



Neumann János Egyetem
Műszaki és Informatikai
Kar

Geometriai jellemzők hatása stósz-nyomóvizsgálatok során

Effect of geometric characteristics in stack
compression test

Kölös Martin László
B9U035

Dr. Béres Gábor József, egyetemi adjunktus

2023

Tartalomjegyzék

BEVEZETÉS	2
1. IRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ	4
1.1. FOLYÁSGÖRBÉK ÁLTALÁNOS JELLEMZÉSE.....	4
1.2. EGYTENGELYŰ NYOMÓVIZSGÁLAT ÁLTALÁNOS BEMUTATÁSA	7
1.3. EGYTENGELYŰ NYOMÓVIZSGÁLATALKALMAZÁSA LEMEZEKEN	12
2. A HALMAZZÖMÍTŐVIZSGÁLATOK ELŐKÉSZÍTÉSE ÉS VÉGREHAJTÁSA	15
2.1. A GÉP KIVÁLASZTÁSA	15
2.2. A NYOMÓLAPOK KIALAKÍTÁSA	16
2.3. POZÍCIONÁLÓKÉSZÜLÉK BEMUTATÁSA	17
2.4. A VIZSGÁLATHOZ HASZNÁLT PRÓBATEST ÉS KENŐANYAG	18
2.5. A VIZSGÁLATOK ELŐKÉSZÍTÉSE ÉS VÉGREHAJTÁSA.....	19
3. EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA	22
3.1. AZ ELMOZDULÁSI HIBA KOMPENZÁLÁSA	22
3.2. AZ ERŐ-ÚT DIAGRAMMOK KISZERKESZTÉSE	22
3.3. A FESZÜLTÉG- ALAKVÁLTOZÁS DIAGRAMOK KISZERKESZTÉSE	23
3.4. SÚRLÓDÁSI EGYÜTTHATÓK ÉS AZ U KORREKCIÓS ÉRTÉK	24
3.5. A FOLYÁSGÖRBÉK KISZERKESZTÉSE.....	26
ÁBRAJEGYZÉK	30
IRODALOMJEGYZÉK	31
ÖSSZEFOGLALÁS	32

Bevezetés

Napjainkban az ipar számos területén figyelhető meg jelentős mértékű fejlődés. Ennek köszönhetően a lemezanyagokat is egyre szélesebb körben használják, hiszen alkalmazásuk számos előnyt rejt magában. Ilyen például a tömeggyártásra való alkalmasság, alacsony tömeg, előnyös mechanikai tulajdonságok vagy a jó megmunkálhatóság. Annak érdekében, hogy pontosan megtervezzünk egy gyártási folyamatot, elengedhetetlen bemeneti paraméter az anyagra jellemző folyásgörbe, mely leírja az anyagi viselkedését a különböző igénybevételek hatására.

A feladatom az volt, hogy egytengelyű nyomóvizsgálatokat hajtsak végre DC04 autóipari lemezanyagon. A kutatás szempontjából érdekes volt, hogy a munkadarab magassága egy esetben megegyezett a lemezvastagsággal így létrehozva egy rendkívül alacsony magasság-átmérő viszonzszámot, más esetben viszont a magasság átmérő viszony egységnyi volt. Azért, hogy képet kapjak a geometriai viszony jelentőségéről, hatásáról, több próbatestet egymásra helyezve ismét elvégeztem a vizsgálatokat, ezáltal jelentősen növelve a magasság-átmérő viszonzszámot, úgy, hogy a munkadarab geometriája változatlan maradt.

A kísérlet során törekedtem a munkadarab és a szerszámfelek között ébredő súrlódás minimalizálására. Több egymásra helyezett korong esetén, viszont nem alkalmaztam kenést a munkadarabok között, mellyel az volt a célom, hogy a torony minél inkább tömbi viselkedést produkáljon.

Kutatásom során három fő célt fogalmaztam meg, melyek közül az első, hogy kiserkesszem a DC04 autóipari lemezanyag folyásgörbjét a szakítóvizsgálattal létrehozható alakváltozási tartománynál magasabb tartományban. Ezt úgy értem el, hogy korrekciótam a berendezés által mért erő-út diagrammot, így megkapva a valódi erő-út diagrammot. Ezt követően a szakirodalmakban fellelhető képletek segítségével származtattam a felületi nyomást, az alakváltozást, végül az alakítási szilárdságot. Az alakítási szilárdság és az alakváltozás ismeretében létrehoztam a folyásgörbjét. A második, hogy felmérjem a módszer megbízhatóságát a különböző elrendezések esetén, ezenfelül vizsgáljam az eltérő geometriai viszonyok folyásgörbjére gyakorolt hatásást. Ezt úgy valósítottam meg, hogy összehasonlítottam a kapott eredményeimet a szakítóvizsgálatból származó eredményekkel, valamint egymással. A harmadik pedig, hogy vizsgáljam a kísérlet során fellépő súrlódás jellegét és a folyásgörbjére tett befolyását. Ezt úgy értem el, hogy összehasonlítottam azokat a folyásgörbjeket melyeket úgy szerkesztettem ki, hogy a súrlódási együtthatót konstansnak feltételeztem a kísérlet folyamán, azokkal melyek

kiszerkesztése során a súrlódási együtthatót a nyomás növekedése függvényében változónak tekintettem.

A helyszínt és a méréshez szükséges eszközöket, kenőanyagot, valamint a vizsgálandó munkadarabokat a Neumann János Egyetem biztosította a számomra. Dolgozatom a témában releváns irodalmakból készült áttekintéssel kezdődik, melyet eredményeim bemutatása követ.

1. Irodalmi összefoglaló

Dolgozatom az egytengelyű nyomóvizsgálatból származtatható folyásgörbe felvétel témakörével foglalkozik. Ennek függvényében a következő alfejezetekben elsősorban ennek a két fogalomnak a kibontás lenne a cél, továbbá ismertetni a leggyakrabban alkalmazott vizsgálati módszereket lemezek esetén.

1.1. Folyásgörbék általános jellemzése

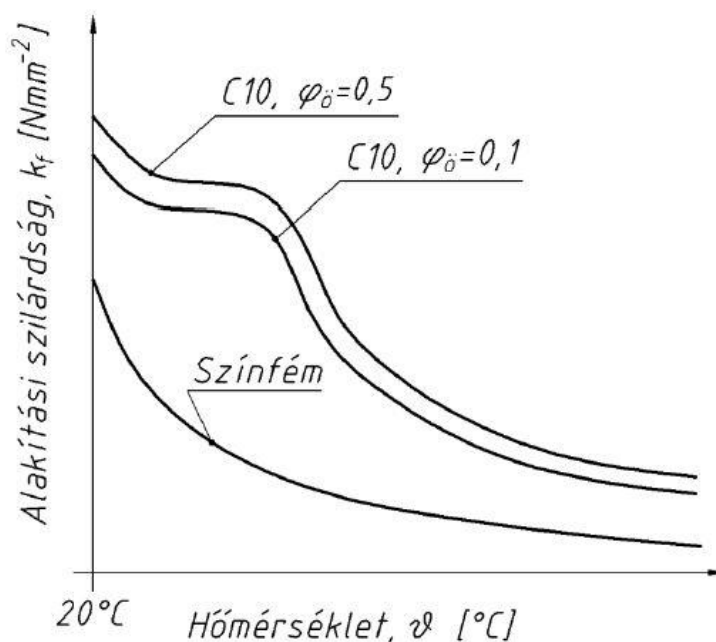
A folyásgörbék elengedhetetlen eszközei azoknak fémmegmunkálási folyamatoknak, melyek során az anyag képlékeny alakításon esik át. Ilyenkor a testet külső erőhatásokkal terheljük, melynek következtében annak méretei és alakja maradandóan megváltozik úgy, hogy anyagfolytonossága és szerkezete nem változik meg és térfogata is változatlan marad. [1].

Az alakítást végző erőhatásnak köszönhetően az anyag egy adott keresztmetszetén feszültség ébred, melyet a következő összefüggés ír le [2].

$$\sigma_c = \frac{F}{A}. \quad (1.1)$$

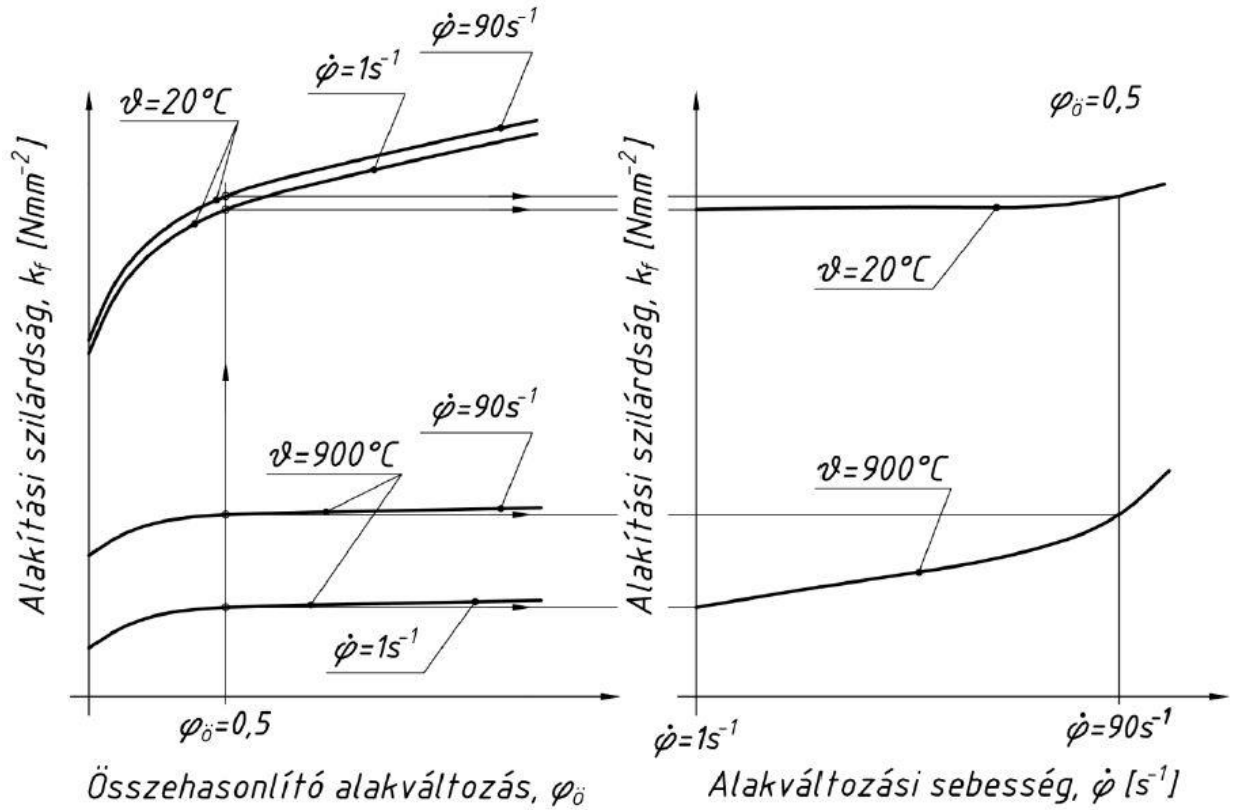
Az F a fellépő erő, A pedig az erőre merőleges keresztmetszet.

