

SÍKALAKVÁLTOZÁSI FESZÜLTSEGI ÁLLAPOTOT MEGTESTESÍTŐ NYOMÓVIZSGÁLATOK KÍSÉRLETI ELEMZÉSE

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PLANE STRAIN COMPRESSION TESTS

Szauter Bálint [0009-0001-1107-0106](https://orcid.org/0009-0001-1107-0106), Köllös Martin László [0000-0002-4854-8687](https://orcid.org/0000-0002-4854-8687),
Borbély Richárd [0000-0003-3391-2666](https://orcid.org/0000-0003-3391-2666), Béres Gábor József [0000-0002-1496-5618](https://orcid.org/0000-0002-1496-5618)*

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

<https://doi.org/10.47833/2025.1.ENG.006>

Kulcsszavak:

Kéttengelyű feszültségi állapot
Folyásgörbe felvétel
Vékony lemezek
Halmazzómitó vizsgálat
Nyomóvizsgálat

Keywords:

Plane strain condition
Flow curve
Sheet metal
Stack compression test

Cikk történet:

Beérkezett 2025. január 27.
Átdolgozva 2025. március 6.
Elfogadva 2025. március 12.

Összefoglalás

A tanulmány a síkalakváltozási feszültségi állapotot reprezentáló nyomóvizsgálatok kísérleti elemzését ismerteti a kéttengelyű feszültségi állapotban mutatott anyagi viselkedés és a nagy alakváltozásokra érvényes folyásgörbék kutatása céljából, vékony lemezek esetén. Vékony lemezeknél ugyanis nehézségekbe ütközik a geometriai feltételeknek való megfelelés, amelyet kutatásunk során fő szempontként értékeltünk ki. A vizsgálatok hidegen hengerelt, túlnyomó részt ferrites szövetszerkezetű, 1,0 mm névleges lemezzvastagságú autópári lemezek (DC04) kerültek elvégzésre. A munkánk során azt vizsgáltuk, hogy több lemezt egymásra helyezve, az úgynevezett halmazzómitó vizsgálatok elvét felhasználva, síkalakváltozási nyomópróbákkal milyen törvényszerűségek szerint vehető fel a folyásgörbe. A kísérletek eredményei alapján kijelenthető, hogy a halmazzómitó vagy tömbösített síkalakváltozási nyomópróba alkalmas a nagy alakváltozási tartományokat lefedő folyásgörbék felvételére és a síkalakváltozási állapot feltételét jelentő geometriai határok kiterjesztésére.

Abstract

This study presents experimental analysis of compressive tests representing plane strain state with special attention on the material behavior in this biaxial stress state and on the flow curves for large deformations, related to thin sheets. The main difficulty of this method is the compliance with geometrical constraints, and this was evaluated as a main aspect of our research. The tests were carried out on cold rolled, ferritic, automotive sheets (DC04) in 1,0 mm nominal thickness. During our work we investigated the nature of the flow curve that was obtained by stacking (superimposing) several sheets, using the principle of so-called stack compression tests. The results of the experiments indicate that stacked plane strain compression tests

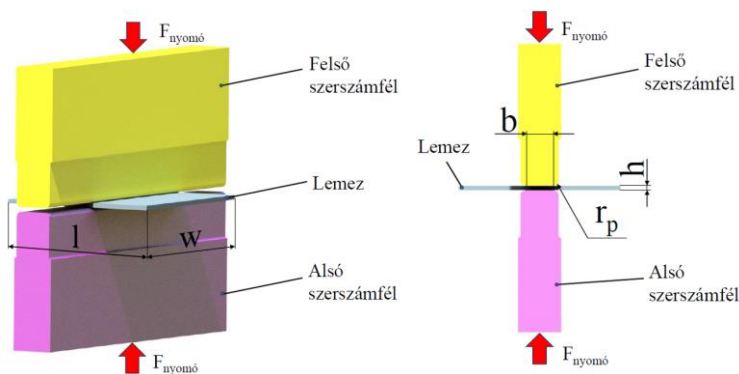
* Kapcsolattartó szerző. email: beres.gabor@nje.hu

are suitable for recording flow curves covering large strain ranges and help the extension of the geometric conditions for thin sheets.

