

VÉKONYLEMEZ FOLYÁSGÖRBÉJÉNEK FELVÉTELE ZÖMÍTŐVIZSGÁLAT SEGÍTSÉGÉVEL

FLOW CURVE DEFINITION OF THIN SHEET BY UNIAXIAL COMPRESSION TESTS

Kölös Martin László^{0000-0002-4854-8687, 1*}, Borbély Richárd^{0000-0003-3391-2666, 1}, Szőke Dániel^{0000-0003-1232-2245, 1}, Béres Gábor József^{0000-0002-1496-5618, 1}

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

<https://doi.org/10.47833/2023.1.ENG.007>

Kulcsszavak:

Folyásgörbe
Vékonylemez
Zömítővizsgálat

Keywords:

Flow curve
Thin sheet
Compression test

Cikktörténet:

Beérkezett 2022. október 10.
Átdolgozva 2022. október 31.
Elfogadva 2022. november 5.

Összefoglalás

Ez a tanulmány egytengelyű nyomóvizsgálat eredményeit mutatja be a DC04 autóiipari vékonylemez folyásgörbéjének meghatározására. A folyásgörbe meghatározásának általános módszere a szakítóvizsgálat, amely a kontrakció jelensége miatt nem megbízható nagy alakváltozások esetén. Ezért nyomóvizsgálatot alkalmaztunk, amely két-három nagyságrenddel nagyobb alakváltozásokat eredményezett, mint húzás esetén. A súrlódás csökkentése érdekében kétféle kenőanyagot használtunk. A súrlódási együtthatót a próbatestek hordósodásának mérésével kaptuk meg úgy, hogy a próbatesteket a hengerlési irányban és arra merőlegesen is elvágtuk. A geometriai méréseket mikroszkóp segítségével hajtottuk végre. Az alakítási szilárdság meghatározásához a Siebel-egyenletet és a Christiansen et al. módszert használtuk. Végül, a folyásgörbegörbe kiszervezéséhez a Swift- és a Hockett-Sherby-egyenletet alkalmaztuk. Eredményeink azt mutatják, hogy bár a folyásgörbe jó közelítéssel ábrázolható, a kis lemezvastagságok nagy szórást eredményeznek.

Abstract

This study presents the experimental results of uniaxial compression test for determining the flow curve of DC04 automotive thin sheet. The common method for flow curve definition is the tensile test, which is not reliable for high strains due to the necking phenomenon. For this reason, we used compression test that resulted two-or- three magnitude higher strains than in case of tension. To lower the friction, two types of lubricants were used. The friction coefficient was obtained by measuring the buckling of the test pieces following the cutting of all the specimens in the rolling direction and perpendicular to it. For measuring the geometry, microscopic investigations were used. To obtain the flow stress, the Siebel equation and the

* Kapcsolattartó szerző: martin981021@gmail.com

Christiansen et al. method were used. Lastly, the Swift and Hockett-Sherby equations were applied for the calculation of the flow curve. Our results show that although the flow curve can be plotted with good approximation, the small sheet thicknesses result in large scatter.

1. Bevezetés

Napjainkban a lemezanyagok jelentősége az iparban egyre nő. Számos lemezalakítási technológiát használnak nap mint nap, amelyek egyik nagyon fontos bemeneti paramétere a folyásgörbe. Egy adott anyag folyásgörbéjének meghatározásához fontos, hogy lehetőség szerint olyan módszert alkalmazzunk, amely közel azonos alakítási körülményeket eredményez azzal a technológiával, amellyel az anyagot alakítani fogjuk.

Kutatásunkban a végső cél az volt, hogy az eredményeinket felhasználhassuk a folyásgörbe meghatározásához, nagyobb alakváltozási tartományban, mint amit a szakítóvizsgálatok esetén el lehetett érni. Ennek elérése érdekében egytengelyű nyomóvizsgálatokat alkalmaztunk.