Az alakítási szilárdság ismerete elengedhetetlen az anyagra jellemző folyásgörbe kiserkesztéséhez. Ez egy olyan feszültség jellegű mérőszám, mely egytengelyű feszültségi állapotban megadja a képlékeny alakváltozás megindulásának a feltételét. Értékét három fő tényező befolyásolja. A hőmérséklet hatását az alakítási szilárdságra az 1.1 ábra mutatja be



1.1 ábra: A hőmérséklet hatása az alakítási szilárdságra [1]

ahol φ_0 az összehasonlító alakváltozás. Az alakítási sebesség hatását az alakítási szilárdságra az 1.2 ábra hivatott ismertetni



1.2 ábra: Az alakítási szilárdság és az alakváltozási sebesség kapcsolása [1]

ahol ϑ az alakítási hőmérséklet. Az alakváltozás mértékének növekedésével nő az anyagra jellemző alakítási szilárdság. Ez az anyagban lejátszódó diszlokáció vándorlásnak, sokszorozódásnak köszönhető. Az 1.1 és az 1.2 ábrán jól látható, hogy alakításból származó növekedés és általában az alakítási szilárdság értéke csökkenthető a hőmérséklet növekedésével. Az alakítási sebesség szerepe az alakítási hőmérséklet növelésével fokozódik (1.2 ábra). Általánosan elmondható, hogy az alakváltási sebesség növelésével nő az alakítási szilárdság, azonban melegalakítás során ez a növekmény drasztikus mértékű is lehet. Ez betudható az anyagban lejátszódó kristálytani átalakulásoknak, melyek lezajlására nem jut elég idő, ezáltal növelve az alakítási szilárdságot.

Az alakváltozás mértékének meghatározása esetén beszélhetünk mérnöki, illetve valódi mérőszámokról. A következő egyenlet mérnöki alakváltozást definiál [3].

$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (1.2)$$

ahol, l_0 a kiinduló hossz, l_1 pedig a vizsgálat végén mért hossz.

A mérnöki mérőszámok élnek azzal az egyszerűsítéssel, hogy az anyag méretének a megváltozását mindig a kiinduló méretéhez viszonyítják, amely sok esetben megfelelő, viszont nagy alakváltozások esetén pontatlan. Ezért a képlékenyalakító folyamatok során valódi (logaritmikus) mérőszámok alkalmazása indokolt, melyek lényegi különbsége, hogy a méretbeli megváltozást mindig az éppen aktuális mérethez viszonyítják [1].

A valódi alakváltozást pedig a következő egyenlettel írható le [3].

$$\varepsilon = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right) \quad (1.3)$$

ahol l_0 a próbatest kiinduló hossza, Δl a hossz megváltozása.

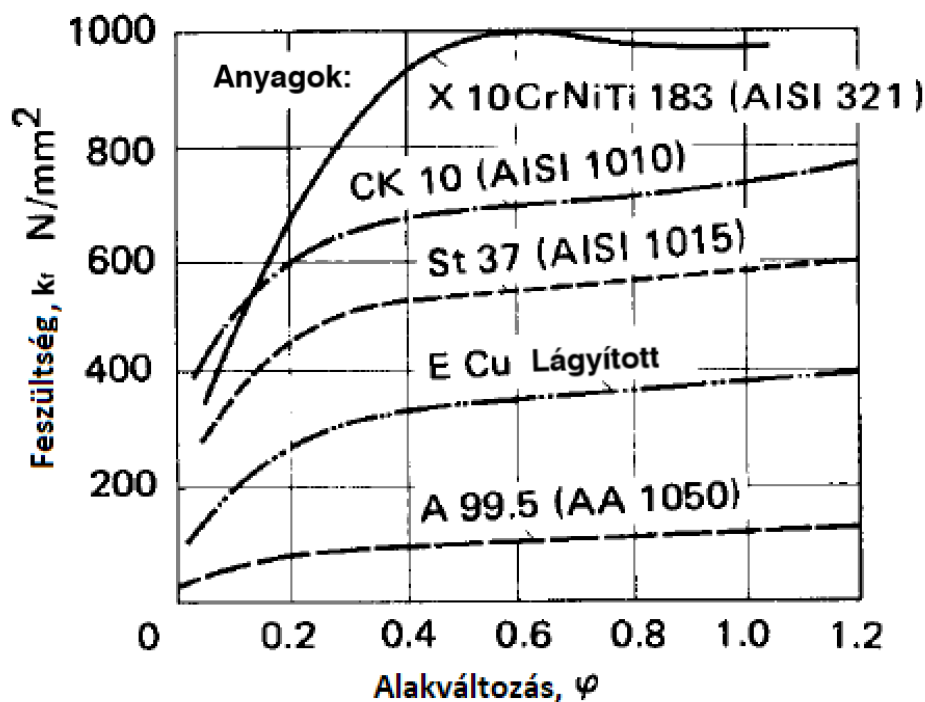
Feltételezzük, hogy érvényesül a térfogat állandóság törvénye. Ebben az esetben, ha az anyag a tér valamely irányában alakváltozást szenved el, akkor azt a fennmaradó két irány úgy kompenzálja, hogy az alakváltozások összege zérus legyen. Ezen elgondolást szem előtt tartva az 1.1-es képletben szereplő keresztmetszetet az alábbi módon fejezhető ki [2].

$$A = \frac{\pi \cdot r_0^2 \cdot l_0}{l_0 + \Delta l} \quad (1.4)$$

Így tehát a függvény,

$$\sigma_f = \sigma_f(\varepsilon) \quad (1.5)$$

Ezt tekintjük folyásgörbének, amely megadja azt a feszültséget, amely hatására egytengelyű feszültségi állapotban megindul az anyagban a képlékeny alakváltozás. Néhány anyag folyásgörbéje megtekinthető a 1.3 ábrán.



1.3 ábra: Különböző anyagok folyásgörbéje szobahőmérsékleten

A folyásgörbék meghatározására léteznek gyakorlati vizsgálatok, melyek között az egyik legismertebb a szakítóvizsgálat. Lényege, hogy egy szabványos próbatestet egytengelyű húzó igénybevételnek teszünk ki és terheljük tönkremenetelig. Ezt követően a mért erőből és a megnyúlásból kiszerezstjük az anyag szakítódiagramját, melyből különböző összefüggések segítségével megalkotjuk az anyag folyásgörbéjét. Az eljárás számos előnyt hordoz magában, mint például azt, hogy könnyedén elvégezhető rúd, illetve lemez anyagora egyaránt, a vizsgálat során nem jelentkezik súrlódás a kiértékelési tartományban vagy, hogy jól meghatározott a végrehajtás módja melyet a ISO 6892-1 szabvány [4] biztosít fémek esetére szobahőmérsékleten.

Az eljárás viszont rendelkezik fizikai korlátokkal, melyek nem teszik lehetővé azt, hogy képet kapjunk a magasabb alakváltozási tartományokról ($\varepsilon > 0,2$). Ez azért jelent problémát mert a gyakorlatban használt képlékeny alakító technológiák rendszerint meghaladják azt az alakváltozási tartományt, amelyet egyszerű szakítóvizsgálattal képesek vagyunk lefedni.

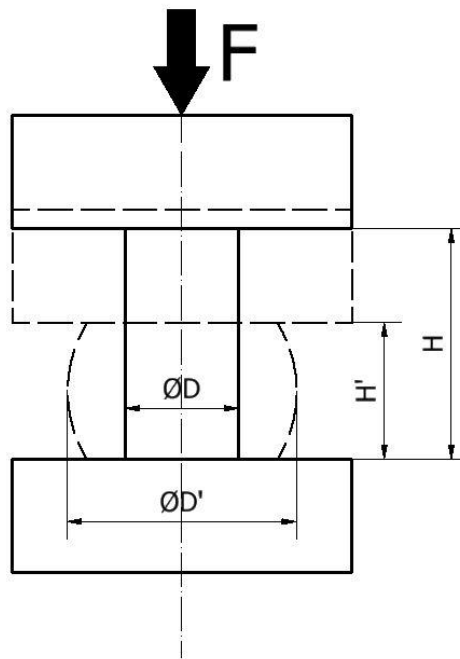
A következő alfejezetek azt vizsgálják miként lehet, áthidalni a fent említett problémát.

1.2. Egytengelyű nyomóvizsgálat általános bemutatása

Mint ahogy arról már korábban volt szó, a szakítóvizsgálat egy ideális eszköz folyásgörbe felvételi célokra, azonban vannak hiányosságai a vizsgálati tartományt illetően. Természetesen akadnak más módszerek is folyásgörbe meghatározásra melyeknek mind megvan a maga előnye és hátránya egyaránt. Az ilyen jellegű vizsgálatok kiválasztásakor az sem utolsó szempont, hogy az adott anyagot milyen technológiával kívánjuk alakítani. Akkor leszünk képesek legjobban jellemezni az anyagi viselkedést egy adott alakítási folyamat során, ha annak folyásgörbéjét a technológiához leginkább hasonlító módszerrel nyertük ki.

A zömítő vizsgálat az egyik legkézenfekvőbb alternatíva a szakítóvizsgálat helyettesítésére, hiszen köztudott, hogy a fémek jobban reagálnak nyomásra, mint húzásra. Ennek köszönhetően képesek vagyunk információt gyűjteni a szakító vizsgálattal elérhető alakváltozásnál magasabb alakváltozási tartományokból. Zömítő vizsgálatot végezhetünk újrakristályosodási hőmérséklet felett, ezt hívjuk meleg zömítésnek, illetve az alatt, melyet hideg zömítésnek nevezünk.

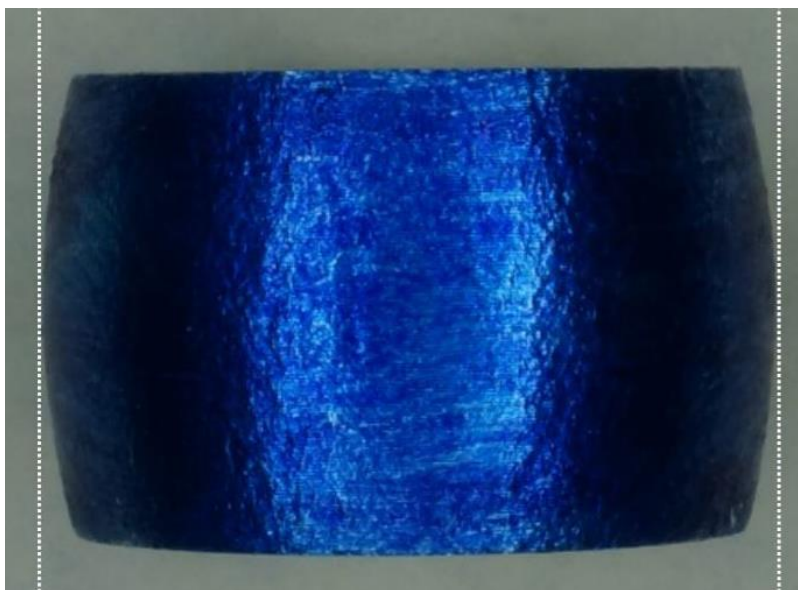
A módszer lényege, hogy sík, egymáshoz képest párhuzamos nyomólapok közé adott geometriájú próbatestet (leggyakrabban henger) helyeznek, majd azt egy külső erőhatással terhelik, mely magasságsökkenést idéz elő a mintadarabon. A 1.4 ábrán látható egy hengeres próbatest zömítővizsgálatának elvi ábrája [3].