1. Bevezetés

A nyomóvizsgálatok egyik speciális változata a lapos próbatestek síkalakváltozási állapotban történő zömítése. Ezen vizsgálat alapelve, hogy a szerszám-próbatest egy bizonyos geometriai méretarányának megfelelő megválasztásával a próbatestben gyakorlatilag kéttengelyű, síkalakváltozási állapot biztosítható. Hivatkozni a módszerre, síkalakváltozási nyomó- vagy zömítővizsgálatként, angolul plane strain compression test-ként, röviden PSCT néven szoktak a kutatók. A kísérletet először Nádai és szerzőtársai [1] alkalmazták, a folyamat tökéletesítését Watts és munkatársai, illetve Sellars és munkatársai végezték el [2].

A síkalakváltozási nyomóvizsgálatokat két azonos, egymással szemben, egy síkban elhelyezkedő, téglatest alakú, sok esetben HSS anyagminőségű szerszámmal végzik (1. ábra). A szerszámok szélein lekerekítés alkalmazható a nem kívánt nyírási viszonyok fellépésének elkerülése, valószínűségének csökkentése érdekében [3]. A szerszámok által terhelt területen a próbatestben kéttengelyű, nyomó feszültségi állapot jön létre, melyet a síkalakváltozási feszültségi állapotot meghatározó geometriai feltételek biztosítanak (1. táblázat). Ezen geometriai viszonyok alapján kerül meghatározásra mind a szerszámok, mind pedig a próbatestek befoglaló méretei. A fontosabb paraméterek az 1. ábrán láthatók, ahol l a próbatest lemez hosszúsága, w a szélessége, h a vastagsága, továbbá b a szerszámok szélessége és r_p a szerszámok lekerekítési sugara (ha van).



1. ábra: Síkalakváltozási nyomóvizsgálat felépítése

A geometriai viszonyok közül a legfontosabb a lemez szélesség és szerszám szélesség arány (w/b viszony – ezt említi a témával foglalkozó legtöbb irodalom), de ezen kívül vizsgáltuk még a lemezvastagság és szerszám szélesség (h/b), illetve a lemez hosszúság és szerszám szélesség viszonyát (l/b) a próbatestek kialakításához. A kiemelt feltételekre vonatkozóan különböző kutatók által meghatározott határértékeket szemléltet az 1. táblázat.

1. táblázat: Síkalakváltozási feszültségi állapot geometriai feltételei

források	w/b	h/b	l/b
Graf et al. [2]	≥ 3 (≥ 12)	< 1	> 3
Chermette et al. [3]	≥ 6	$1/4 \leq \dots \leq 1$	> 3
Banabic et al. [4]	≥ 10	-	-
Nuttakorn et al. [5]	≥ 5	$1/4 \leq \dots \leq 1/2$	-
Mohebbi et al. [6]	$12 \geq \dots \geq 5$	$1/4 \leq \dots \leq 1/2$	-
Loveday et al. [7]	≥ 5	-	> 3
Becker, Pöhlandt et al. [8]	> 6	-	-

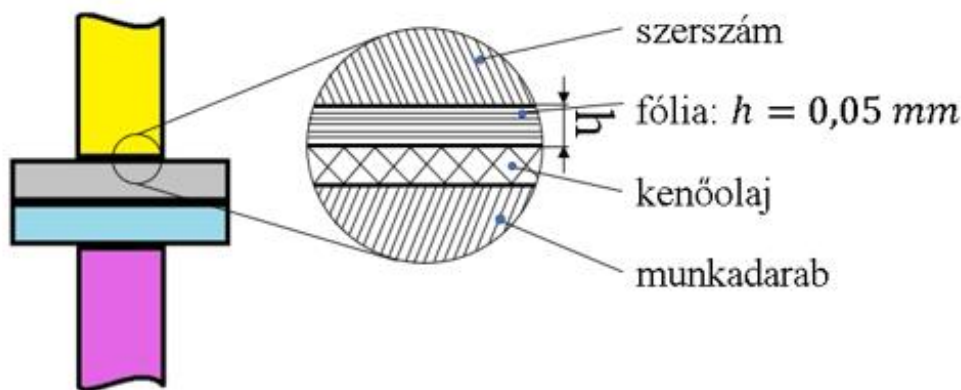
Kutatásunk során a több lemez egymásra halmozásából kapott eredményeket hasonlítottuk az egyedülálló lemez nyomóvizsgálatának esetéhez, megfigyelve azt, hogy miként alkalmazhatók a halmozott próbatestek folyásgörbék felvételére és a geometriai kényszerek kiszélesítésére. 1 mm-nél vékonyabb lemezek esetén ugyanis a h/b viszony $1/4 \dots 1/2$ között való tartása nagy kihívást jelent a szerszámkészítő számára, továbbá a kis szerszámfelületek csökkentik a mérési módszer robusztusságát (egy 0,8 mm névleges vastagságú lemeznél a megengedett legnagyobb szerszámszélesség mindössze 1,6 mm lehet).