Ezen a területen Nobuo Yoshikawa és szerzőtársai olyan próbatesteket alkalmaztak a kísérlethez, amelyek előzetes alakváltozáson estek át. Számos nyírási vizsgálatot végeztek, különböző mértékben előalakított lemezeken [1]. A módszer hátránya, hogy a lemezek előalakítása és a vizsgálatok kiértékelése nagyon időigényes folyamat. M. Merklein és szerzőtársai [2] a folyásgörbe kiszervezése érdekében ún. halmaznyomós vizsgálatot végzett. A módszer lényege, hogy több próbatestet helyezünk egymásra melyek egyező paraméterekkel rendelkeznek, majd zömítővizsgálatot hajtunk végre rajtuk. A vizsgálatok során olyan próbatesteket alkalmaztak melyek hossz és átmérő aránya egyenlő volt egyel. Az említett módszer hatalmas hátránya, hogy a vizsgálat megfelelő kiértékeléséhez két 3D-s optikai alakváltozásmérő rendszerre van szükség. Marcel Graf és szerzőtársai azt a körülményt vizsgálták, hogy jól meghatározott paraméterekkel és közel azonos tulajdonságokkal rendelkező próbatestek esetében hogyan viszonyulnak egymáshoz a különböző folyásgörbék felvételi módszerei. Arra a következtetésre jutottak, hogy a megfelelő korrekciós tényező alkalmazásával jó közelítéseket lehet elérni [3].

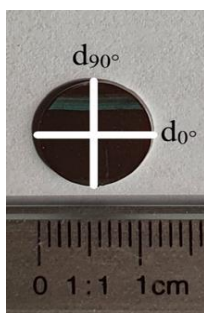
A korábbi szakirodalmi eredmények mind azt mutatják, hogy egy adott anyag folyásgörbéje számtalan módon felvehető, de a legtöbb eljárás nehézkes és bonyolult. Ezért a legkézenfekvőbb módszernek azt tartottuk, ha egyszerű nyomóvizsgálatokat végzünk el a próbatesteken, és különböző terhelések esetében vizsgáljuk a geometriai alakváltozásokat. A következő fejezetekben, ezt a módszert fogjuk bemutatni.

2. Felhasznált anyagok és eljárások

A vizsgálat alapanyagául a DC04 jelű hidegen hengerelt lágyacélt választottuk, melynek ferrites szövetszerkezete kiváló alakíthatósági tulajdonságokat eredményez. A névleges lemezvastagság 1mm volt.

2.1. A próbatestek jellemzői

A vizsgálatához lézersugaras eljárással kimunkált, korong alakú próbatesteket használtunk, amelyek közül egy példa az 1. ábrán látható. Az ábrán jelöltük a hengerlési irányt (d_{0°), és az arra merőleges irányt is (d_{90°).



2.1 ábra: A vizsgálatainkban alkalmazott korong alakú próbatest

A próbatesteket táblalemezből vágtuk ki a Trumpf TruLaser Cell 7020 nevű berendezés segítségével, ami egy 4KW teljesítményű, diódasugárforrású lézer. A készülék vágási pontossága $\pm 0,02$ mm. A vágást nitrogéngáz alkalmazása mellett végeztük.

A próbatestek magassága megegyezett a lemez vastagságával, ami $1\pm 0,02$ mm. A próbatestek névleges átmérője 10 mm volt. Ez rendkívül kis magasság-átmérő viszonyszámot eredményezett.

2.2. A zömítővizsgálat

A zömítővizsgálatot ZD40 univerzális anyagvizsgáló berendezésen, sík lapok között hajtottuk végre, melyet a 2.2 ábra szemléltet.