1.4ábra: Hengeres test síklapok között történő zömítésének elvi vázlata

A vizsgálat közben figyelik az erő, illetve a geometria változását, később ezekből származtatják a folyásgörbét.

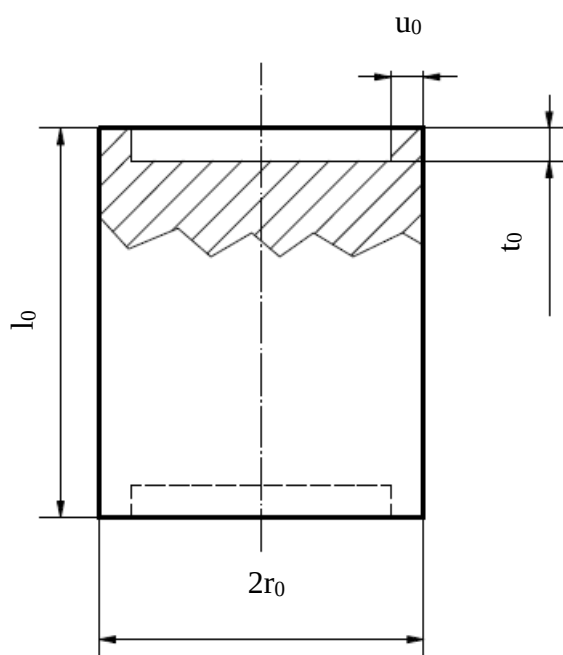
Mint ahogy a szakító vizsgálatnak, úgy a zömítővizsgálatnak is megvannak a maga nehézségei, korlátjai. Az egyik ilyen nehézség a nyomólapok és a munkadarab között fellépő súrlódási erő számbavétele, korrekciója. Erre azért van szükség, mert azon kívül, hogy a munkadarab végső geometriáját befolyásolja, még egy plusz erőkomponens is megjeleni a számolások során melynek értékét csak bonyolult számítások árán lehet meghatározni. A 1.5 ábrán a súrlódás által létrehozott geometriai elváltozás látható, melyet hordósodásnak nevezünk.



1.5 ábra: A hordósodás jelensége hidegzömített próbatesten [5]

A 1.5 ábrán jól látszik, hogy az összenyomott darab oldalfalai elvesztik sík tulajdonságukat, mitöbb jelentős eltérés jön létre a véglapátmérő és a középalátmérő között.

A súrlódás csökkentése érdekében alkalmazhatunk különféle kenőanyagokat. Ilyen például a politetrafluoretilén a molibdén-szulfid vagy a poliamid. Annak érdekében, hogy a legjobb kenést érjük el célszerű lehet szilárd és folyékony kenőanyagot egyszerre alkalmazni. Különösen jó eredmény érhető el a Rastegaev féle próbatestet használatával (1.6 ábra).



1.6 ábra: A Rastegaev féle próbatestet.

A próbatest két véglapján található üreg célja a kenőolaj tárolás, ezzel biztosítva a munkadarab megfelelő elhatárolását a nyomólapoktól. Ezzel a módszerrel képesek vagyunk, közel nullára redukálni a súrlódási együttható értékét mindezt úgy, hogy a megengedhető hibahatáron belül maradunk [6].

A Rastegaev féle próbatest nagymértékű alakváltozás esetén is képes megtartani a hengeres alakját, viszont a magasságsökkenésnél nagyobb mértékű hiba áll fenn, ugyanis a szerszámmal érintkező felületeit körülvevő falak kihajlanak, így az érintkező felületek nem maradnak síkban [7].

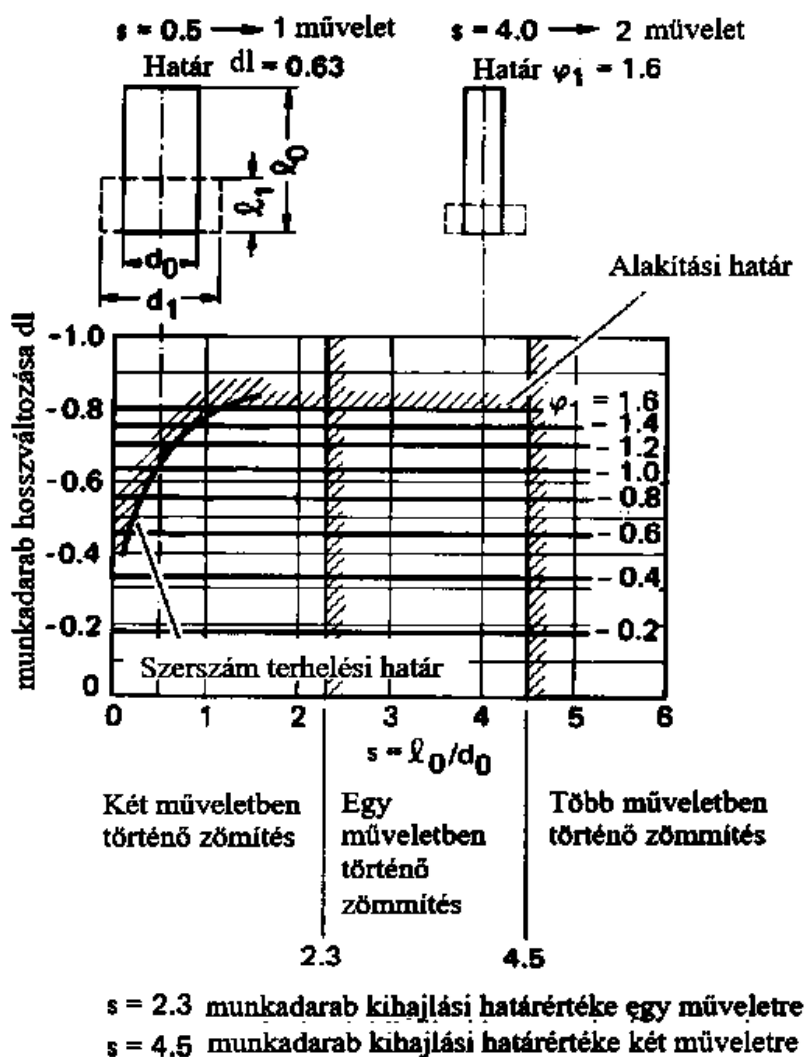
Egy zömítési folyamat végrehajtása során három olyan sarokpont jöhet szóba, mely gátat szabhat a folyamatnak. Az egyik az alakváltozás (ϵ) mértéke, mely nagyban függ a vizsgált alapanyagtól.

Az következő kritérium melynek meg kell felelni, a munkadarab geometriájára vonatkozik. Ez az úgynevezett zömítési arány [2].

$$s = \frac{l_0}{d_0} \quad (1.6)$$

Ez a paraméter azért nagyon lényeges, mert a rosszul megválasztott geometriai méretek könnyedén eredményezhetik a próbatest kihajlását. Amennyiben viszont, képesek vagyunk a zömítési arányt egy meghatározott érték alatt tartani az adott lépések során, úgy elkerülhető a kihajlás. Az utolsó szempont melyet figyelembe kell venni zömítés során az az, hogy mekkora magasságsökkenést (Δl) szenved el a próbatest egy művelet alatt.

Az 1.7-es ábra az acél hideg zömítésére vonatkozó megengedhető értékeket ad meg, amelyek mindhárom technológiai határértéket figyelembe veszik.



1.7 ábra: A hidegzömítés korlátai

Bár az egytengelyű nyomóvizsgálat kézenfekvő megoldás a nagy alakváltozási tartományban történő folyásgörbe meghatározásra, kiértékelhetőség szempontjából igen problémás amennyiben lemezanyagokról van szó. A nehézséget az jelenti, hogy még a kritikus paraméterek teljesülése esetén is nagyságrendekkel kisebb geometriai változás jön létre, mint nagyobb tömbi anyagok esetén. Ezek pontos kimérése, továbbá az a tény, hogy a nyomó berendezés pontatlansága jóval nagyobb értékű torzítást eredményez egy kisebb korongnál, teszi nehezen kiértékelhetővé a vizsgálatot.

A következő alfejezetben arról lesz szó, milyen alternatív megoldás létezik ezen problémák mértékének csökkentésére, kiküszöbölésére.

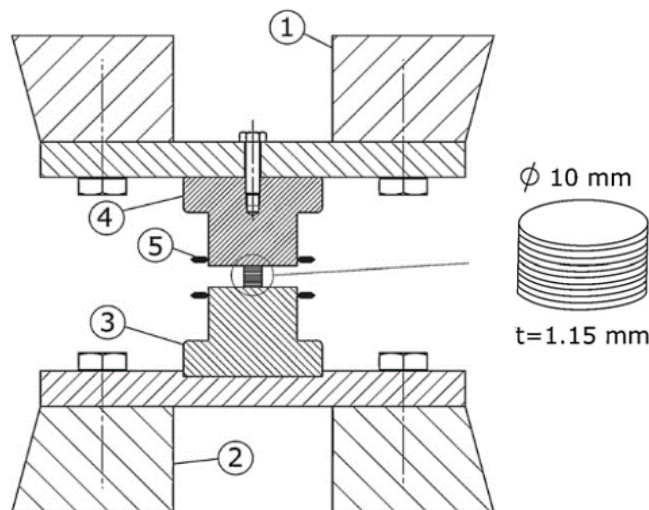
1.3. Egytengelyű nyomóvizsgálatalkalmazása lemezeken

Az egyszerű zömítő vizsgálat megvalósítása és kiértékelése hagyományos berendezések segítségével igen komplikált feladat.

A megoldást a halmazzömítő próba (SCT) jelenti melynek lényege, hogy több, ugyan olyan geometriával rendelkező lemez korongot helyezünk egymásra. Ezzel azt érjük el, hogy a próbatest teljes mérettartománya nő, még az egyes korongoké változatlan marad. A vizsgálat során feltételezzük a tömbi anyagviselkedést, melyet azzal segítünk elő, hogy a próbatestek között nem használunk kenőanyagot csak a nyomólapokkal érintkező felületeken.

A kutatók legjobb tudomása szerint Tozawa és Nakamura [8] végzett először halmaznyomósos zömítőpróbát fémlemezeken. A lemez geometriáját tekintve nincs megkötés, de leggyakrabban kör vagy nézet keresztmetszetű próbatestek egymásra helyezésével érik el a kívánt magasságot. A fémek anyagok nyomóvizsgálatát a DIN 50106 [9] szabvány írja le, amely a súrlódás hatásának mérséklése érdekében egy vagy annál nagyobb karcsúsági viszonyszámot ajánl. A halmaz nagymértékű csökkenésének szempontjából, azonban az a kedvező, ha ez az arány alacsony.