2. Vizsgálatok kivitelezése

2.1. Mérési környezet felépítése

Az alkalmazott vizsgáló berendezés egy univerzális anyagvizsgáló gép, egy Instron 5900R 4482 típusú berendezés volt. A szóban forgó vizsgáló berendezés 100 kN-os erőmérő cellával van felszerelve, de biztonsági okokból olyan programot alkalmaztunk, mely 90 kN-nál a berendezéssel összeköttetésben álló BlueHill3 szoftveren keresztül leállította a keresztfej mozgását. A keresztfej elmozdulásának sebességét 0,10, és 0,20 mm/min értékeknek vettük fel, az egyedülállóként vizsgált és a halmozott lemezpróbatetek kiinduló vastagságától függően úgy, hogy a vizsgálati próbatetest magasságot tízzel osztottuk. Így megközelítőleg $0,0017 \text{ s}^{-1}$ alakváltozási sebességgel zajlottak a vizsgálatok, fenntartva a kvázi-statisz sebeségi viszonyokat. A mérésekhez használt szerszámok HSS anyagú hasábokból készültek el. A méréseket egy adott esetre háromszoros ismétléssel végeztük el.

A vizsgálatokhoz fontos a kenés alkalmazása a szerszámok és a próbatestek között, ezzel csökkentve a súrlódás fellépését és a belőle származó befolyásoló tényezőket [9]. Kutatásunk során összetett kenést alkalmaztunk, mely teflon (PTFE) fóliából és Luba 21[®] típusú kenőolajból tevődött össze. Utóbbi kifejezetten nagynyomású igénybevételhez, minimálkenésre lett kifejlesztve. Szigorúan csak a munkadarabok és a szerszámok közötti felületeken alkalmaztunk kenést, mivel az egymásra halmozott próbatestekre tömbi anyagként tekintünk és eszerint vizsgáltuk azokat. A kenés sematikus modellje a 2. ábrán látható olyan esetre, amikor két lemezpróbatetest alkotta a halmozott próbatetek vizsgálati kialakítását.



2. ábra: Összetett kenés alkalmazása

A vizsgálatok során 50%-os magasságcsökkenés elérése volt a célunk, amely így $0,5/4,8 \ h/b$ arányt jelentett a mérés végső időpillanatában az egyedülállóként vizsgált és $1,0/4,8 \ h/b$ arányt a két lemez egymásra halmozásából kapott próbatetest esetében. Az 1. táblázatban feltüntetett geometriai feltételek közül így csak a Graf és szerzőtársai [2] által javasolt h/b arányszámot tudtuk jelen kutatásban teljesíteni. Új szerszámgeometriákkal tervezzük a jövőben a méréseinket még az egyéb irodalmakban megtalálható feltételek közé is beszorítani. Itt megjegyzendő még, hogy az alkalmazott szerszám és próbatetest geometriákkal az 1. táblázatban feltüntetett összes többi geometriai megkötésnek (w/b és l/b arányszámoknak) megfeleltünk. Ezt igazolandó, a mérésekhez tartozó fontosabb paramétereket a 2. táblázatban találja az olvasó.

