



A karcsúsági viszony hatása a síkbeli alakváltozásra halmaznyomó vizsgálatok során

Effect of the Slenderness Relation on in-plane Deformation in Stack Compression Tests

Kölüs Martin László,¹ Borbély Richárd,² Béres Gábor József³

- ¹ Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, kolus.martin@nje.hu
- ² Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, borbely.richard@nje.hu
- ³ Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, beres.gabor@nje.hu

Abstract

In forming technologies and their simulation, knowing the flow curve characteristic of the material is an essential parameter. Acquiring this knowledge is particularly challenging for sheet materials in high strain ranges. It is well-known that friction and geometric relationships have a distorting effect on the flow curves, thus compensation is necessary. However, the geometric ratio can not only influence the formation of the flow curve, if our material shows anisotropic behaviour. In our research, using compression tests, we examined the deformation relations of deformed specimens through digital imaging methods. The stack compression test is widely used to determine the flow curve in a broad range of large deformation. During the test, several disk specimens with the same geometric characteristics were stacked on top of each other to form a final test piece, and then compression tests were conducted on these assemblies. We found that at low values of the geometric ratio (0.1 in our study), the proportion of plastic, planar principal strains indicating anisotropic behaviour is greater than at higher geometric ratios (0.5 and 1.0 in our study).

Keywords: disk compression test, stack compression test, anisotropy.

Összefoglalás

A képlékenyalakítási eljárásokban és azok szimulációja során elengedhetetlen paraméter az anyagra jellemző folyásgörbe ismerete. Megszerzése különösen nagy kihívás, lemezanyagok esetén a nagy alakváltozási tartományokban. Köztudott, hogy a súrlódás és a geometriai viszony torzító hatással van a folyásgörbékre, ezért kompenzáció alkalmazása szükséges. Ugyanakkor a geometriai viszony nem csak a folyásgörbék alakulását befolyásolhatja, ha anizotrop viselkedésű a lemezanyag. Kutatásunkban a halmazzömítő vizsgálatok segítségével deformált próbatestek alakváltozási viszonyait vizsgáltuk a digitális képalkotás módszerével. A halmazzömítő vizsgálat széles körben alkalmazott nagyalakváltozási tartományban történő folyásgörbe meghatározása. A vizsgálat során több, ugyanazon geometriai jellemzőkkel felruházott lemezpróbatestet helyeztünk egymásra úgy, hogy azok egy végső próbadarabot formáljanak, majd az így keletkezett halmazokon nyomóvizsgálatokat végeztünk. Azt tapasztaltuk, hogy a geometriai viszonyszám kis értékeinél (kutatásunkban 0,1) az anizotrop viselkedésre utaló képlékeny, síkbeli főalakváltozások aránya nagyobb, mint nagyobb (kutatásunkban 0,5 és 1,0) geometriai viszonyszámoknál.

Kulcsszavak: korongzömítő próba, halmazzömítő próba, anizotrópia.

1. Bevezetés

A halmazzömítő vizsgálatokat az első szakirodalmak azzal a céllal említik, hogy a szakítóvizsgálatkor lefedhető alakváltozás-tartományoknál nagyobb alakváltozásokra is mérhetővé tegyék az anyag viselkedését. Emellett Barlat et al. [1] a lemezek normál irányú nyomásával javasolta a kéttengelyű anyagviselkedés leírását is.

A folyásgörbék pontos ismerete elengedhetetlen az egyes lemezalakító eljárások szempontjából. Különösen nagy nehézséget jelent a nagyobb alakváltozási tartományok megismerése, melyek gyakran előfordulnak lemezalakítás során. Annak érdekében, hogy képet kapjunk ezen tartományokról, számos eljárás áll rendelkezésünkre, mint az egytengelyű zömítő vizsgálat, a hidraulikus mélyítő vizsgálat, a Watts–Ford-próba vagy a halmazzömítő vizsgálat [2]. Merklein és Kuppert [3] az elsők között volt, akik halmazzömítő vizsgálatot hajtottak végre, cikkünkben mi is ezt az eljárást alkalmaztuk.

Ugyan minden módszer rejt magában előnyöket és hátrányokat egyaránt, ugyanakkor a zömítés technológiáját alkalmazó módszerek esetén zavaró tényező a súrlódás és a geometriai viszony kérdésköre. A súrlódás tekintetében szokás azt feltételezni, hogy állandó a vizsgálat során. Ezt a feltételezést kifogásolta Coppieters et al. [4], Kraus et al. [5] és Gil et al. [6], akik a nyomás függvényében változónak feltételezték a súrlódási együtthatót a vizsgálatok során. A Siebel és Christiansen et al. [7]-féle folyásgörbe egyenletkompenzációt alkalmaz a geometriai viszonyra zömítővizsgálatok esetén. Watts-Ford-próba során Graf et al. [8], Chermette et al. [9] és Banabic et al. [10] is tett ajánlásokat a próbatest különböző geometriai méreteinek viszonyára.