Az 1.8 ábrán látható a halmazzömítőpróba elvi vázlata, ahol t a halmazt felépítő lemez korongok vastagsága.



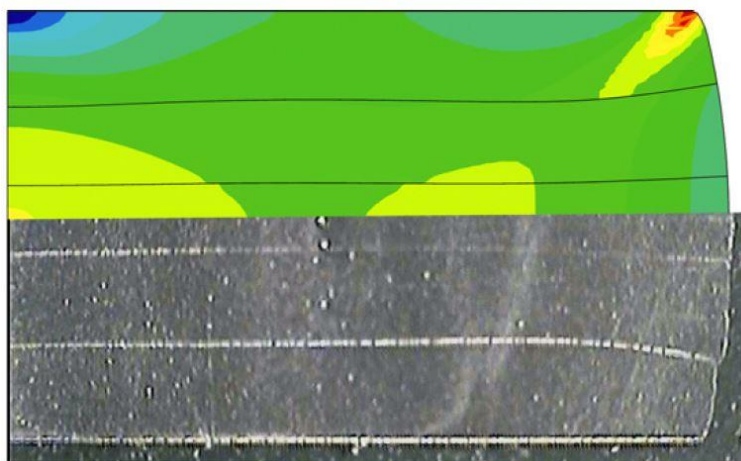
1.8 ábra: Halmazzömítő próba elvi ábrája (1, 2 szerszám ágy; 3, 4 zömítő szerszámpár; 5 extenzométer)[10]

An és Vegter [11] kimutatta, hogy kis karcsúsági viszony esetén a súrlódási hatásokat kompenzálni kell. Függetlenül a felhasznált módszertől, az esetek túlnyomó részében a súrlódási körülményeket, és ezáltal a súrlódási együttható értékét is állandónak feltételezzük.

A gyakorlatban azonban súrlódás viszonyok változó tendenciát mutatnak. A jelenség egyik magyarázata a kenés degradációja a vizsgálat előrehaladtával. Erre a megállapításra jutott An és Vegter [11] is, akik arról számoltak be, hogy olajozott PTFE-film használatával elérhető a közel konstans súrlódási viselkedés, mindaddig amíg a fólia alakváltozásának mértéke nem haladja meg a 20%-ot.

Megállapítottuk tehát, hogy nyomóvizsgálat során a súrlódási együttható értéke változik. Ésszerű feltételezés lenne azt mondani, hogy a próbatest és a szerszám felületén ébredő nyomás növekedésével nő a súrlódási együttható értéke is. Azonban Coppieters et al. [12] éppen az ellenkezőjéről számoltak be, mikor inverz módon azonosították a súrlódási együtthatót a DP600-as lemezanyagon halmazmómitópróba segítségével. A Felületi nyomás növekedésével súrlódási együttható jellege csökkenő, értéket 0,05 körüli volt.

Coppieters et al. [10] a DC05 autóiipari lemezanyagon hajtottak végre halmazmómitópróbát abból a célból, hogy jobban megismerjék az anyag felkeményedésére vonatkozó jellemzőket és a vizsgálat során létrejövő súrlódási viszonyokat. Eredményeiket igyekeztek végesselemes analízissel is alátámasztani, melyet az 1.9 ábra szemléltet.



1.9 ábra: Halmazmómitópróba eredményének összehasonlítása szimulációval [10]

Az 1.9 ábrán jól látszik, hogy a hordósodás jelensége ebben az esetben is tetten érhető, továbbá az is, hogy a szimuláció eredménye jó korrelációt mutat a vizsgálat eredményével. Az 1.9 ábra alapján elmondható az is, hogy a feltételezés, mi szerint az egymásra helyezett azonos geometriával rendelkező, de különálló lemezkorongok tömbi anyagként viselkednek helytálló.

Koizumi és Kuroda [5] kidolgozott egy módszert, melynek célja az volt, hogy a lehető legjobban leredukálják a fellépő súrlódásmértékét. Azért, hogy ezt elérjék, létrehoztak a nyomólapok felületén egy 1 mm vastagságú polikristályos gyémánt bevonatot

szinterezéssel. Arra a következtetésre jutott, hogy egy lágyacél esetében, az folyásifeszültség összenyomáskor egyértelműen nagyobb, mint húzáskor.

Az egyenértékű alakváltozás a logaritmikus valódi nyomó alakváltozásként az alábbi összefüggést felhasználva származtatható:

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{h_0}{h} \right) \quad (2.7)$$

Alves et al. [13] megállapították, hogy ugyan olyan eredményeket produkál több azonos geometriával rendelkező, egymásra helyezett lemez korong, mint ha egy ugyan olyan befoglaló méretekkel rendelkező tömbi anyagot vizsgálnánk. Alacsony karcsúsági viszonyszám esetén azonban kompenzálni kell a súrlódás hatását. A súrlódási kompenzációja az alábbi összefüggést eredményezte 1 korong esetére:

$$\sigma_f = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{átlag}}^c}{\left(\frac{h}{\mu \cdot r} \right) \cdot \left[e^{\frac{2\mu r}{h}} - \frac{2\mu r}{h} - 1 \right]} \quad (2.8)$$

ahol h az aktuális magasság, r a halmaz aktuális sugara és a μ súrlódási együttható. Az átlagos nyomófeszültséget következő összefüggés határozza meg:

$$\sigma_{\text{átlag}}^c = \frac{F \cdot h}{\pi \cdot r_0^2 \cdot h_0} \quad (2.9)$$

ahol F a mért erő, h_0 , r_0 pedig a halmaz kezdeti magassága és sugara.

A halmazzömítőpróba tehát lehetővé teszi számunkra a folyásgörbe felvételt lemezeknél a nagy alakváltozási tartományokban, viszont ennek a módszernek is megvannak a maga hátrányai, nehézségei.

Az egyik ilyen nehézség, a halmaz pozicionálásából fakad, ugyanis törekedni kell a korongok egytengelyűségére. Ez kézi pozicionálással igen nehézkes kivitelezni, ezért valamilyen készülék alkalmazása javasolt.

A másik probléma abban rejlik, hogy az egyes korongok nem egyforma módon nyomódnak össze, így a darabok közötti eltérés fennáll, mértékének meghatározása viszont nehézkes, mivel a halmaz alkotó elemei önmagukban sem egyenletesen alakváltoznak.

Ezzel végre értünk az irodalmi áttekintésnek, mely során szó volt a folyásgörbék felvételéhez szükséges jellemzőkről, a görbét befolyásoló tényezőkről, a zömítővizsgálat általános bemutatásáról, végrehajthatóságának gátat szabó viszonyokról, a módszer előnyeiről, hátrányairól.

Végezetül pedig áttekintettük a halmazzömítőpróba elvét, hozzá tartozó törvényszerűségeket, súrlódási viszonyok jellegét, hatásait.

A következő fejezetekben az általam végzett kutatómunka és annak eredményei kerülnek bemutatásra.

2. A halmazmómitővizsgálatok előkészítése és végrehajtása

Ebben a fejezetben a próbadarabok kialakításának módszeréről, az ahhoz használt alapanyagról, és a kialakításhoz szükséges berendezésről lesz szó. Természetesen ismertetésre kerülnek a vizsgálat lépései és bemeneti paraméterei egyaránt.

2.1. A gép kiválasztása

A vizsgálatokat az INSTRON 4482 elektromechanikus univerzális anyagvizsgáló berendezésen hajtom végre, mely alkalmas húzó, hajlító, nyíró és kompressziós igénybevételek kifejtésére, és a szilárdsági és képlékenységi jellemzők meghatározására. Az INSTRON 4482 anyagvizsgáló berendezés a 2.1 ábrán látható



2.1 ábra: Instron4482 univerzális anyagvizsgáló berendezés

A készülék 100 kN maximális terhelőerő kifejtésére képes. A számítógépes vezérlés lehetővé teszi, hogy pontosan meghatározott paraméterekkel kezdjük meg a vizsgálatok lebonyolítását. A kísérletek során a berendezés megjeleníti az erő elmozdulás diagramot is melynek pontjait adatsor formájában tudjuk menteni, később dolgozni velük.

hőkezelés követően keménységmérést hajtottam végre a darabok hátlapján. A mérések átlaga ~57HRC lett.

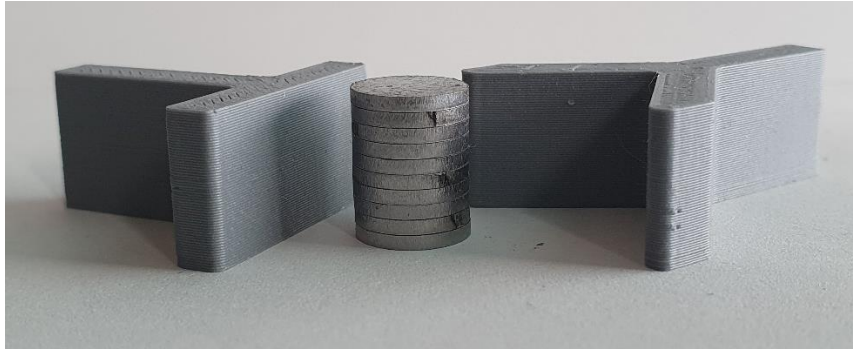
Végül a nyomófelületek polírozása következett, melyhez először fel kellett csiszolni a darabok felületét. A csiszoláshoz négy különböző szemcsenagyságú csiszolókorongot használtam, szám szerint 320; 600; 800 és 1200 voltak. A csiszolás követően polírozókorongot helyeztem a berendezésbe majd a megtisztított darabot az 1 μ m szemcsenagyságú polírozópasztával fényesre políroztam. Az elkészült nyomópogácsák a 2.3 ábrán láthatók.



2.3 ábra: Nyomópogácsák polírozás után

2.3. Pozícionálókészülék bemutatása

A darabok egytengelyűsége kulcsfontosságú a kísérlet szempontjából. Pozícionálásuk szabaddézi úton nem kivitelezhető, mert nehézkes és pontatlan. Így additív úton megalkotásra került egy pozícionáló egység, mely anyagát tekintve PLA és két félből áll. Az egyik rész egy T alak, párja pedig Y. A korongok egymásra helyezését követően a két féllal közrezárjuk a próbadarab halmazát. Ez pontszerű érintkezést eredményez, mely három helyen jön létre a munkadarabok palást felületei és a pozícionáló készülék között. Ezután óvatosan eltávolíthatjuk a készüléket. A pozícionáló készülék és az általa összerendezett korong halmaz a 2.4 ábrán tekinthető meg.



2.4 ábra: Pozícionáló készülék és korong halmaz

2.4. A vizsgálatához használt próbatest és kenőanyag

A vizsgálat alapanyagául a DC04 jelzésű lemezanyagot választottam, melynek ferrites szövetszerkezete, jó alakíthatósági tulajdonságokkal ruhazza fel azt. Ennek köszönhető, hogy előszeretettel alkalmazzák az autóiparban különböző külső panelek gyártására.