2. táblázat: Síkalakváltozási nyomóvizsgálat kísérleti körülményei

<i>Szerszám és munkadarab méretek</i>	
Szerszám szélesség (<i>b</i>), mm	4,8
Munkadarab szélesség (<i>w</i>), mm	30
Munkadarab vastagság (<i>h</i>), mm	1
	2
Munkadarab hosszúság (<i>l</i>), mm	40
<i>Feltételek</i>	
Maximális szerszámsebesség, mm/min	0,1
	0,2
Magasságcsökkenés, %	50
Alapanyag	DC04
Kenés	Luba 21®
	Teflon fólia
<i>Vizsgálóberendezés</i>	
Univerzális anyagvizsgáló berendezés (Instron 5900R 4482)	100 kN (erőmérő cella)

2.2. A felhasznált lemezanyag

A vizsgálatokhoz DC04 anyagminőségű, hidegen hengerelt, jó alakíthatósági tulajdonságokkal rendelkező járműipari acéllemezre esett a választás. Ez ötvözetlen, túlnyomó részt ferrites szövetszerkezetű acél, melyet lemeztábla formájában használtunk fel. A próbatestek kialakításához lézersugaras vágási technológiát alkalmaztunk. Korábbi tapasztalataink alapján a lézersugaras vágás ilyen szélesség esetén nem befolyásolja a mérési eredményeket, de ennek számszerű alátámasztásán még dolgozunk.

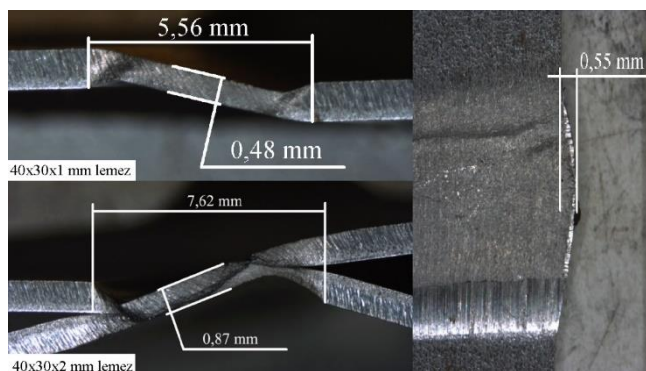
A próbatestek befoglaló méretei 40x30x1 mm voltak (2. táblázat). A vizsgálatok során változó geometriai tényező a kiinduló próbatest magasság volt, miután egyik esetben két lemezt egymásra helyeztünk, ezzel szimulálva a halmazzómitó vizsgálatokhoz hasonló állapotot. A módszer feltételezi, hogy az egymásra helyezett lemezek a vizsgálat során tömbi anyagként viselkednek.

2.3. Kiértékelés bemutatása

A folyásgörbék kiszervezéséhez, vagyis a kéttengelyű feszültségi állapotból kapott anyagi reakció görbék egytengelyűvé történő redukáláshoz kétféle elméletet használtunk fel. Ezen elméletek a von Mises ((1) egyenlet) és a Hill'48 ((2) egyenlet) elméletek voltak. A gépmerevségi hibát a próbatestek valódi alakváltozásának időszakos mérései alapján korrigáltuk. A végső összenyomások után kapott geometriai eredményeket Zeiss SteREO Discovery V8 típusú makroszkópon, 1x-es nagyítás mellett értékeltük ki. A fotókon vizsgáltuk a magasságcsökkenéseket, illetve az oldalirányú szélesedéseket („hordósodás”) mértékét. A magasságcsökkenéseket az egyedülálló lemez és a halmazzómitó kialakítású próbatest esetében, illetve a szélesedés mértékét egy-egy példán keresztül a 3. ábra mutatja.

A 3. ábrán látható, hogy a tervezett 50%-os magasságcsökkenést elértük az egyedülálló és a halmazzómitó esetekben is. Főként a halmazzómitó mérési módszernél, a képeken kivehető a lemezek nagyobb mint 50%-os lokális deformációja, de ez még nem jelentette a lemezanyagok tönkremenetelét. Ezt a kijelentést arra alapozzuk, hogy tapasztalataink alapján a tönkremenetel (pl. lokális anyagfolytonossági hiba kialakulása) esetén az erő drasztikusan lecsökken, amely jelenség a később bemutatásra kerülő folyásgörbéken nem figyelhető meg.

Az ábra jobb oldali részén az átlagos szélesedés látható. Ezt a hozzávetőlegesen 0,5 mm nagyságú szélesedést a 30 mm-es lemez szélességéhez viszonyítva (~0,017 értékű, szélesség irányú valódi alakváltozás) elhanyagolhatónak tekintettük.