2.2 ábra: ZD40 univerzális anyagvizsgáló berendezés

Ez egy jelentős erőkifejtésre (max. 400 [kN]) képes hidraulikus berendezés, ezáltal nagy alakváltozások érhetők el. A vizsgálat során öt különböző terhelési szintet alkalmaztunk, melyek névleges értékei szám szerint 80; 120; 160; 200; 240 [kN] voltak. A zömítés szobahőmérsékleten történt, egyenletes keresztfej elmozdulási sebességgel. A súrlódás minimalizálása érdekében két féle kenési módszert alkalmaztunk. Az első esetben vékony ($\sim 0,05$ mm) poliamid fólia és BWS típusú kenőolaj, még a második esetben vékony ($\sim 0,1$ mm) politetrafluoretilén fólia és BWS típusú kenőolaj párosítását alkalmaztunk. Ezt a kenési rendszert, amelyben szilárd és folyékony halmazállapotú kenőanyag együttes alkalmazása történik, szendvics kenésnek nevezzük.

A kísérlet szempontjából kiemelt fontosságú, hogy a súrlódást a lehető legjobban lecsökkentsük, így csökkentve az abból származó bizonytalanságot. Azért választottuk ezeket a kenőanyag párosításokat, mert kimondottan jó súrlódás csökkentő hatással bírnak.

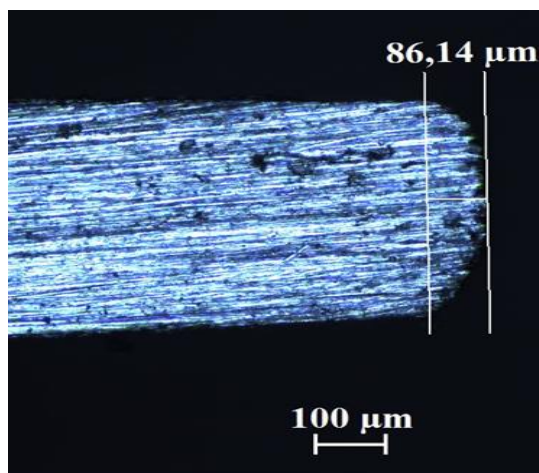
2.3. A geometria mérése

Ilyen magasság-átmérő viszony esetén igen nagy kihívást jelent a hordósodás jelenségének mérése. Mindenekelőtt, a próbatesteket ketté kellett vágni a hengerlési iránynak megfelelő, és arra merőleges irányban is. Annak érdekében, hogy ez kivitelezhető legyen pontos és stabil rögzítést alkalmaztunk a metszetvágás során.

A vágást a Wirtz Cuto 20 abrazív tárcsás precíziós vágóberendezésen hajtottuk végre. Ezután minden munkadarabon mikroszkópi vizsgálatot végeztünk. A vizsgálat célja a hordósodás mértékének mérése volt. Ez, definíció szerint a véglapok átmérője és a középátmérő közötti távolság (ld. 2.3 ábra).

A mikroszkópi mérések előtt a próbatesteket sorjátlanítás céljából enyhén megcsiszoltuk. A csiszolást két lépésben végeztük el. Először 1200-as csiszolópapírt, majd 2400-as csiszolópapírt használtunk.

A méréshez Zeiss Axio Imager.M2m fémmikroszkópot használtunk. Ahhoz, hogy a vágott felületről megfelelő minőségű képet készíthessünk, a mikroszkóp Z irányú fókuszkorrekcióját használtuk fel. Ezzel a megoldással, ez, a mikroszkópi mérések szempontjából durva felület is jól kivehetővé és a geometriai jellemzők értékelhetővé váltak. A 2.3 ábra egy 240 kN-nal összenyomott próbadarab hordósodását mutatja 5-szörös nagyításban. A vágás a hengerlési irányban történt.



2.3 ábra: A 240 kN-al összenyomott próbatest hordósodása

2.4. A súrlódási együttható meghatározása

A súrlódás jelensége nagy mértékben befolyásolja a folyásgörbe alakját. Ennek következtében elengedhetetlen a megfelelő kenési feltételek kialakítása. A mért geometriai elváltozások fontos szerepet játszanak a súrlódási együttható meghatározásában, ezért bevezetésre került az R-alaki tényező átlagos értéke, amely a vastagság változásból származtatható:

$$R_{ave} = r_0 * \sqrt{\frac{h_0}{h_v}} \quad (1)$$

Ebben a képletben r_0 a munkadarab kiinduló sugara, h_0 a kiinduló magasság, h_v pedig a zömítés utáni magasság. Irodalmi adatokra támaszkodva bevezettük továbbá a súrlódásra érzékeny alaki tényezőt [4]:

$$b = 4 * \frac{\Delta r}{R_{ave}} * \frac{h_v}{\Delta h} \quad (2)$$

ahol Δr a sugár megváltozásának a mértéke, $\Delta h = h_0 - h_v$ pedig a próbatest magasságának megváltozása. A fentiekből a Kudo féle súrlódástényezőt (m) a következőképpen határoztuk meg [5]:

$$m = \frac{\left(\frac{R_{ave}}{h_v}\right) * b}{\left(\frac{4}{\sqrt{3}}\right) - \left(\frac{2b}{3\sqrt{3}}\right)} \quad (3)$$

A (3) összefüggésből a Coulomb súrlódási tényezőt a következő módon származtattuk [6]:

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

A számolások a következő súrlódási együtthatókat eredményezték (1. Táblázat.).

1. táblázat: A becsült súrlódási együtthatók

1. 90°	1. 0°	2. 90°	2. 0°
μ	μ	μ	μ
0,190	0,187	0,161	0,211
0,126	0,138	0,117	0,160
0,130	0,152	0,116	0,151
0,119	0,117	0,110	0,124
0,149	0,144	0,122	0,126

Az 1. Táblázat fejlécében az "1." a poliamid és olajkenést jelöli, még a "2." a politetrafluoretilén és olajkenést.

2.5. Az alakváltozás és az alakítási szilárdság származtatása

Az alakváltozások kiszámításához az alábbi egyenlet került felhasználásra [7]:

$$\bar{\varepsilon} = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \left(\frac{h_0 - \Delta h}{h_0} \right) \quad (5)$$

azaz a magasság értékeket vettük figyelembe, és a kapott értékeket abszolút értékeit tüntettük fel a folyásgörbén. Az alakítási szilárdság ugyanakkor, kétféleképpen került kiszámításra. Első esetben a Siebel féle összefüggést alkalmaztuk:

$$k_R(\bar{\varepsilon}) \cong \sigma_f(\bar{\varepsilon}) \left[1 + \frac{2\mu r(\bar{\varepsilon})}{3h(\bar{\varepsilon})} \right] \quad (6)$$

Itt $k_R(\bar{\varepsilon})$ az alakítási ellenállásra, $\sigma_f(\bar{\varepsilon})$ pedig az alakítási szilárdságra utal. Második esetben Christiansen összefüggése [5] alapján is meghatároztuk az alakítási szilárdságot, amelyet a szerzők a következő formulával írtak le:

$$\bar{P} = 2\sigma_f \left(\frac{h_0 - \Delta h}{\mu(D_0 + \Delta D)} \right)^2 \left[\exp \left(\frac{\mu(D_0 + \Delta D)}{h_0 - \Delta h} \right) - \frac{\mu(D_0 + \Delta D)}{h_0 - \Delta h} - 1 \right] \quad (7)$$

Az egyenletben \bar{P} a felületi nyomás, és az eddigiekben még nem használt kifejezés a D_0 , amely a munkadarab kezdeti átmérője.

3. Az eredmények

A Swift féle folyásgörbe egyenletet [8] és a Hockett-Sherby féle folyásgörbe egyenletet [9] illesztettük a jelen nyomóvizsgálatok eredményeivel kiegészített, korábbi szakítóvizsgálati pontsorokra. A Swift-egyenlet, ahol K [MPa], S_0 [-] és n [-] anyagi jellemzők az alábbi összefüggéssel írható le:

$$\sigma_f = K * (S_0 + \varepsilon)^n \quad (8)$$

a Hockett-Sherby féle folyásgörbe egyenlet pedig az alábbi módon írható le:

$$\sigma_f = \sigma_s - \exp(-(N\varepsilon)^p) (\sigma_s - \sigma_y) \quad (9)$$

A képletekben szereplő paraméterek σ_s [MPa], N [-] és p [-] anyagi paraméterek, σ_y [MPa] pedig a folyáshatárra utal. Az illesztéssel kapott paramétereket a 3.1, 3.2 táblázatokban figyelhetjük meg

Az illesztés elvégzése után a következő eredményeket kaptuk. A 3.1 ábra és a 3.2 ábra azt az esetet mutatja, amikor poliamid és olajkenést alkalmaztunk. A 3.1 táblázat szemlélteti a kapott paramétereket.