A próbatestek táblalemezből lettek kialakítva. A vágáshoz a Trumpf TruLaser Cell 7020 berendezést használtuk, mely egy 4KW teljesítményű dióda sugár forrású lézerberendezés. A készülék vágási pontossága $\pm 0,02$ mm. A vágás nitrogén gáz felhasználásával történt.



2.5 ábra: Trumpf TruLaser Cell 7020

A választott próbatest egy 10 mm átmérőjű kör keresztmetszetű hengeres test, melynek vastagsága közel 1 mm.

A vizsgálathoz felhasznált próbatestek mindegyikén jelölve van a lemez hengerlési iránya. A továbbiakban a párhuzamos irányra d_{0° , illetve a hengerlési irányra merőleges irányra d_{90° jelöléssel fogok hivatkozni.

Természetesen, a fent említett méretek névleges méretek. A valós méretek meghatározása 20 darab próbatest lemérésével és a mért értékek átlagolásával született meg. A kiinduló méretek átlagolt értékét a 2.2 táblázat hivatott bemutatni.

2.2 táblázat: A próbatest kiinduló méretei

d_{0° [mm]	d_{90° [mm]	$d_{90^\circ-0^\circ}$, átlag [mm]	s [mm]
9,73	9,88	9,805	1,05

Annak érdekében, hogy a lehető legjobb kenést biztosítsuk Luba 21 nagynyomású kenőfolyadékot alkalmaztunk melyet kifejezetten az ilyen jellegű vizsgálatokhoz ajánlanak. Mindezt azért, hogy csökkentsük a mérés során fennálló hordósodás és a vele járó bizonytalanság mértékét melyet a súrlódási erőkomponens jelenléte okoz.

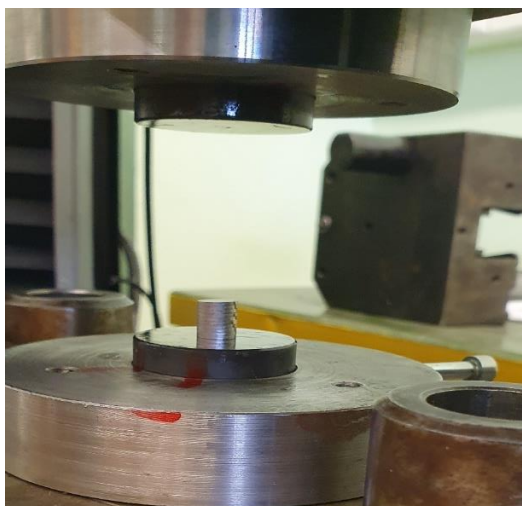
2.5. A vizsgálatok előkészítése és végrehajtása

A vizsgálatok elrendezését tekintve két esetet határoztam meg. Az első esetben egy korong zömítését valósítottam meg, még a második esetben ugyan ilyen korongokból tíz darabot egymásra helyezve alakítottam ki a próbatesteket (2.6 ábra). A vizsgálatokat ötször ismételtam meg minden esetben.



2.6 ábra: A kísérleti elrendezések

A nyomólapok felületére ecset segítségével Luba 21 nagynyomású kenőanyagot vittem fel. A második esetben a munkadarabok egymással érintkező felületein nem használtam kenőanyagot, ezzel is elősegítve a tömbi viselkedést. A 2.7 ábrán a vizsgálathoz előkészített próbatestek láthatóak.



2.7 ábra: A vizsgálatok végrehajtása

A darabokat a nyomólap felületén a pozicionáló készülék segítségével halmazba rendeztem. Erre úgy volt lehetőségem, hogy a próbatesteket előzőleg már egymásra helyeztem, ugyanakkor egytengelyűségüket a készülék két felének egymáshoz szorításával tudtam biztosítani. Végül a beszorított korongokat a nyomólap közepére igazítottam, majd a pozicionáló készüléket óvatosan eltávolítottam.

A keresztfej elmozdulása $v_{gyorsjárat} = 3 \frac{mm}{perc}$ sebességben valósult meg még az előterhelés mértéke el nem érte a 250 N-t. Ezt követően a keresztfej sebességére a 2.1 összefüggés teljesül.

$$v = \frac{h}{10} \quad (2.1)$$

ahol, h a zömített halmaz magassága. Ez alapján elmondható, hogy egy korong esetén $v_{h1} = 0,1 \left[\frac{mm}{perc} \right]$, még a tíz korongból megalkotott halmaz esetén $v_{h10} = 1 \left[\frac{mm}{perc} \right]$ volt. Ezt követően elvégeztem az egytengelyű nyomóvizsgálatokat mindkét esetre.

A nyomóvizsgálatokon átesett próbatestek a 2.8 ábrán láthatók.



2.8 ábra: A zömített próbatestek

A következő fejezetben bemutatom a vizsgálatok során alkalmazott kompenzációkat, a folyamat eredményeit és az azokból levonható következtetéseket.

3. Eredmények bemutatása

A következő fejezetben bemutatom a vizsgálatok eredményeit, feldolgozásuk menetét. Az ebben a fejezetben bemutatott diagrammok reprezentatív jellegűek, tekintettel a magas ismétlésszámra.

3.1. Az elmozdulási hiba kompenzálása

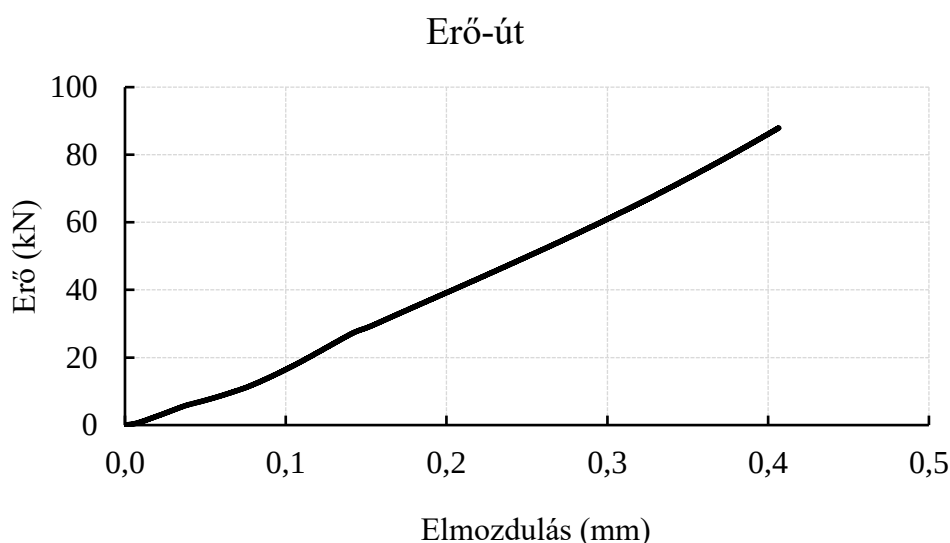
A mérések kiértékelésének első momentuma a gép hibájának kompenzálása volt. Egész egyszerűen a gép által mutatott elmozdulás értéke minden esetben nagyobb volt a valós elmozdulásnál. Ennek oka a gép rugalmas torzulása a vizsgálat során. Általános esetben ez a torzulás nem számottevő, viszont minél kisebb próbatestet vizsgálunk, a hiba értéke annál jelentősebb.

A hiba kiküszöbölése érdekében mérőhasábokat alkalmaztam, melyekkel a két nyomólap közötti távolságot mértem. A mért értékeket összehasonlítottam az INSTRON által kiírt elmozdulások értékével. Az összehasonlításból származó kompenzációs értékek 1 korong esetén 0,2709, míg halmaz esetén 0,8707 volt.

3.2. Az erő-út diagrammok kiszerkesztése

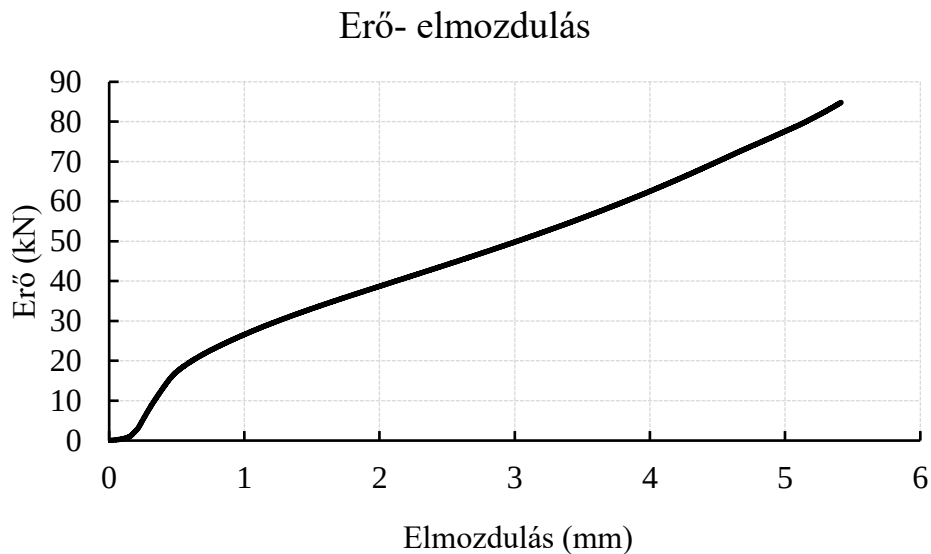
Az elmozdulás korrekciójása után lehetőségem nyílt az erő- elmozdulás diagramok felvételére, melyek nevükhöz hűen a vizsgálat során mért erőt ábrázolják az elmozdulás függvényében.

Az egy korong összenyomásából származó erő- elmozdulás diagrammot a 3.1 ábra szemlélteti



3.1 ábra: Az egy korong összenyomásából származó erő- elmozdulás diagram

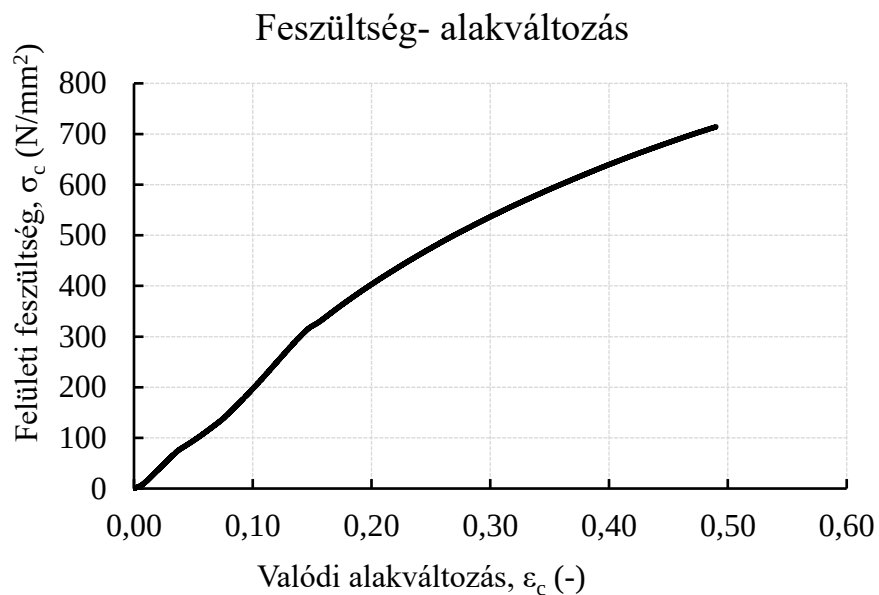
A 10 mm magas halmaz összenyomásából származó erő- elmozdulás diagram a 3.2 ábrán tekinthető meg.