3. ábra: Nyomóvizsgálati eredmények szemléltetése

A folyásgörbék kiszervezéséhez használt elméletek alapján a folyási feszültségeket az alábbi összefüggések, (1) és (2) egyenletek segítségével számítottuk.

$$\sigma_{vm} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1)$$

A fenti összefüggésben σ_{vm} a valódi feszültség von Mises szerint (N/mm²), F a nyomóerő (N), A_0 pedig a próbatestek kezdeti felülete (mm²).

$$\sigma_H = \sqrt{1 + \alpha^2 - \frac{2 \cdot R}{1+R} \cdot \alpha} \cdot \sigma_{psc} \quad (2)$$

A (2) egyenletben σ_H a Hill'48 elmélet szerinti valódi feszültség (N/mm²), α a feszültségi állapot tényező (-), R a síkbeli anizotrópia tényező (-), σ_{psc} pedig a mérésekből kinyert erő-keresztmetszet hányados adatok (N/mm²).

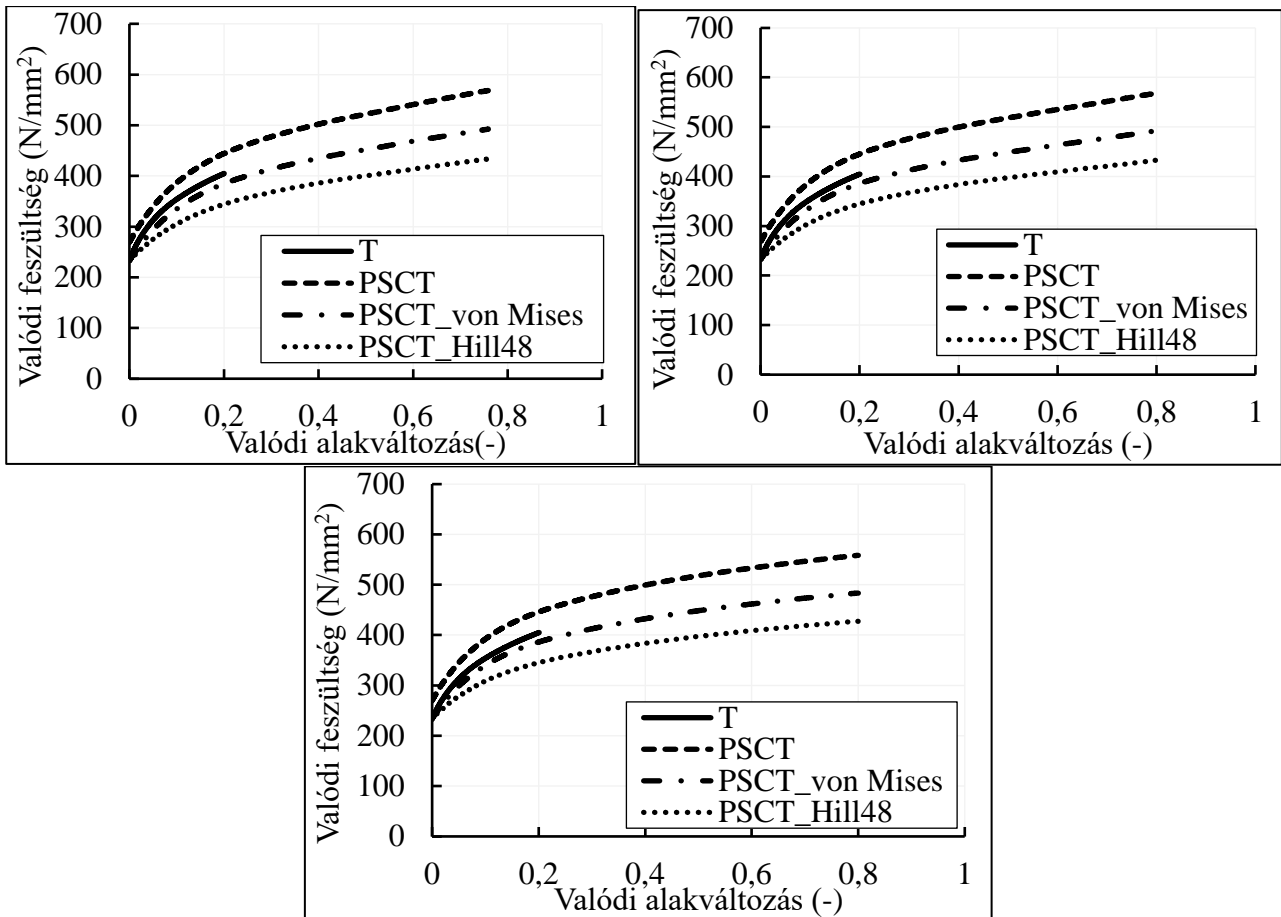
Az R síkbeli anizotrópia tényezőt a vizsgált lemezanyag hengerlési iránnyal párhuzamos, arra merőleges és azzal 45°-os szöget bezáró szakítóvizsgálati eredményeiből nyertük. A számításaink során az R átlagos értékével, $R = 1,706$ értékkel számoltunk. A feszültség állapot tényezőt akképp számoltuk, hogy a Hill'48 folyási feltételben síkalakváltozási állapotot feltételezve, a szélesség irányú alakváltozás értékét zérusnak tekintettük, majd az így kapott főalakváltozási arányból a szóban forgó tényező értéke (az R értéktől függően, a mi esetünkben) $\alpha = 0,631$ -re adódott.