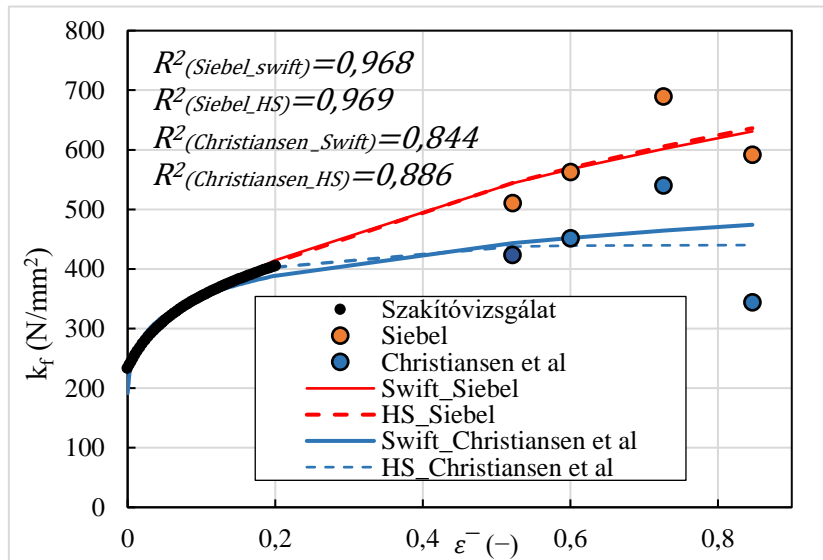
3.1 táblázat: A kapott paraméterek

Swift	K [MPa]	S_0 [-]	n [-]	Hockett-S.	σ_s [MPa]	N [-]	p [-]	σ_y [MPa]
Min.- Max.	442,44- 653,89	0- 0,0504	0,104- 0,33		388,23- 1720,83	0,196- 14,24	0,66- 1,345	244

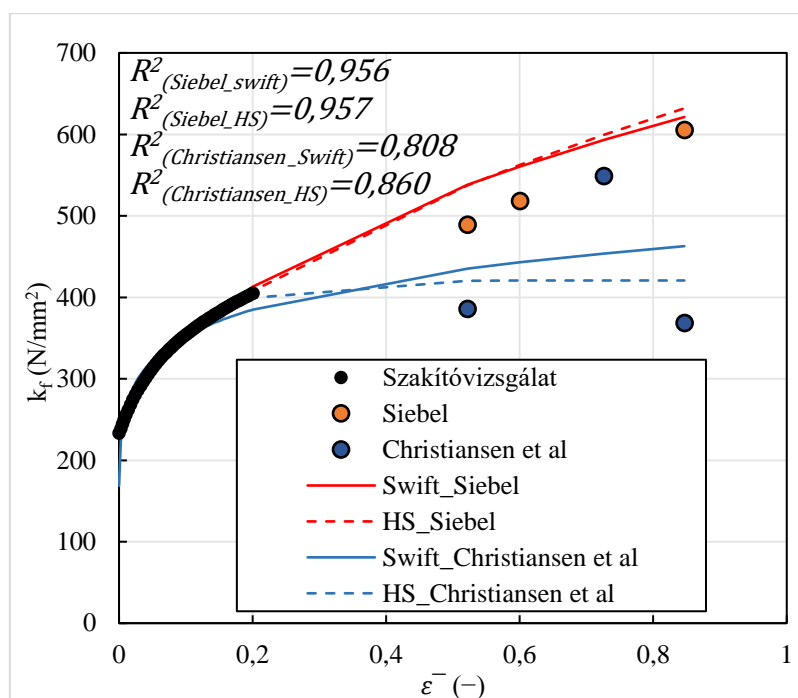
Az ábrákon (3.1; 3.2; 3.3; 3.4 ábra) a fekete pontsorozatból álló görbe a szakítóvizsgálatból kinyert adathalmaz. A fekete szegéllyel rendelkező kék pontok, a Christiansen féle összefüggés segítségével kapott értékeket, még a fekete szegéllyel rendelkező narancssárga pontok a Siebel féle összefüggéssel kinyert értékeket jelölik. Ehhez a jelölési formához hűen, kék színnel ábrázoltuk a Christiansen összefüggés által kinyert értékekre illesztett folyásgörbéket, még a Siebel féle egyenletből kinyert pontokra illesztett folyásgörbéket narancssárga színnel jelöltük. A Swift féle egyenlet által illesztett folyásgörbét mindkét esetben folytonos vonallal jelöltük. A Hockett-Sherby féle folyásgörbe egyenlet illesztése után kapott folyásgörbét az eltérő esetekben szaggatott vonallal ábrázoltuk.