A geometriai korrekció azonban nem csak a folyásgörbék megfelelő közelítésekor lehet fontos, hanem az anizotrop képlékeny viselkedés leírásánál is, amikor egyik és másik irányban nem egységesen deformálódik a próbatest. Az anizotrop viselkedés ismert a szakítóvizsgálatokból, amely során a lemez próbatest kereszt- és vastagságirányú alakváltozásainak hányadosát értjük anizotrópia tényező alatt. Ugyanakkor, az egytengelyű zömítéssel mechanikailag egyenértékű kéttengelyű húzó feszültségi állapotban a lemez másképp viselkedhet. A szakirodalomban, az ilven feszültségi állapotban végzett kísérletek során mérhető síkbeli alakváltozások arányát nevezik biaxiális, vagyis kéttengelyű anizotrópia tényezőnek [1]. Szükséges azonban megvizsgálni ennek a mérőszámnak is az azoktól a tényezőktől való függését, amelyek ismert módon, zömítéskor a folyásgörbék alakulását is befolyásolják. Ezek a súrlódás és a hossz-átmérő viszonyszám. Cikkünkben most a második tényező hatására fókuszálunk.

A vizsgálatok előkészítése és végrehajtása

Az egytengelyű nyomóvizsgálatokat DC04 jelű lemezanyagon hajtottuk végre, melynek ferrites szövetszerkezete jó alakíthatósági tulajdonságokkal ruházza fel azt, ennek köszönhetően előszeretettel alkalmazzák az ipar számos területén.

2.1. A próbatest bemutatása

A próbatesteket táblalemezből munkáltuk ki.

A vágás a Trumpf TruLaser Cell 7020 berendezésen valósult meg, mely egy 4 kW teljesítményű dióda sugár forrású lézerberendezés. A készülék vágási pontossága $\pm 0,02$ mm. A vágás nitrogéngáz felhasználásával történt.

A választott próbatest keresztmetszetét tekintve kör, melynek névleges átmérője 10 mm, névleges vastagsága 1 mm. A pontos átmérő és vastagság méreteket ötven próbatest geometriájának átlagából határoztuk meg. A lemez hengerlési irányát minden esetben jelöltük.

2.2. A vizsgálati eszközök bemutatása

A vizsgálatokat az INSTRON 4482 elektromechanikus univerzális anyagvizsgáló berendezésen hajtottuk végre, mely alkalmas húzó, hajlító, nyíró és kompressziós igénybevételek kifejtésére és a szilárdsági és képlékenységi jellemzők meghatározására. Az INSTRON 4482 anyagvizsgáló berendezés az **1. ábrá**n látható.



 ábra. Instron4482 univerzális anyagvizsgáló berendezés

A berendezést hengeres nyomólapokkal láttuk el, melyek átmérője 40 mm, vastagsága 20 mm volt. A nyomólapok anyagául a K110 jelű erősen ötvözött szerszámacélt választottuk, mely a hőkezelést követően 57 HRC átlagos keménységgel rendelkezett. A nyomófelületeket políroztuk, melynek eredménye a 2. ábrán látható. Erre azért volt szükség, hogy csökkentsük a munkadarab és a szerszám között fellépő súrlódás mértékét.

2.3. Pozicionálás és kenőanyag

A kísérlet során kiemelkedően fontos, hogy biztosítsuk a darabok egytengelyűségét. A pozicionálás szabadkézi úton nem elégséges, így létrehoztunk egy pozicionáló egységet, mely additív eljárással készült a Craftbot flow idex xl nevű berendezésen, anyagát tekintve BASF gyártmányú PLA, és két félből tevődik össze. Zárt állapotban a próbatestek palástfelületei és a pozicionáló készülék belső falai között pontszerű érintkezés jön létre, így csökkentve az egytengelyűségi hiba mértékét. A pozicionáló készülék és az általa összerendezett koronghalmaz egységnyi hossz-átmérő (l/d) viszonya a **3. ábrá**n tekinthető meg.

A próbatestek nyomólapokkal érintkező felületeit Luba 21 nagynyomású kenőfolyadékkal kezeltük. A próbatestek egymással érintkező felületein azonban nem alkalmaztunk kenést, ezzel segítve elő a tömbi anyagviselkedést.