3. Eredmények

A három-három párhuzamos mérés eredményeit az egyedülálló és a halmozott próbatest kialakításokra a 4. és az 5. ábra diagramjai szemléltetik.

Előzetes szakítóvizsgálatokból kapott értékek is láthatók referenciagörbéként (T - egytengelyű feszültségi állapotot megtestesítő anyagi reakció) a DC04 anyagminőségre vonatkozóan. A diagramokon szerepelnek a kéttengelyű feszültségi állapotot megtestesítő anyagi reakció görbéi (azaz a 'nyers' nyomóvizsgálati görbék - PSCT), illetve a két elmélet alapján kiszervezett folyásgörbék (egyenértékű alakváltozássá és feszültséggé redukált görbék: PSCT_von Mises és PSCT_Hill48).

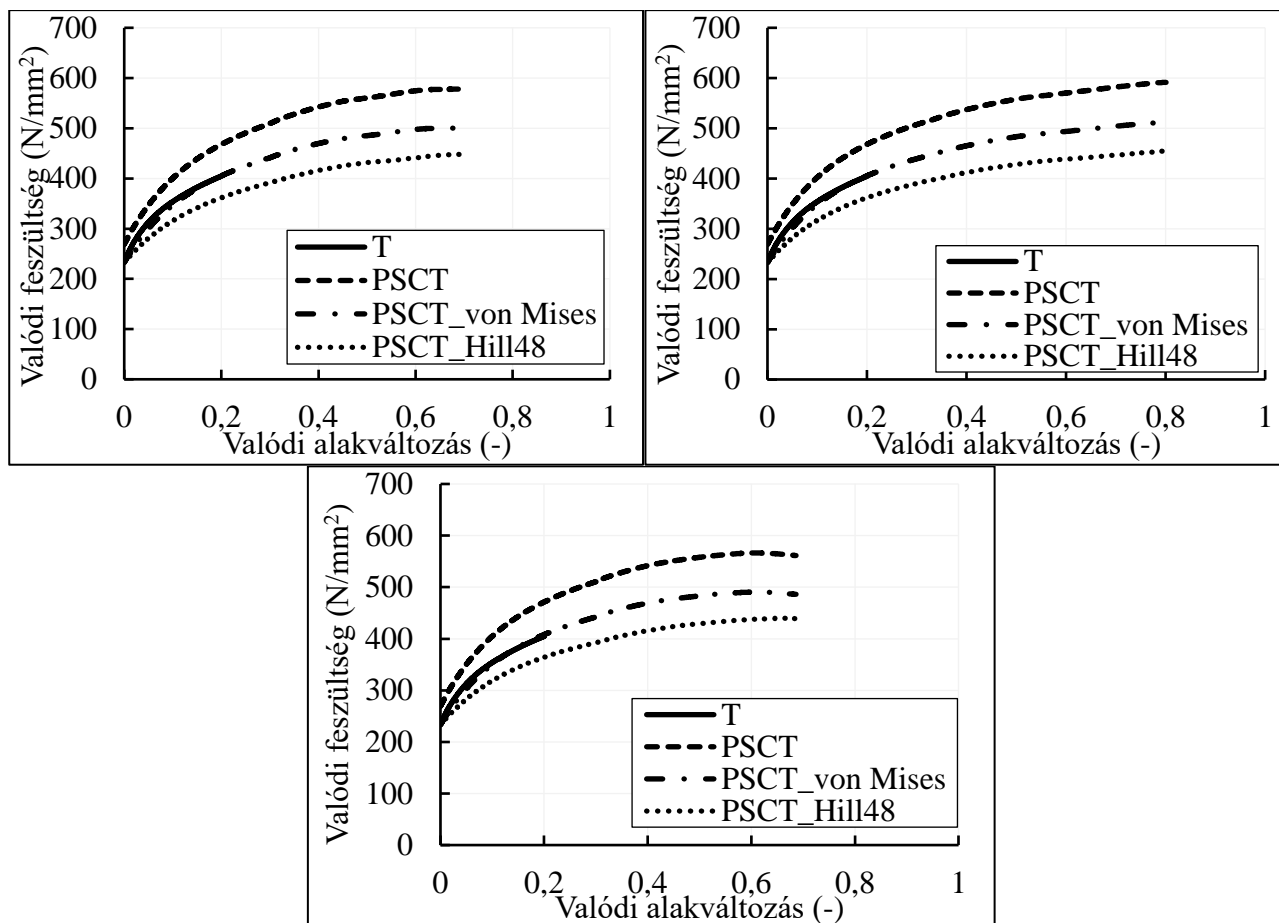
Az 4. ábráról leolvasható, hogy egyedülálló lemezeknél a von Mises elmélet alapján számított értékek közelebb állnak a szakítóvizsgálatból kapott értékekhez, mint a Hill'48 elmélet szerint számítottak. Ebben nagy szerepe lehet annak, hogy Hill elmélete számításba vesz egy plusz befolyásoló tényezőt, mégpedig az úgynevezett anizotrópia tényezőt (R értéket), vagyis egyfajta irányfüggőséggel is számol, ahogyan az a (2) összefüggésben is látható. A görbék lefutását tekintve mindhárom mérés hozzávetőlegesen