

Súrlódási tényező meghatározása végeelem-környezetben deformációvizsgálat segítségével vékonylemez zömítése esetén

Determination of the friction coefficient in a finite element environment through deformation analysis in thin sheet compression test

KÖLÜS Martin L.^{1,2a}, Dr. KALÁCSKA Gábor^{2b}, Dr. BÉRES Gábor J.^{1c}

¹Mechanikai és Lézersugaras Technológiák Kutató Csoport, Neumann János Egyetem, 6000 Kecskemét, Izsáki út 10.

²Műszaki intézet, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem (MATE), 2100 Gödöllő, Páter K. u. 1.

^akolus.martin@nje.hu, ^bkalacska.gabor@uni-mate.hu, ^cberes.gabor@nje.hu

Abstract

Thin sheets play a key role in various industries, making the precise knowledge of their material properties essential for efficient design. Several methods exist for their examination, such as tensile test, hydraulic bulge test, and compression test. The latter being less common but holding great potential. The friction occurring during testing and its pressure dependency are particularly important, as they significantly affect the forming process and the final product quality. In our study, we investigate the relationship between the Coulomb friction coefficient and the surface pressure observed during compression tests using laboratory experiments and finite element simulations.

Keywords: Thin sheet, Friction, Compression test

Kivonat

A vékony lemezek kulcsszerepet játszanak számos iparágban, így pontos anyagi tulajdonságaik ismerete elengedhetetlen a hatékony tervezéshez. Vizsgálatukra több módszer létezik, például a szakító-, hidraulikus mélyítő- és nyomóvizsgálat, utóbbi kevésbé elterjedt, de nagy potenciállal bír. Különösen fontos a vizsgálat során fellépő súrlódás és annak nyomásfüggősége, mivel jelentősen befolyásolja az alakítás folyamatát és a termék minőségét. Cikkünkben laboratóriumi kísérletekkel és végeselemes szimulációkkal vizsgáljuk a Coulomb-féle súrlódási együttható és a nyomóvizsgálatok során jelentkező felületi nyomás kapcsolatát.

Kulcsszavak: Vékonylemez, Súrlódás, Nyomóvizsgálat

1. BEVEZETÉS

Az anyagi jellemzők ismerete elengedhetetlen az alakítási folyamatok tervezése során. Az egyik ilyen kiemelten fontos paraméter a folyási görbe. Coppieters és szerzőtársai [1] cikkükben ismertettek számos módszert, mely alkalmas a nagy alakváltozási tartományokra érvényes folyási görbe meghatározására és rámutattak, hogy a laboratóriumi mérések és szimulációk együttes alkalmazása segíthetnek az alakítási folyamat pontosabb megértésében. Az egyik ilyen módszer az úgynevezett halmaznyomó vizsgálat (Stack compression test). Merklein és Kuppert [2] az elsők között alkalmazta ezt az eljárást az anyagi jellemzők megismerésére. Ezt követően született számos olyan tanulmány, mely a módszer pontosabb megismerését hivatott szolgálni. An és Vegter [3] valamint Coppieters és szerzőtársai [4] egyaránt vizsgálták a hidrosztatikus nyomás és a súrlódás hatását a folyamatra nézve.

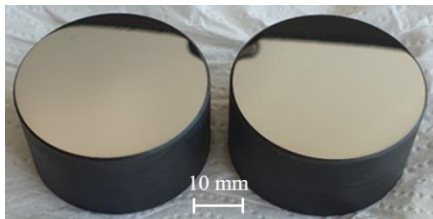
Kraus és szerzőtársai [5], valamint Gil és szerzőtársai [6] is azt feltételezték, hogy a súrlódási együttható értéke változik a felületi nyomás függvényében ezért az úgynevezett nyomásfüggő súrlódási modellt alkalmazták. De Carvalho L. Alexandre és Lukács Zsolt [7] szintén ezt a megközelítést alkalmazta egy autó motorháztető belső panelének mélyhúzósa során. Eredményeik azt mutatták, hogy pontosabb közelítést értek el, mintha állandó súrlódási együtthatót alkalmaztak volna.

Ez a tanulmány a zömített próbatestek és végeelem szimulációk együttes alkalmazásával kíván pontosabb rálátást biztosítani a folyamat során fennálló súrlódási körülményekre.

