak az n érték, ami ezt befolyásolja.

3.2. Swift FLC modell alkalmazásával kapott eredmények

A Swift-féle modell (3.ábra) esetében a DC04 esetében az n érték növekvő sorrendben a 45°, 30°, 15°-os mintákhoz tartozik, viszont az alakítási határgörbék közül növekvő sorrendben a 90°, 45°, 0°-os próbadarabok határgörbéi találhatók, tehát a legkisebb n értékhez nem a legalacsonyabban helyezkedő alakítási határgörbe tartozik. Ezzel ellentétben a DP800-as anyagnál az n értékek alulról felfelé: 0, 90, 15°-os mintákhoz tartozik, ami viszont egybevág a görbék alakíthatóságának sorrendiségével. Tehát itt az alacsony r

érték nem befolyásolta a görbék alakulását, ebből kifolyólag a legkisebb n értékhez a legalacsonyabb határgörbe tartozik.

A fentiekből az következik, hogy az r értékétől függ, hogy a legkisebb n = legalacsonyabb határgörbe feltételezés teljesül-e, vagy sem. Tehát ha $r_{\text{átlag}} \geq 1,765$ akkor az anizotrópiát (Swift) is figyelembe kell venni az elméleti számításoknál, mert legkisebb $n \neq$ legalacsonyabb alakíthatóság, ha viszont $r_{\text{átlag}} \leq 0,779$ akkor elegendő az izotróp (Storen-Rice) összefüggés is, mert legkisebb n = legkisebb alakíthatóság.



3. ábra. DC04 (fent) és DP800 (lent) lemezanyagok alakítási határgörbái 0...90 fok orientációkban...

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünkben DC04 és DP800 alakíthatóságát vizsgáltuk, szakítóvizsgálatokból nyert anyagjellemzőkből számolt FLC-ken keresztül. A számításokhoz mindkét anyagból 15°-ként munkáltunk ki próbatesteket (0°...90°) a hengerlési irányhoz képest és szakítóvizsgálatot végeztünk rajtuk. A kapott eredmények alapján folyásgörbéket hoztunk létre a Nádai-féle folyásgörbéket leíró egyenlet segítségével és meghatároztuk az alapvető mechanikai tulajdonságokat. Ezek segítségével számításokat végeztünk a MatLab szoftverben a Swift és a Storen-Rice elméletekkel. Eredményeink alapján ha $r_{\text{átlag}} \geq 1,601$ miközben $n_{\text{átlag}} = 0,174$, akkor nem teljesül az, hogy ahol a legkisebb az n ott a legkisebb az alakíthatóság. Ezzel szemben ha $r_{\text{átlag}} \leq 0,779$ miközben $n_{\text{átlag}} = 0,124$, akkor teljesül, hogy a legkisebb n értékkel rendelkező próbadarab alakíthatósága lesz a legalacsonyabb. Ez rámutat arra a tényre, hogy bizonyos r -érték – n -érték kombinációk esetén figyelmen kívül hagyható az anizotrópia jelensége és izotróp határelméleteket használhatunk, míg bizonyos esetekben az anizotrópia befolyásolja az alakíthatóságot, ezáltal nem érvényesül az az elv miszerint a legkisebb n -értékhez tartozik a legkisebb alakíthatóság.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM EKÖÜ-24... KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.



A kutatás támogatásáért köszönetet mondunk a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak az „Új innovatív vésőgenerációk fejlesztése” 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00148 projektben.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Kleemola H. J. and Kumpulainen J. O., “Journal of Mechanical Working Technology,” vol. 3, 1980.
- [2] H. Gao, O. El Fakir, L. Wang, D. J. Politis, and Z. Li, “Forming limit prediction for hot stamping processes featuring non-isothermal and complex loading conditions,” *Int J Mech Sci*, vol. 131–132, pp. 792–810, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.IJMECSCI.2017.07.043.
- [3] S. Bagherzadeh, M. J. Mirnia, and B. Mollaei Dariani, “Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets,” *J Manuf Process*, vol. 18, pp. 131–140, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2015.03.004.
- [4] B. Ma, K. Diao, X. Wu, X. Li, M. Wan, and Z. Cai, “The effect of the through-thickness normal stress on sheet formability,” *J Manuf Process*, vol. 21, pp. 134–140, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2015.12.006.
- [5] Keeler S. P. and Backofen W. A., “Trans. ASM 56,” pp. 25–48, 1963.
- [6] Gorton M. Goodwin, “Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop on JSTOR,” *SAE Transactions*, vol. 77, 1968, Accessed: Sep. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/44565070>
- [7] J. E. Hockett and O. D. Sherby, “Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures,” *J Mech Phys Solids*, vol. 23, no. 2, pp. 87–98, Apr. 1975, doi: 10.1016/0022-5096(75)90018-6.
- [8] F. Barlat and K. Lian, “Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions,” *Int J Plast*, vol. 5, no. 1, pp. 51–66, Jan. 1989, doi: 10.1016/0749-6419(89)90019-3.
- [9] C. L. Chow, M. Jie, and S. J. Hu, “Forming limit analysis of sheet metals based on a generalized deformation theory,” *J Eng Mater Technol*, vol. 125, no. 3, pp. 260–265, 2003, doi: 10.1115/1.1586938.
- [10] “Predictive model of FLC (Arcelor model) upgraded to UHSS steels | IDDRG.” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://iddrg.com/download/predictive-model-of-flc-arcelor-model-upgraded-to-uhss-steels/>
- [11] M. Merklein, A. Kuppert, and M. Geiger, “Time dependent determination of forming limit diagrams,” *CIRP Annals*, vol. 59, no. 1, pp. 295–298, Jan. 2010, doi: 10.1016/J.CIRP.2010.03.001.
- [12] Stuart P. Keeler, “Determination of Forming Limits in Automotive Stampings,” *SAE Transactions*, vol. 75, 1966.
- [13] S. Stören and J. R. Rice, “Localized necking in thin sheets,” *J Mech Phys Solids*, vol. 23, no. 6, pp. 421–441, Dec. 1975, doi: 10.1016/0022-5096(75)90004-6.
- [14] “MSZ-EN-12004-2.”
- [15] T. Miklós, “Járműipari acélfejlesztések,” *A Gépípari tudományos egyesület műszaki folyóirata*, pp. 3–10, 2012.