megegyező. Számszerűsítve a „T” görbe legfelső pontjának értéke hozzávetőlegesen átlagosan 405 MPa, ugyanakkora alakváltozás mellett a von Mises elmélet alapján kapott görbét metsző pont megközelítőleg átlagosan 385 MPa, míg Hill elmélete alapján ez az érték átlagosan 345 MPa.



4. ábra: Egyedülálló lemez esetére vonatkozó feszültség-alakváltozás görbék

A két lemez egymásra halmozásából kapott próbatetek méréseinek esetén, melyeket a 5. ábra szemléltet, jól észrevehető mindhárom esetben, hogy a von Mises elmélet alapján korrigált folyásgörbék megközelítőleg tökéletesen fedik a szakítóvizsgálatból kapott görbékét. Számszerűsítve az eredményeket, a von Mises szerint redukált görbe és a referencia görbe egymáson helyezkedik, így értékük a vizsgált pontban jó közelítéssel megegyezik, átlagosan 405 MPa, míg a Hill48 elmélet esetében ez átlagosan 366 MPa. Megjegyzendő, hogy két halmozott próbatetnél, hozzávetőlegesen 0,1 alakváltozással kisebb össz-alakváltozásnál, mint az egyedi lemezek esetében, elkezdődhetett a lokális tönkremenetel és a feszültség értékek csökkenni kezdtek. Ezért tartanak a görbék két esetben csak nagyjából 0,7 egyenértékű alakváltozásig.