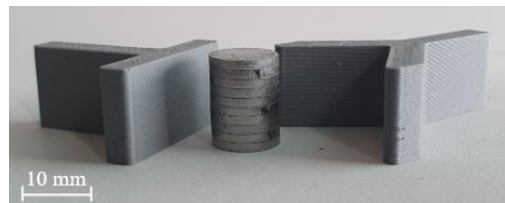
2. A VIZSGÁLAT FELÉPÍTÉSE

A méréseket az INSTRON 4482 univerzális anyagvizsgáló berendezésen hajtottuk végre szobahőmérsékleten. A berendezés 100 kN maximális terhelés kifejtésére képes. Az alakítási sebességet minden esetben úgy választottuk meg, hogy a próbatestek alakváltozási sebessége állandó legyen. A folyamat során LUBA 21 nagynyomású hidegalakító kenőolajat alkalmaztunk a nyomólapok próbatestekkel érintkező felületei között. Fontos, hogy a próbatestek egymással érintkező felületei közé nem juttattunk kenőolajat, ezzel is elősegítve a tömörszerű anyagi viselkedést. A folyamat addig tartott, míg a próbatestek magassága megközelítőleg a kiinduló magasság felére nem csökkent.

A folyamathoz gyártottunk nyomólapokat melyek anyagául Böhler K110 (X153CrMoV12) hidegalakító szerszámacél szolgált. A hőkezelést követően a nyomó szerszámok ~ 57HRC keménységet produkáltak. Annak érdekében, hogy minimalizáljuk a súrlódást a munkadarab és a nyomólapok között a nyomólapok felületeit políroztuk ($R_a \sim 0,03 \mu\text{m}$) [8]. A nyomólapok az 1. ábrán tekinthetők meg.



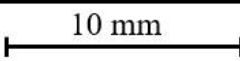
1. ábra. A vizsgálathoz használt nyomólapok



2. ábra. A halmazpozicionáló egység

A próbatestek egytengelyűségének biztosítása szintén kulcsfontosságú. Ennek érdekében létrehoztunk egy két részből álló pozicionáló egységet (2. ábra), melyet additív úton PLA alapanyagból gyártottunk. A halmaz összezárását követően a palástfelületen pontszerű érintkezés valósul meg három helyen, melynek köszönhetően csökken a pozicionálási hiba.

A vizsgálatokat DC04 hidegen hengerelt próbatesteken hajtottuk végre, melyet előszeretettel alkalmaznak az autóipar számos területén köszönhetően a jó alakíthatóságának, melyet ferrites szövetszerkezete tesz lehetővé. A halmazt felépítő elemek 10 mm átmérőjű 1 mm vastagsággal rendelkező hengeres próbatestek, melyek mindegyikén jelöltük a hengerlési irányt ($d0^\circ$). Egymásra helyezésük során kiemelt figyelmet fordítottunk az irányok ($d0^\circ$) egybeesésére. A vizsgálati elrendezések zömítés előtt és után a 3. ábrán láthatók

1	$\frac{l_0}{d_0} = \frac{1}{10}$	$\frac{l_0}{d_0} = 1$		
				
2	 $\text{Ø}10 \times 1 \text{ [mm]}$		 $\text{Ø}10 \times 10 \text{ [mm]}$	

3. ábra. A vizsgálati elrendezések zömítés előtt és azt követően

A 3. ábrán az 1- es sorban a nyomóvizsgálatok előtti állapot látható, még a 2 sorban a zömítés utáni állapot látható.