3.2 ábra: A 10 mm magas halmaz összenyomásából származó erő- elmozdulás diagram

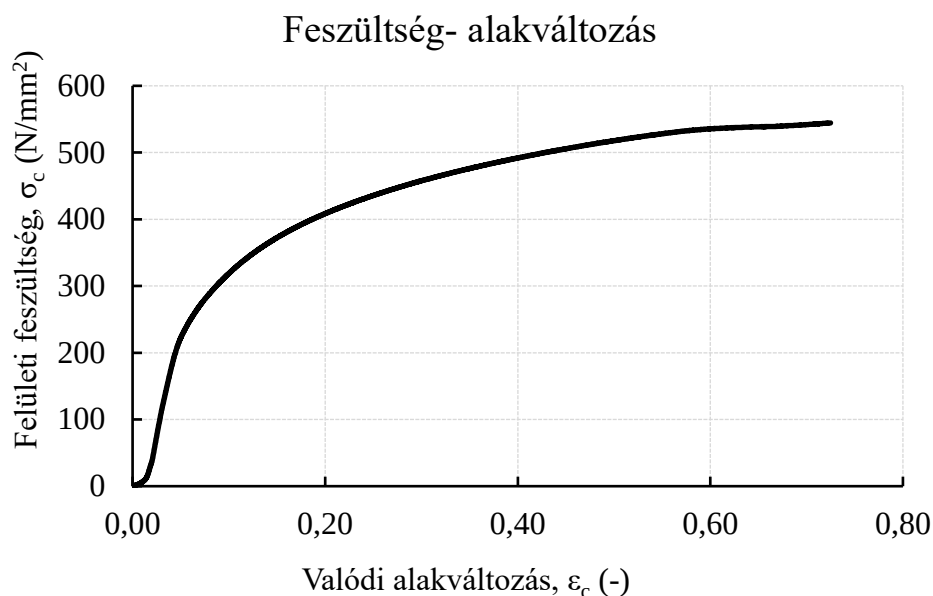
3.3. A feszültség- alakváltozás diagramok kiszerkesztése

Az erő- elmozdulás diagramok meglétében lehetőségem nyílt a feszültség- alakváltozás diagramok felvételére. Ehhez alkalmaztam az 1.1 és 1.3 egyenleteket, előbbivel a felületi feszültséget, utóbbival a valódi alakváltozást származtatva. Az egy korong összenyomásából származó feszültség- alakváltozás diagram a 3.3 ábrán látható.



3.3 ábra: Az egy korong összenyomásából származó feszültség- alakváltozás diagram

A 10 mm magas halmaz összenyomásából származó feszültség- alakváltozás diagram a 3.4 ábrán tekinthető meg.



3.4 ábra: A 10 mm magas halmaz összenyomásából származó feszültség- alakváltozás diagram

3.4. Súrlódási együtthatók és az U korrekciós érték

Végső célom elérése érdekében ismernem kell a súrlódási együttható értékét. Az eredmények feldolgozása során két esetet határoztam meg. Az első esetben a súrlódási együttható értékét (μ) állandónak tekintettem, még a második esetben a nyomás függvényében változónak. Utóbbi során az alábbi összefüggést alkalmaztam [14].

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{n-1} \quad (3.1)$$

ahol, p a felületi nyomás, p_0 és μ_0 referencia értékek és n pedig egy paraméter, mely értéke 0 és 1 között mozog.

Mindkét esetben a korábbi kutatásaim során megszerzett értékeket vettem alapul. Konstans súrlódási együttható esetén $\mu_{kons} = 0,07$ értéket alkalmaztam. Nyomásfüggőség esetén viszont a 3.1 táblázatban feltüntetett értékeket használtam.

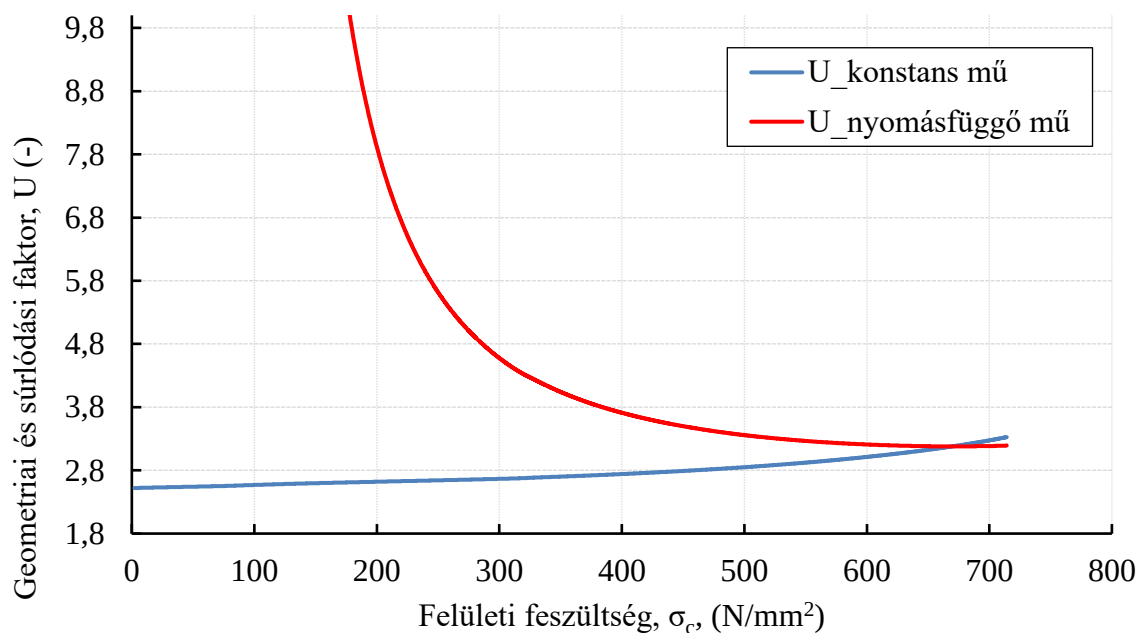
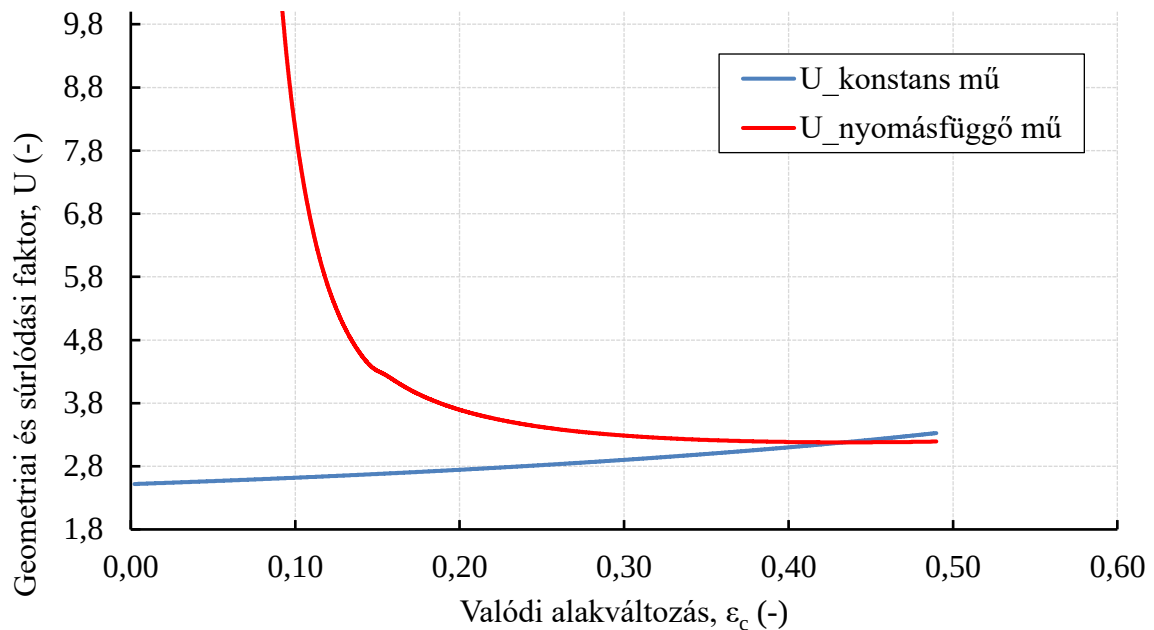
3.1 táblázat: Nyomásfüggő súrlódási együttható esetén használt paraméterek

μ_0	p_0	n
0,077	618	-0,1871

Bevezetésre kerül egy U korrekciós érték, mely a 2.8 egyenlet átrendezésével jön létre. Az átrendezés eredményét a 3.2 összefüggés mutatja be.