Annak érdekében, hogy minimalizáljuk a súrlódást az érintkező felületek között, két különböző kenési eljárást alkalmaztunk. Összességében elmondható, hogy a geometriai méretekből származtatott súrlódási együttható értékek (1. táblázat) között nincs számottevő különbség. Kijelenthető, hogy a két kenési módszer közel azonos súrlódási körülményeket biztosít.

A különbség az alkalmazott kenési módszerek között abban nyilvánul meg, hogy a vékony politetrafluoretilén fólia és kenőolaj párosítás esetén a folyásgörbék (3.3; 3.4 ábra) kisebb szöget zárnak be, ezáltal karakterisztikájuk nem annyira széttartó, mint vékony poliamid fólia és kenőolaj esetén (3.1; 3.2 ábra). Az R^2 jelöli az illesztés pontosságát. Ha $R^2=1$, akkor tökéletes az illesztés.



3.1 ábra DC04 -es lemezanyag zömítő- és szakítóvizsgálatokból meghatározott folyásgörbéje, poliamid és olaj kenés esetén, orientáció: 0°

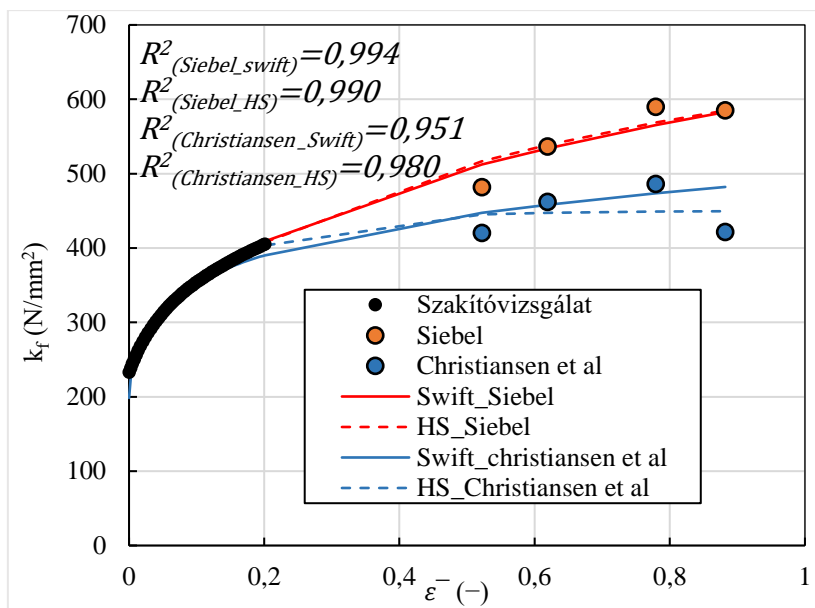


3.2 ábra: DC04 -es lemezanyag zömítő- és szakítóvizsgálatokból meghatározott folyásgörbéje, poliamid és olaj kenés esetén, orientáció: 90°