2.4. Nyomóvizsgálatok végrehajtása

A kísérleteket három különböző esetre hajtottuk végre. Az első esetben egy darab korongot (hossz-átmérő viszony: 0,1), a második esetben öt darab korongot (hossz-átmérő viszony: 0,5), míg a harmadik esetben tíz darab korongot (hossz-átmérő viszony: 1,0) helyeztünk egymásra és hajtottuk végre a zömítővizsgálatokat állandó alakváltozási sebességgel, háromszoros mérési ismétlési gyakorisággal. Egy próbatest a nyomólapok között a **4. ábrá**n tekinthető meg.

A keresztfej elmozdulása 3 mm/perc gyorsjárati sebességgel valósult meg, míg az előterhelés mértéke el nem érte a 250 N-t. Ez az érték 3–10 MPa nyomófeszültséget jelent, amely kisebb, mint a folyáshatár 5%-a, viszont ahhoz elegendő, hogy stabilizálja a halmazt a főterhelés megindulása előtt. Ezt követően a keresztfej a halmazok magasságának függvényében haladt tovább úgy, hogy az alábbi összefüggés teljesüljön.

$$v = h/10, \tag{1}$$

ahol v a keresztfej elmozdulási sebessége, h pedig az aktuálisan zömített halmaz kiinduló magassága.



2. ábra. A polírozott nyomópogácsák



3. ábra. Pozicionáló készülék és korong halmaz



4. ábra. A zömítővizsgálat végrehajtása



5. ábra. A halmazok a zömítést követően

Az 5. ábrán a halmazok láthatóak zömítés után. Minden halmaz összenyomása addig tartott, míg megközelítőleg el nem értük a kiinduló magasság felét.

2.5. Próbatestek szkennelése és mérése

Ezt követően a zömített próbatestek szkennelését hajtottuk végre a Vinyl Open Air berendezés segítségével. A berendezés egy darab 1,3 MP felbontású kamerával rendelkezik és 6 µm pontosságra képes. A próbatesteket a gép mágneses asztalához rögzítettük. A szkennelés során létrejött pontfelhő a **6. ábrá**n látható. A pontfelhők a teljes halmazok zömítés utáni koordinátapontjait tartalmazzák.

A szkennelt pontfelhő elemszámát csökkentettük, ezzel elősegítve a gyorsabb modellalkotást. Az egyszerűsített pontfelhő alapján elkészített modell a 7. ábrán látható.

3. Eredmények

A szkennelés szükségessége a nyomóvizsgálatok során bekövetkező alakváltozások mérésében játszik szerepet. A vizsgálatokkor a próbatestek vastagságirányú alakváltozását (ε_v) ugyan tudjuk közvetlenül számolni a keresztfejelmozdulások értékeiből (figyelembe véve a gép merevségét is), de a síkbeli alakváltozások a nyomólapok között rejtve maradnak. (A vastagságirányú alakváltozások számolásánál a statisztikai lemezvastagságot vettük kiinduló méretnek.)

A síkbeli alakváltozások mérésével a próbatestek anizotróp viselkedésére tudunk következtetni. Erre látunk példát a **8. ábrá**n, ahol a hengerlési iránnyal párhuzamos (ε_0) és arra merőleges logaritmikus deformációk (ε_{g0}) jól láthatóan eltérnek. A próbatest egyes méretei között közel egy milliméter eltérés tapasztalható 0,5 l/d viszonynál.

1.	tábl	ázat.	Mért	és	számol	t al	lał	kvá	ilte	ozáso	ok	Ċ
----	------	-------	------	----	--------	------	-----	-----	------	-------	----	---

l/d	$\boldsymbol{\varepsilon}_{v}$	$\boldsymbol{\varepsilon}_{0}$	$\boldsymbol{\varepsilon}_{90}$	ε	β
0,1	-0,355	0,241	0,167	0,476	0,69
0,5	-0,633	0,356	0,286	0,748	0,80
1,0	-0,675	0,370	0,303	0,784	0,82

Az effektív, valódi képlékeny alakváltozások (ε_ρ) számítását a folyási feltétel ismeretében (feltételezésével) lehetséges megtenni, amelyhez mi ebben a kutatásban a Hill'48 elméletet **[11]** alkalmaztuk. Ehhez egyedül a síkbeli főalakváltozásokat és a szakítóvizsgálattal felvehető átlagos, normál anizotrópia tényezőt (R értéket) szükséges ismerni, amely korábbi méréseink alapján a DC04 anyagra vonatkozóan 1,706 értékkel vehető fel. Az **1. táblázat**ban a β a síkbeli főalakváltozások arányát fejezi ki, amely egyben megegyezik a kéttengelyű nyúláshoz tartozó anizotrópia tényező (r_p) értékével is:



6. ábra. A szkennelt próbatest



7. ábra. Az egyszerűsített pontfelhő alapján létrehozott testmodell



 ábra. A hengerlési irány és az arra merőleges irány átmérőkülönbsége

$$r_b \equiv \beta = \frac{\varepsilon_{90}}{\varepsilon_0} \tag{2}$$

A szakítóvizsgálattal mérhető és a kéttengelyű nyúlás anizotrópia tényező értékeit a 9. ábra és a 10. ábra szemlélteti.