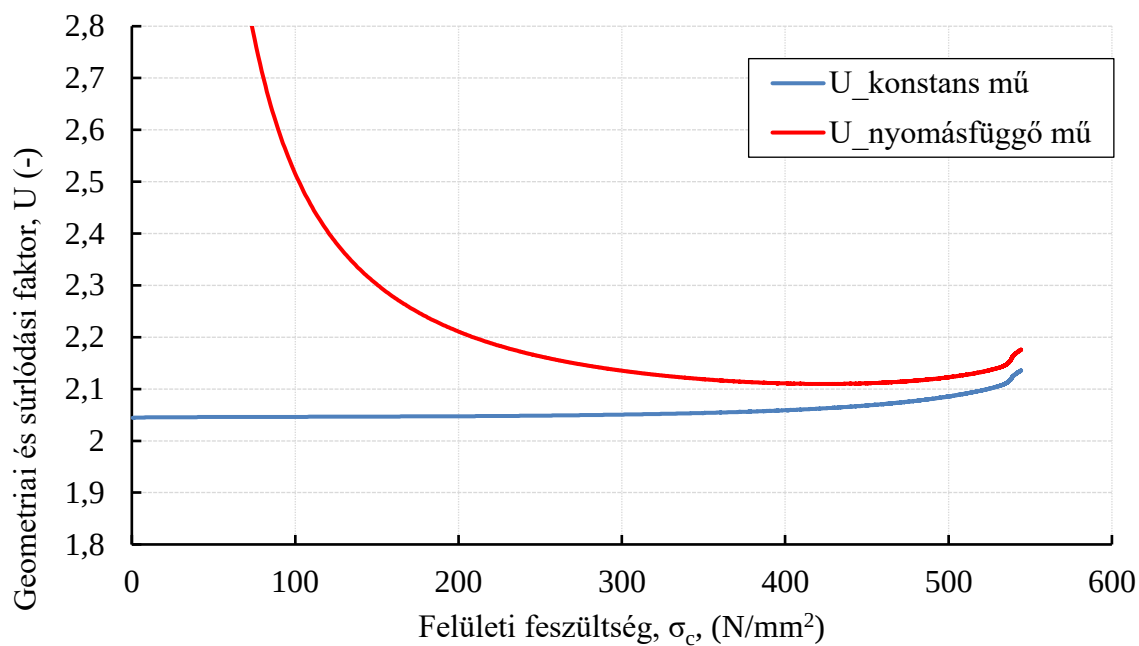
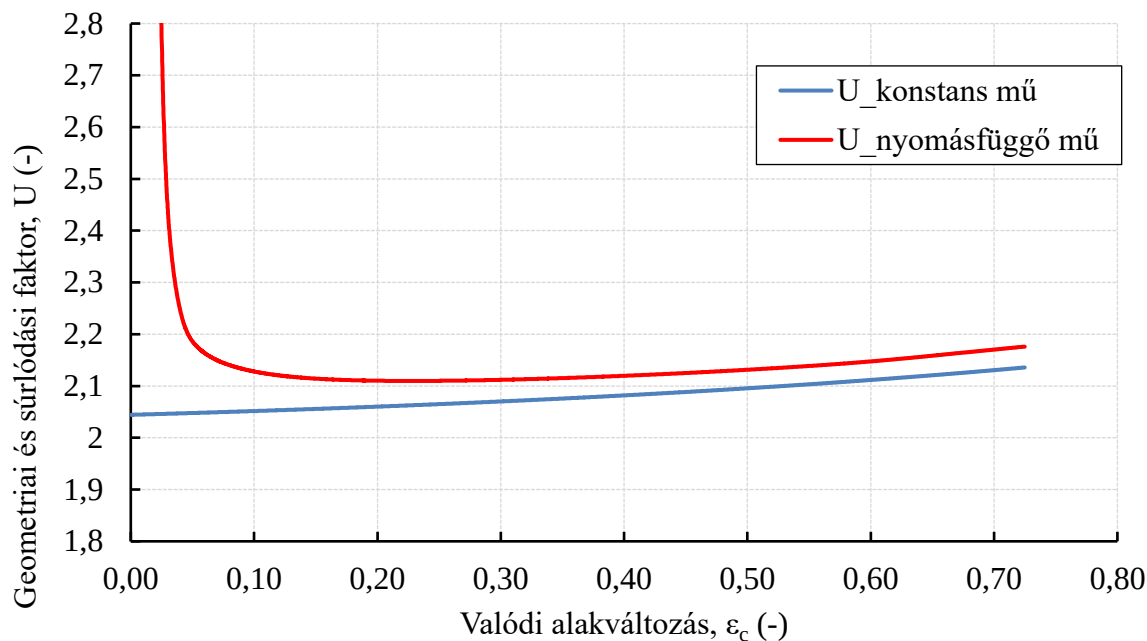
$$\sigma_f = U \cdot \sigma_{\text{átlag}}^c \quad (3.2)$$

Ennek köszönhetően képet kapunk az egyes súrlódási esetek során fennálló kompenzáció mértékéről. A 3.5 ábra szemlélteti az U értékének változását a valódi alakváltozás és a felületi feszültség függvényében egy korong összenyomása esetén.



3.5 ábra: Az U értékének változása a valódi alakváltozás és a felületi feszültség függvényében egy korong összenyomása esetén

A 3.6 ábra szemlélteti az U értékének változását a valódi alakváltozás és a felületi feszültség függvényében 10 mm magas halmaz összenyomása esetén.

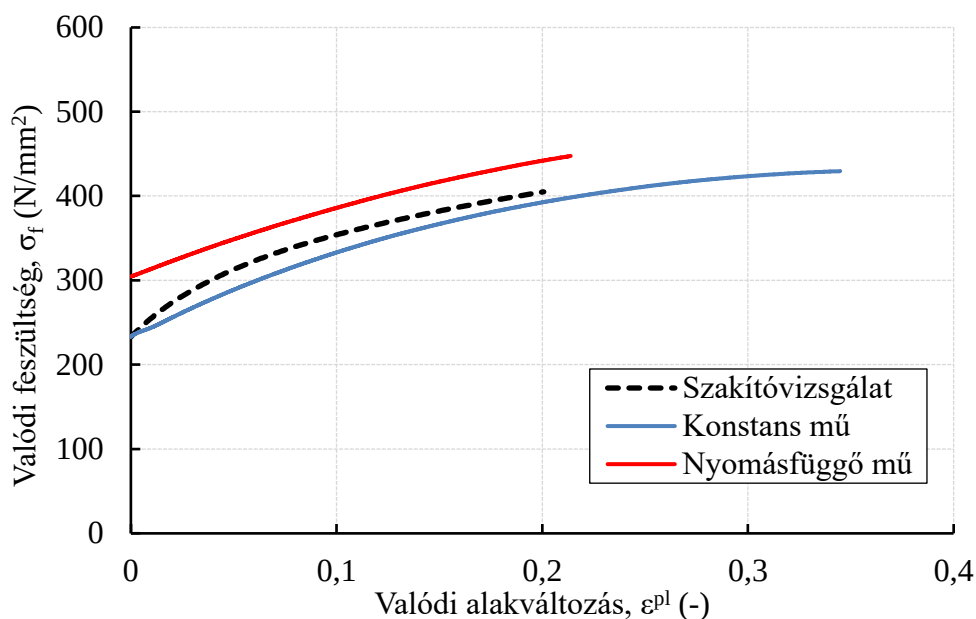


3.6 ábra: Az U értékének változása a valódi alakváltozás és a felületi feszültség függvényében 10 mm magas halmaz összenyomása esetén.

3.5. A folyásgörbék kiszerkesztése

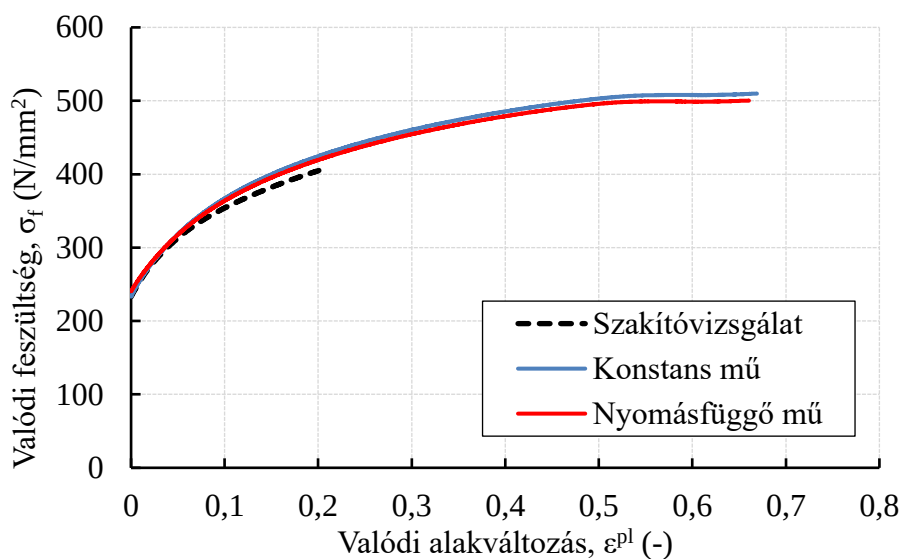
A folyásgörbék megalkotásához A felületi feszültséget valódi feszültséggé kellett alakítanom melyet a 2.8 egyenlet segítségével tettem meg. A diagramokon szerepel mind a

konstans, mind a nyomásfüggő μ alkalmazásával megszerzett folyásgörbe, valamint a szakítóvizsgálattal megszerzett folyásgörbe. Az egy korong összenyomásából származó folyásgörbék a 3.7 ábrán tekinthetjük meg.



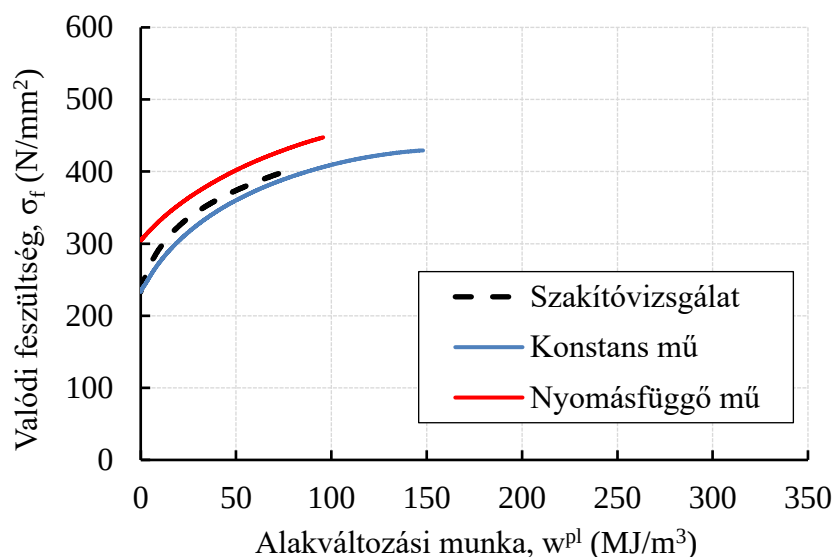
3.7 ábra: Az egy korong összenyomásából származó folyásgörbék

A 10 mm magas halmaz összenyomásából származó folyásgörbék a 3.8 ábrán tekinthetők meg.

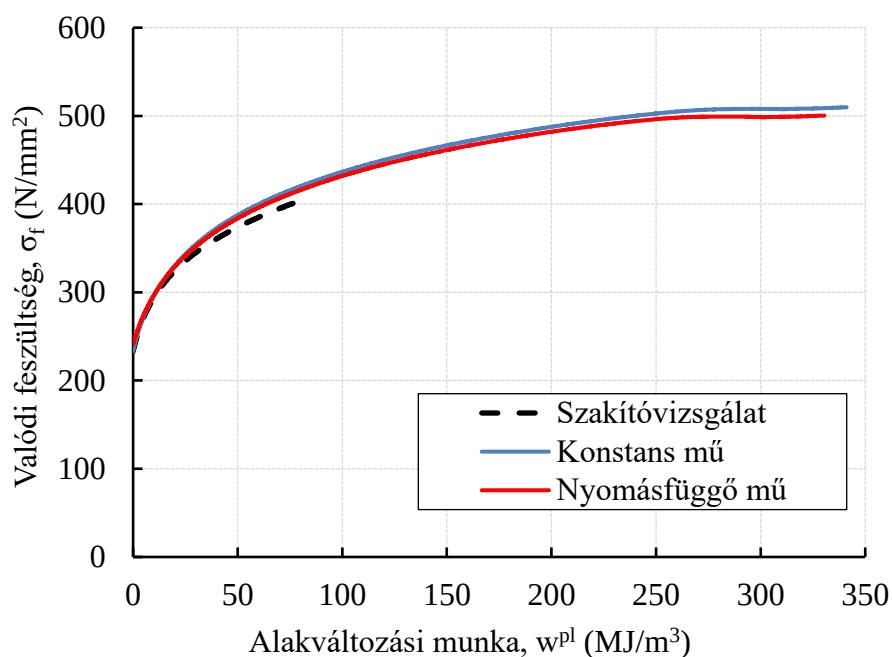


3.8 ábra: A 10 mm magas halmaz összenyomásából származó folyásgörbék

Jól látszik, hogy a folyásgörbék jelenlegi alakjukban nem összeegyeztethetők egymással. Így egy más megközelítést voltam kénytelen alkalmazni. A valódi alakváltozásból származtattam az alakváltozási munkát (w^{pl}), így megkapva a valódi feszültséget az alakítási munka függvényében (3.9; 3.10 ábra).