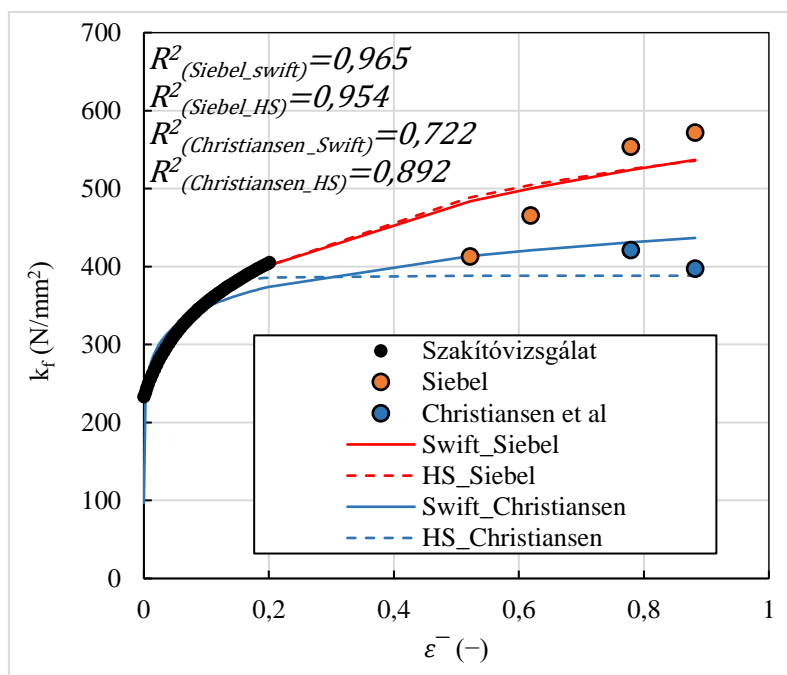
Az 3.3 és 3.4 ábrán látható a mért és számított adatok alapján felvett folyásgörbéje azoknak a próbatesteknek, melyeken politetrafluoretilén és olaj kenést alkalmaztunk. Az 3.3 ábrán a hengerlési irányra vett 0° látható még az 3.4 ábrán a 90° -os eset.

A diagrammokon (3.1; 3.2; 3.3; 3.4 ábra) jól megfigyelhető, hogy azonos alakváltozások esetén a Siebel egyenlet minden esetben nagyobb alakítási szilárdságot eredményez, mint Christiansen féle összefüggés.

Ami az eredmények szórását illeti, összességében elmondható, hogy minden orientáció, valamint minden kenési eljárás esetén a Siebel féle összefüggéssel származtatott alakítási szilárdság értékek kisebb szórással rendelkeznek. A folyásgörbék ennek következtében szemmel láthatóan szorosabban illeszkednek egymásra, mint azt a Christiansen féle összefüggés alapján származtatott értékek esetén tapasztaljuk.



3.3 ábra: DC04 -es lemezanyag zömítő- és szakítóvizsgálatokból meghatározott folyásgörbéje, politetrafluoretilén és olaj kenés esetén, orientáció: 0°



3.4 ábra: DC04 -es lemezanyag zömítő- és szakítóvizsgálatokból meghatározott folyásgörbéje, politetrafluoretilén és olaj kenés esetén, orientáció: 90°

A diagramokon (3.1; 3.2; 3.3; 3.4) jól látható, hogy nem került jelölésre minden mérési eredmény. Ennek az az oka, hogy ezeknél a pontoknál jelentős mértékű hiba lépett fel, így ábrázolásuk rontaná az illeszthetőséget.

4. Összegzés

Egytengelyű zömítő vizsgálatokat hajtottunk végre a DC04 vékony (1 mm-es névleges vastagságú) lemezanyagon.

A kísérleteket öt különböző terhelés esetén hajtottuk végre, melyek szám szerint: 80; 120; 160; 200 és 240 [kN] voltak. Ezt követően vizsgáltuk a geometriai változásokat magasság irányban és átmérő irányban, a hengerlési iránynak megfelelően és arra merőlegesen.