A szakítóvizsgálatok során a normál anizotrópia tényező kismértékben változik az alakváltozások előrehaladtával, ahogyan az a 9. ábrán látható. Lineáris függvénnyel közelítve, három mérés átlagát adtuk meg a szövegben.



9. ábra. Szakítóvizsgálatból meghatározott anizotrópia (R) érték



10. ábra. A kéttengelyű anizotrópia (R) érték változása az l/d viszony függvényében

A **10. ábra** alapján a kéttengelyű nyúláshoz tartozó anizotrópia értéke is változónak tekinthető a geometriai viszony vagy az effektív alakváltozás függvényében.

4. Következtetések

A nagy alakváltozási tartományokban történő folyásgörbe-felvétel egyik kézenfekvő módja a halmazzömítő vizsgálat, azonban végrehajtása során geometriai és súrlódási korrekció szükséges.

Cikkünkben azt vizsgáltuk, hogy szükséges-e a geometriai viszonyszámot figyelembe venni a kéttengelyű anizotrópia tényező meghatározásakor is, avagy az csak a folyásgörbék alakjára van torzító hatással. A vizsgálatainkat 0,1, 0,5 és 1,0 l/d viszonyszámú próbatesteken hajtottuk végre. Az alakváltozásokat digitális képkorreláció segítségével, a középátmérő-változásból származtattuk.

Eredményeink azt mutatják, hogy a vizsgált geometriai viszony és alakváltozás tartományban kismértékben torzul a kéttengelyű anizotrópia mérőszám mért értéke, ha kicsi (esetünkben 0,1) a hossz-átmérő viszonyszám. Ugyanakkor, 0,5 és a feletti hossz-átmérő viszonyszámoknál már nem látható számottevő eltérés.

Szakirodalmi hivatkozások

 Barlat F., Brem J. C., Yoon J. W., Chung K., Dick R. E., Lege D. J., Pourboghrat F., Choi S.-H., Chu E.: Plane stress yield function for aluminim alloy sheets – Part 1: theory. Int. J. Plast., (2003) 1297– 1319.

https://doi.org/10.1016/S0749-6419(02)00019-0

[2] Coppieters S., Traphöner H., Stiebert F., Balan T., Kuwabara T., Tekkaya A. E.: Large strain flow curve identification for sheet metal. J. Mat. Pro. Tec., 308. (2022) 117725.

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117725

[3] Merklein M., Kuppert A.: A method for the layer compression test considering the anisotropic material behavior. Int. J. Mater. Form., 2. (2009) 483–486.

https://doi.org/10.1007/s12289-009-0592-8

[4] Coppieters S., Lava P., Sol H., Van Bael A., Van Houtte P., Debruyne D.: Determination of the flow stress and contact friction of sheet metal in a multi-layered upsetting test. J. Mat. Pro. Tec., 210. (2010) 1290–1296.

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.03.017

[5] Kraus M., Lenzen M., Merklein M.: Contact pressure-dependent friction characterization by using a single sheet metal compression test. Wear, 476. (2021) 203679.

https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203679

[6] Gil I., Mendiguren J., Galdos L., Magurra E., Argandona E. S. de: *Influence of the pressure dependent coefficient of friction on deep drawing springback prediction*. Tribology International, 103. (2016) 266–273.

https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.07.004

[7] Christiansen P., Martins P. A. F., Bay N.: Friction Compensation in the Upsetting of Cylindrical Test Specimens. Experimental Mechanics, 56. (2016) 1271–1279.

https://doi.org/10.1007/s11340-016-0164-z

[8] Graf M., Fritsch S., Awiszus B.: Determination of Forming Behaviour of EN AW-6060 by Different Testing Methods under Cold Bulking Forming Conditions. Procedia Manufacturing, 47 (2020) 1512–1519.

https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.339

- [9] Chermette C., Unruh K., Peshekhodov I., Chottin J., Balan T.: A new analytical method for determination of the flow curve for high-strength sheet steels using the plane strain compression test. Int. J. Mater. Form., 13. (2020) 269–292. https://doi.org/10.1007/s12289-019-01485-4
- [10] Banabic D., Bunge H.-J., Pöhlandt K., Tekkaya A. E.: Formability of Metallic Materials. Springer-Verlag, 2000.

https://doi.org/10.1007/978-3-662-04013-3

[11] Hill R.: A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Royal Society, 193. (1948) 1033.

https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045