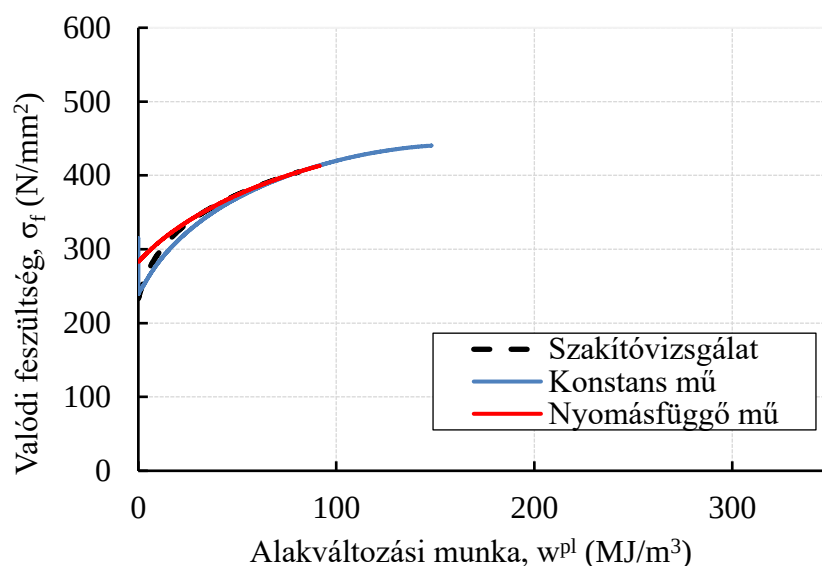


3.9 ábra: Az egy korong összenyomásából származó valódi feszültség- alakváltozási munka diagram



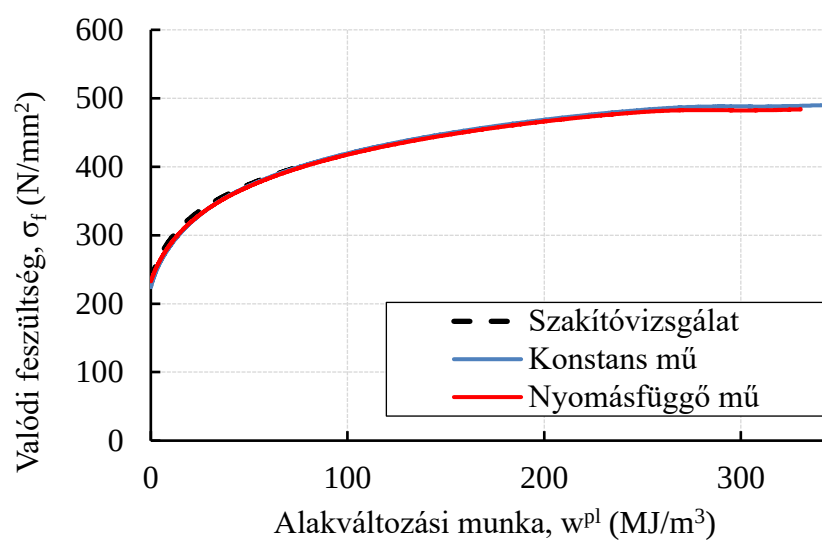
3.10 ábra: A 10 mm magas halmaz összenyomásából származó valódi feszültség- alakváltozási munka diagram

Az előző lépésre azért volt szükség, hogy a munkaazonosság tételét alapul véve egymásra illesszem a folyásgörbéket. Az illesztés eredményét egy korongra a 3.11 ábra szemlélteti.



3.11 ábra: A munkaazonosság tétele által illesztett folyásgörbék egy próbatest esetén

A 10 mm magas halmaz illesztett görbéi a 3.12 ábrán tekinthetők meg.



3.12 ábra: A munkaazonosság tétele által illesztett folyásgörbék 10 mm magas halmaz esetén

Ábrajegyzék

1.1 ábra: A hőmérséklet hatása az alakítási szilárdságra [1]	4
1.2 ábra: Az alakítási szilárdság és az alakváltozási sebesség kapcsolása [1]	5
1.3 ábra: Különböző anyagok folyásgörbéje szobahőmérsékleten.....	6
1.4 ábra: Hengeres test síklapok között történő zömítésének elvi vázlata	8
1.5 ábra: A hordósodás jelensége hidegzömített próbatesten [5]	9
1.6 ábra: A Rastegaev féle próbatestet.	9
1.7 ábra: A hidegzömítés korlátai.....	11
1.8 ábra: Halmazzömítő próba elvi ábrája (1, 2 szerszám ágy; 3, 4 zömítő szerszámpár; 5 extenzométer)[10].....	12
1.9 ábra: Halmazzömítőpróba eredményének összehasonlítása szimulációval [10].....	13
2.1 ábra: Instron4482 univerzális anyagvizsgáló berendezés.....	15
2.2 ábra: Nyomópogácsák hőkezelési diagramja	16
2.3 ábra: Nyomópogácsák polírozás után.....	17
2.4 ábra: Pozícionáló készülék és korong halmaz	18
2.5 ábra: Trumpf TruLaser Cell 7020.....	18
2.6 ábra: A kísérleti elrendezések.....	19
2.7 ábra: A vizsgálatok végrehajtása	20
2.8 ábra: A zömített próbatestek.....	20
3.1 ábra: Az egy korong összenyomásából származó erő- elmozdulás diagram.....	22
3.2 ábra: A 10 mm magas halmaz összenyomásából származó erő- elmozdulás diagram .	23
3.3 ábra: Az egy korong összenyomásából származó feszültség- alakváltozás diagram	23
3.4 ábra: A 10 mm magas halmaz összenyomásából származó feszültség- alakváltozás diagram	24
3.5 ábra: Az U értékének változása a valódi alakváltozás és a felületi feszültség függvényében egy korong összenyomása esetén.....	25
3.6 ábra: Az U értékének változása a valódi alakváltozás és a felületi feszültség függvényében 10 mm magas halmaz összenyomása esetén.....	26
3.7 ábra: Az egy korong összenyomásából származó folyásgörbék	27
3.8 ábra: A 10 mm magas halmaz összenyomásából származó folyásgörbék	27
3.9 ábra: Az egy korong összenyomásából származó valódi feszültség- alakváltozási munka diagram	28
3.10 ábra: A 10 mm magas halmaz összenyomásából származó valódi feszültség- alakváltozási munka diagram	28
3.11 ábra: A munkaazonosság tétele által illesztett folyásgörbék egy próbatest esetén.....	29
3.12 ábra: A munkaazonosság tétele által illesztett folyásgörbék 10 mm magas halmaz esetén	29

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Danyi József, dr. Végvári Ferenc, “Lemezmegmunkálás”. Kecskemét, 2011
- [2] Kurt Lange, Klaus Pöhlandt, Ragu S. Raghupathi, John D. Sainter, Wolfgang J. Sauer, John A. Schey, Klaus J. Wienmann, G.E.O. Widera, “Handbook of Metalforming”, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan 48121, U.S.A, 1985
- [3] D. Banabic, H.-J. Bunge, K. Pöhlandt, A.E. Tekkaya, “Formability of Metallic Materials”, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Singapore, Tokyo, 2000
- [4] ISO 6892-1
- [5] T Koizumi and M Kuroda, “Evaluation of tension-compression asymmetry of a low-carbon steel sheet using a modified classical compression test method”, Journal of Physics: Conference Series 1063 012167, 2018
- [6] Pöhlandt, K., “Upsetting test for determining flow curves after Rastegaev”, Ind.-Anz., 1979
- [7] Nester, W.; Pöhlandt, K., “Determination of flowcurves in different modifications of the upsetting test”, Rheol. Acta, 1982
- [8] Tozawa, Y., Nakamura, M., “Methods for testing in-line compression of sheets”. J. Jpn. Soc. Technol. Plast. vol. 8, 444–448, 1967
- [9] DIN 50106
- [10] S. Coppieters, P. Lava, H. Sol, A. Van Bael, P. Van Houtte, D. Debruyne, “Determination of the flow stress and contact friction of sheet metal in a multi-layered upsetting test”, Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 1290–1296, 2010
- [11] An, Y.G., Vegter, H., “Analytical and experimental study of frictional behavior in through-thickness compression test”. J. Mater. Process. Technol. vol. 160, 148–155, 2005
- [12] Coppieters, S., Jackel, M., Kraus, C., Kuwabara, T., Barlat, F., “Influence of a Hydrostatic Pressure Shift on the Flow Stress in Sheet Metal”. Procedia Manuf. vol. 47, 1245–1249, 2020
- [13] Alves, L.M., Nielsen, C.V., Martins, P.A.F., “Revisiting the fundamentals and capabilities of the stack compression test”. Exp. Mech. vol. 51, 1565–1572. 2011
- [14] Gil I. et al., “Influence of the pressure dependent coefficient of friction on deepdrawing springback predictions”. Tribology International, (2016),

Összefoglalás

Kutatómunkám során egytengelyű nyomóvizsgálatokat hajtottam végre a DC04 jelű, vékony (1 mm-es névleges vastagságú) lemezanyagon. A kísérleteket két elrendezésben (1 mm magas és 10 mm magas halmaz) esetenként ötszörös ismétlésszámmal végeztem el. A kapott eredményekből meghatároztam az anyag folyásgörbéjét a szakítóvizsgálatoknál elérhető nagyobb alakváltozási tartományban.

Az eredmények kiértékelése során kétféle megközelítést alkalmaztam a súrlódás számbavétele szempontjából. Az egyik megközelítés szerint a súrlódási együttható konstans a kísérlet folyamán, még a másik szerint a nyomás növekedésének függvényében változik.

Eredményeimből jól látszik, hogy a 10 mm magas halmaz esetén nem jelentkezik számottevő eltérés a két eset között, ugyanakkor az 1 mm magas korong összenyomásából származó eredmények között jelentős eltérés tapasztalható. Ez alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a próbatest karcsúsági viszonyzáma hatással van a folyásgörbére, a mérés során alkalmazott súrlódás kompenzációt ennek tükrében kell megválasztani.

Későbbi céljaim közé tartozik, hogy mélyebb betekintést nyerjek súrlódási együttható és a munkadarab karcsúsági viszonyszámának kapcsolatába, tanulmányozzam a súrlódási együttható természetét, folyásgörbére tett befolyását. Annak érdekében, hogy elérjem céljaim, további kutatásokat tervezek végezni.