A referencia pontban (a szakítóvizsgálat során ébredő legnagyobb erő időpillanatában fennálló valódi alakváltozásnál) vizsgált feszültség értékek tehát közel állnak egymáshoz, ha összevetjük az egyedi lemezek terheléséből és a két lemez egymásra halmozásából kapott próbatetek terheléséből származtatott valódi feszültség értékeket. A von Mises elmélet alapján korrigált görbék átlagosan 20 MPa-ra, míg a Hill'48 elmélet alapján korrigált görbék átlagosan 19 MPa-ra esnek egymástól a két különböző mérési konfigurációban. Ezek az értékek a referencia pontban mért 405 MPa-nak mindössze a 4,9%-a és 4,7%-a. Ezek alapján kijelenthető, hogy a két lemez egymásra halmozásakor megfigyelhető jelentős, lokális vastagságcsökkenések (3. ábra) 0,7 összehasonlító alakváltozásig nem befolyásolja 5%-nál nagyobb mértékben a mérési pontosságot, tehát a síkalakváltozási nyomóvizsgálatok használható eredményeket szolgáltatnak halmozott próbatetek esetén is.



5. ábra: Halmozott lemezek esetére vonatkozó feszültség-alakváltozás görbék

4. Konklúzió

Cikkünkben a vékony lemezek síkalakváltozási nyomópróbával történő folyásgörbe felvételi lehetőségét vizsgáltuk, nagy alakváltozási tartományokra. A módszer jól használható tömbi anyagok esetén, ám a vékony lemezeket jellemző geometriai feltételek nehézségeket okoznak a lemezalakításban. A lemezvastagság növelése céljából a lemezeket egymásra halmozva (az ún. halmozott zömítő próba elvén) is vizsgálat alá vetettük, majd összehasonlítottuk az eredményeket az egyedülálló mért lemezek eredményeivel. Eredményeink alapján megállapítható, hogy az alkalmazott módszerrel a folyásgörbék a nagy alakváltozásokra érvényes tartományokra is kiterjeszthetők, továbbá, hogy a sűrűdástől és egyéb befolyásoló tényezőktől mentes szakítóvizsgálati, referencia görbéhez a legjobban von Mises elmélete alapján redukált folyásgörbe illeszkedik, mindkét esetben. A görbék alakja, lefutása a vizsgált referencia pontban hozzávetőlegesen megegyező az egyedülálló lemez és a halmozott lemez koncepciókban.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás támogatása a 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008 számú projekt keretében, a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2024-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

A Projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával és az NKFI Hivatal által kibocsátott Támogatói Okirat alapján valósult meg. Támogató Okirat száma: MEC_R 149631.

Irodalomjegyzék

- [1] A. Nadai és mtsai.: Plasticity – A Mechanics of the Plastic State of Matter, McGraw-Hill Book Company; New York, London, 1931, 10.1122/1.2116408
- [2] M. Graf, S. Fritsch, B. Awiszus: Determination of Forming Behaviour of EN AW-6060 by Different Testing Methods under Cold Bulking Forming Conditions; Chemnitz University of Technology, Chemnitz, Germany; 10.1016/j.promfg.2020.04.339, 2020
- [3] C. Chermette, K. Unruh, I. Peshekhodov, J. Chottin, T. Balan: A new analytical method for determination of the flow curve for high-strength sheet steels using the plane strain compression test; International Journal of Material Forming 2020; 13:269-292; 10.1007/s12289-019-01485-4
- [4] D. Banabic, H.-J. Bunge, K. Pöhlant, A.E. Tekkaya: Formability of Metallic Materials-plastic anisotropy, formability testing, forming limits; Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Singapore, Tokyo; Springer; ISBN: 978-3-662-04013-3; 10.1007/978-3-662-04013-3_4, 2000
- [5] Nuttakorn Sae-Eaw, Yingyot Aue-U-Lan: Mechanical property determination for combined sheet and bulk metal forming process by plane strain compression test; King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 10.1016/j.matpr.2017.10.113, 2018
- [6] M. S. Mohebbi, A. Akbarzadeh, Y.-O. Yoon, S.-K. Kim: Flow stress analysis of ultra-fine grained AA1050 by plane strain compression test; Materials Science&Engineering A; Korea, Iran; 2013
- [7] Loveday MS et. al.: Measurement of flow stress in hot plane strain compression tests. Mater High Temp 23(2):85–118, 2006
- [8] N. Becker, K. Pohlandt: Improvement of the Plane-Strain Compression Test for Determining Flow Curves, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart/FRG, 1989
- [9] G. Kónya, Zs. F. Kovács: Experimental investigation of the effects of cooling-lubricating methods on the slot milling process of GTD-111 type nickel-based superalloy, Journal of Manufacturing Processes, 2024, 10.1016/j.jmapro.2024.03.074