3. A SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZET FELÉPÍTÉSE

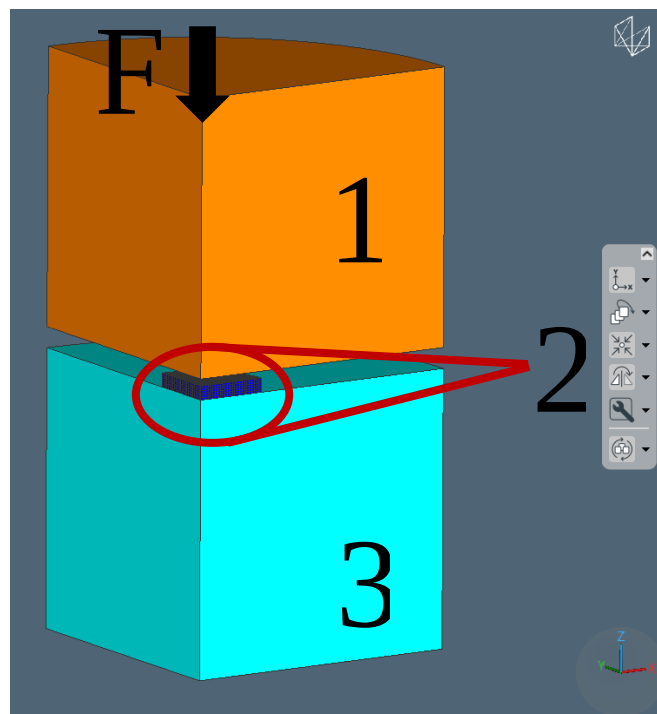
Ebben a tanulmányban egy darab próbatest nyomóvizsgálati szimulációját valósítottuk meg, ahol az l/d arány rendkívül kis értéket vesz fel (0,1). A kutatás során 10 korongból képzett halmaz eredményeit, mint egy összehasonlítás gyanánt alkalmazzuk. Ennek okán nem tartalmaz a cikk 10x10 mm-es korongokra készített szimulációs eredményeket.

A szimulációkat a Simufact Forming 2024.3 szimulációs szoftverben valósítottuk meg. A számítási teljesítményigény csökkentése érdekében a szimulációkat negyedelt próbatest geometriára hajtottuk végre. A próbatest anyagi jellemzőit a program könyvtárából nyertük ki. A hálózásra vonatkozó információkat az 1. táblázat ismerteti.

1. táblázat –A szimuláció hálózási paraméterei

<i>Használt háló típus</i>	<i>Sheetmesh</i>
<i>Használt elem típus</i>	<i>Hexahedral</i>
<i>Elem méret [mm]</i>	<i>0.2</i>
<i>Elemszám vastagságirányban [mm]</i>	<i>6</i>
<i>Elem szám [db]</i>	<i>3234</i>

A 4. ábrán a szimulációs elrendezés látható. A próbatest hengerlési iránya az x tengely irányával párhuzamos, míg y a hengerlésre merőleges irány.

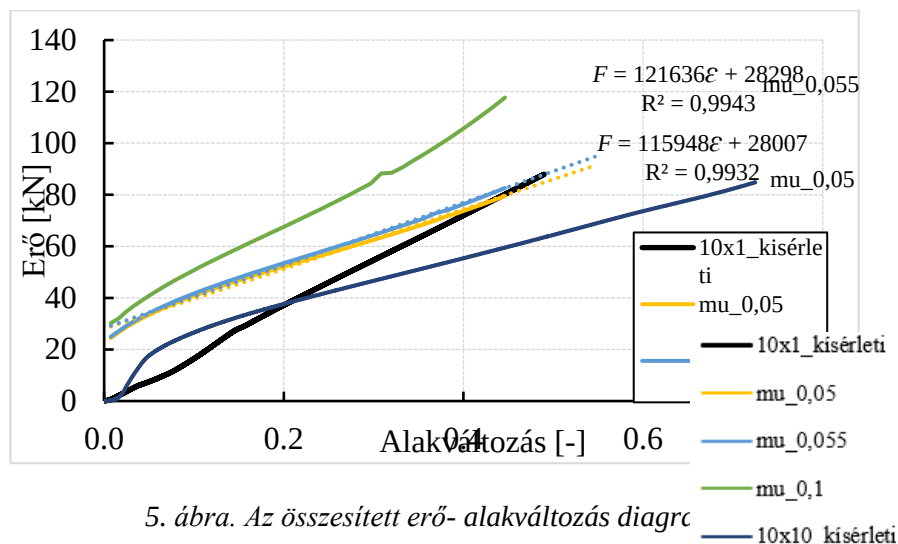


4. ábra. A 10x1 mm eset szimulációja

Az ábrán (4. ábra) 1 és 3 a nyomólapok és 2 a munkadarab. A szimuláció addig zajlott míg el nem értük azt a próbatest magasságot, melyet valós méréseink során kaptunk.