Mikroszkópi vizsgálatokkal megállapításra került a hordósodás mértéke az összes munkadarab esetén, amely segítségével meghatározhatóvá vált a Coulomb-féle súrlódási tényező. Ezt követően korrekciót hajtottunk végre az alakítási ellenállás értékén, hogy az alakítási szilárdság kifejezhető legyen. Az alakváltozás mértéke a lemez vastagság csökkenéséből került származtatásra.

A DC04-es anyag szakítóvizsgálatainak eredményeit és a számításainkból keletkező, a realitásnak megfelelő eredményeinket grafikonon ábrázoltuk. Ezekre a pontokra később illesztésre került a Swift és a Hockett-Sherby féle folyásgörbe egyenlet. Az így létrejött görbék alkotják a folyásgörbét az adott számolási módszerrel szerzett eredmények esetére.

Eredményeinkből látható, hogy a vékony lemezek összenyomására kapott feszültségértékek viszonylag nagyfokú bizonytalanságot tartalmaznak. Ennek oka lehet a mérésekből vagy a számításokból adódó pontatlanság. Jövőbeni kutatásaink során tervezzük megvizsgálni azokat a tényezőket, amelyek potenciális hibaforrások lehetnek.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani a Neumann János egyetemnek, amiért rendelkezésünkre bocsájtotta a szükséges anyagokat és berendezéseket, melyek elengedhetetlenek voltak a kutatás elvégzéséhez. Ezenfelül szeretnénk köszönetet mondani minden kedves kollegánknak, aki valamilyen módon hozzájárultak és segítettek munkánkat.

Irodalomjegyzék

- [1] Nobuo Yoshikawa et al., Development of measurement method of work hardening behavior in large plastic strain for sheet metal forging, *Iopscience Journal of Physics, Conference Series* 734 (2016), DOI:10.1088/1742-6596/734/3/032050.
- [2] M. Merklein, A. Kuppert, A METHOD FOR THE LAYER COMPRESSION TEST CONSIDERING THE ANISOTROPIC MATERIAL BEHAVIOR, *Int J Mater Form* (2009) Vol. 2 Suppl 1:483–486, Springer/ESAFORM (2009), DOI: 10.1007/s12289-009-0592-8.
- [3] Marcel Graf, Sebastian Fritsch, Birgit Awiszus, Determination of Forming Behaviour of EN AW-6060 by Different Testing Methods under Cold Bulk Forming Conditions, *ScienceDirect, 23rd International Conference on Material Forming ESAFORM* (2020), DOI:10.1016/j.promfg.2020.04.339.
- [4] Soheil Solhjoo, A note on “Barrel Compression Test”: A method for evaluation of friction, *Computational Materials Science* 49,435–438, (2010) DOI: 10.1016/j.commatsci.2010.04.047.
- [5] P. Christiansen, P.A.F. Martins, N.Bay, Friction Compensation in the Upsetting of Cylindrical Test Specimens, *Experimental Mechanics*, 56:1271–1279, (2016), DOI: 10.1007/s11340-016-0164-z.
- [6] Yang et al., Flow stress of wrought magnesium alloys during hot compression deformation at medium and high temperatures, *Mater Sci Eng A*, Vol 499 No 1 2 pp 238 241 (2009), DOI: 10.1016/j.msea.2007.11.106.
- [7] Kurt Lange et al., *Handbook of Metalforming*, Soceity of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan 48121, U.S.A, (1985).
- [8] Xin-cun Zhuang et al., Determination of Flow Curve and Plastic Anisotropy of Medium-thick Metal Plate: Experiments and Inverse Analysis, *Journal of Iron and Steel Research, International*, (2015), DOI: 10.1016/S1006-706X(15)30033-9.
- [9] J. E. Hockett, O. D. Sherby, Large Strain Deformation of Polycrystalline Metals At Low Homologous Temperature, *J. Mech. Phys. Solids*, (1975).