4. AZ EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

A kísérleteinkből ismert az egyes darabok esetén mért erő és elmozdulás értékek. A szimulációkat azzal a céllal hajtottuk végre, hogy megtudjuk, adott magasságcsökkenés mellett, mely súrlódási együttható érték eredményez a mért eredményeinkhez hasonló görbét, vagy képez vele metszéspontot. A súrlódási együttható értékeket $\mu = 0,05-0,1$ között vizsgáltuk. Annak érdekében, hogy egyszerűen összehasonlíthassuk a 10x10 mm-es esetet a 10x1 mm-es eset eredményeivel célszerű az elmozdulás értékeket átszámítani alakváltozás értékekké. Az összesített erő- alakváltozás diagrammot az 5. ábra hivatott szemléltetni.



5. ábra. Az összesített erő- alakváltozás diagram

5. KONKLÚZIÓ

Eredményeinkből jól látszik, hogy a 10x1 mm-es kísérleti görbe alakját tekintve jelentősen eltér a szimulációs úton kinyert görbétől. A $\mu = 0,055$ görbe a végső időpillanatban jó közelítéssel áthalad a 10x1 mm-es kísérleti görbén. Az átláthatóság érdekében 5. ábrán nem tüntettük fel az összes súrlódási együttható változat alapján megszerzett eredményeket, mivel azok a $\mu = 0,055-0,1$ közötti szakaszon helyezkednek el. Elmondható, hogy $\mu = 0,055$ felett egyik görbe sem közelíti a kísérleti görbét. A $\mu = 0,05$ -nél kisebb súrlódási együttható esete további vizsgálatokat igényel. Jellegét tekintve a 10x10 mm-es kísérleti görbe jó egyezést mutat a szimulációs görbékkel, ugyanakkor annak lehetősége, hogy az egy korong összenyomásából származó eredmények segítségével következtethetünk-e a magasabb darabszámot tartalmazó halmazok összenyomásakor fennálló súrlódási együttható értékekre, vitatott és további vizsgálatokat igényel.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] S. Coppieters, H. Traphöner, F. Stiebert, T. Balan, T. Kuwabara, és A. E. Tekkaya, „Large strain flow curve identification for sheet metal”, *J Mater Process Technol*, köt. 308, o. 117725, okt. 2022, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2022.117725.
- [2] M. Merklein és A. Kuppert, „A method for the layer compression test considering the anisotropic material behavior”, *International Journal of Material Forming*, köt. 2, sz. SUPPL. 1, o. 483–486, dec. 2009, doi: 10.1007/S12289-009-0592-8/METRICS.
- [3] Y. G. An és H. Vegter, „Analytical and experimental study of frictional behavior in through-thickness compression test”, *J Mater Process Technol*, köt. 160, sz. 2, o. 148–155, márc. 2005, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2004.05.026.
- [4] S. Coppieters, M. Jackel, C. Kraus, T. Kuwabara, és F. Barlat, „Influence of a Hydrostatic Pressure Shift on the Flow Stress in Sheet Metal”, *Procedia Manuf*, köt. 47, o. 1245–1249, jan. 2020, doi: 10.1016/J.PROMFG.2020.04.196.
- [5] M. Kraus, M. Lenzen, és M. Merklein, „Contact pressure-dependent friction characterization by using a single sheet metal compression test”, *Wear*, köt. 476, o. 203679, júl. 2021, doi: 10.1016/j.wear.2021.203679.
- [6] I. Gil, J. Mendiguren, L. Galdos, E. Mugarra, és E. Saenz de Argandoña, „Influence of the pressure dependent coefficient of friction on deep drawing springback predictions”, *Tribol Int*, köt. 103, o. 266–273, nov. 2016, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2016.07.004.
- [7] de C. L. Alexandre és L. Zsolt, „Influence of enhanced Coulomb’s model on the draw-in of the hood inner panel”, *Multidiszciplináris Tudományok*, köt. 12, sz. 4, o. 169–177, nov. 2022, doi: 10.35925/J.MULTI.2022.4.18.
- [8] M. Graf, S. Fritsch, és B. Awiszus, „Determination of forming behaviour of EN AW-6060 by different testing methods under cold bulk forming conditions”, *Procedia Manuf*, köt. 47, o. 1512–1519, 2020, doi: 10.1016/J.PROMFG.2020.04.339.