



Neumann János Egyetem
Műszaki és Informatikai
Kar

Síkalakváltozási feszültségi állapotot megtestesítő nyomóvizsgálatok kísérleti elemzése

Experimental analysis of plane strain compression tests

Szauter Bálint
K62SU0

Dr. Béres Gábor József, egyetemi adjunktus

2024

Tartalomjegyzék

BEVEZETÉS	3
1. A ZÖMÍTŐVIZSGÁLATOK ÉS A FOLYÁSGÖRBÉK IRODALMÁNAK ÁTTEKINTÉSE	4
1.1. FELHASZNÁLT ANYAG.....	4
1.2. A HENGERLÉS ELMÉLETE	6
1.3. FOLYÁSGÖRBÉKRŐL ÁLTALÁBAN	8
1.4. EGYÉB FOLYÁSGÖRBE FELVÉTELI PRÓBÁK.....	10
1.4.1. Szakítóvizsgálat	10
1.4.2. Hajlítóvizsgálat.....	12
1.4.3. Keménységmérés és a folyási feszültség kapcsolata	14
1.5. ALKALMAZOTT MÓDSZER – SÍKALAKVÁLTOZÁSI NYOMÓVIZSGÁLATOK	19
2. A MÉRÉSI KÖRNYEZET FELÉPÍTÉSE ÉS BEMUTATÁSA	30
2.1. KÍSÉRLET KÖRNYEZETE	30
2.2. SZERSZÁM.....	32
2.3. MUNKADARAB	32
3. A SÍKALAKVÁLTOZÁSI NYOMÓPRÓBÁK VÉGREHAJTÁSA	34
4. A KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE, FOLYÁSGÖRBÉK KISZERKESZTÉSE	36
4.1. AZ 1 MM VASTAGSÁGÚ LEMEZEK ÖSSZENYOMÁSA	36
4.2. MÁSODIK MÉRÉS AZ 1 MM VASTAGSÁGÚ LEMEZEN.....	39
4.3. AZ 1 MM VASTAGSÁGÚ LEMEZ HARMADIK MÉRÉSISMÉTLÉSE	42
4.4. 2 MM VASTAGSÁGRA HALMOZOTT LEMEZEK EREDMÉNYEI	45
4.5. A 2 MM HALMOZOTT VASTAGSÁGÚ LEMEZ MÁSODIK MÉRÉSISMÉTLÉSE	48
4.6. A 2 MM HALMOZOTT VASTAGSÁGÚ LEMEZ HARMADIK MÉRÉSISMÉTLÉSE.....	50
ÖSSZEFOGLALÁS	53
ÁBRAJEGYZÉK.....	54
IRODALOMJEGYZÉK	56

Bevezetés

Tanulmányaim megkezdésével párhuzamosan jelentkeztem a Mechanikai- és Lézersugaras Technológiák Kutató Csoportba, ahol az eltelt időben különböző projektekben vettem részt. Ekkor kezdtem el a fémek anyagok mechanikai tulajdonságainak mélyebb megismerésével foglalkozni. A témám a síkalakváltozási nyomóvizsgálatokra (Plane Strain Compression Tests) terjed ki.

Az képlékenyalakító technológiáknál sokszor jóval nagyobb alakváltozások ébrednek az anyagban, mint ami a szakítóvizsgálatoknál elérhető. Például egy mélyhúzás szimulációjakor ismerni kell a nagy alakváltozásokra érvényes folyásgörbét. Így bár a szakítóvizsgálatok elterjedten és jól alkalmazhatók a mechanikai tulajdonságok meghatározására, egyéb vizsgálati módszerek iránti igény is felmerült az idők során. A fenti célra különböző módszerek alakultak ki, ilyenek például a halmaz zömítő vizsgálatok, a hidraulikus mélyítővizsgálatok, a csavaróvizsgálatok, vagy a hajlítóvizsgálatok. A síkalakváltozási nyomóvizsgálat is erre szolgáló módszer.

Tudományos diákköri dolgozatomban a síkalakváltozási nyomóvizsgálatok alkalmazhatóságát kutattam, nagy alakváltozásokra érvényes folyásgörbék kiszerkesztése és a síkalakváltozási feszültségi állapotban mutatott anyagi viselkedés leírása céljából. Az általam vizsgált mérési módszer legfőbb hátránya, hogy a geometriai viszonyok miatt vékony lemezeknél az alkalmazhatósága megkérdőjelezhető a gépmerevségi, a súrlódási és egyéb hibák okán. Ezért dolgozatomban tanulmányoztam a halmaz zömítő vizsgálatok elvét, a több lemez egymásra helyezésével kapott eredményeket is, erre a vizsgálati eljárásra alkalmazva. Ez a vizsgálat lényegét tekintve szimulálja a vastagabb, robusztusabb lemezek síkalakváltozási nyomóvizsgálatából kapott eredményeket.

A kutatás során különös figyelmet fordítottam az alakváltozás során fellépő súrlódási tényezők csökkentésére, különböző kenőanyagok alkalmazásával. A mérési környezet minél pontosabban történő felállítására. A geometriai viszonyt, mint legfőbb hátrányát a síkalakváltozási nyomóvizsgálatoknak, különböző szerzőktől származó különböző feltételeknek vettem alá a pontosabban geometriai méretek megtervezése érdekében. A gépmerevségi hibából adódóan különböző elméletek felhasználásával korrekciózott eredményeket értem el, mind a halmaz zömítő vizsgálatok elvét alkalmazó vizsgálatok, mind pedig a hagyományos síkalakváltozási vizsgálatok esetén.

1. A zömítővizsgálatok és a folyásgörbék irodalmának áttekintése

A munkám célja megvizsgálni azt, hogy vékony, előre meghatározott méretű lemezeket önmagukban, illetve kettőt egymásra helyezve milyen hatékonysággal lehet alkalmazni a síkalakváltozási nyomópróbát, ezáltal feltárni milyen törvényszerűségek szerint vehető fel folyásgörbe. A vizsgálatok hidegen hengerelt ferrites szövetszerkezetű autóiipari lemezeken kerülnek elvégzésre.

1.1. Felhasznált anyag

A vizsgálatokhoz felhasznált anyag DC04 anyagminőségű ötvözetlen, hidegen hengerelt acél. Az ötvözetlen acélokról érdemes tudni, hogy az ötvözött társaikhoz képest kifejezetten olcsóak egyszerű alkatrészekhez történő felhasználásra alkalmasak, amelyek nem támasztanak követelményeket a korrózióállósággal és a mechanikai terhelhetőséggel szemben.

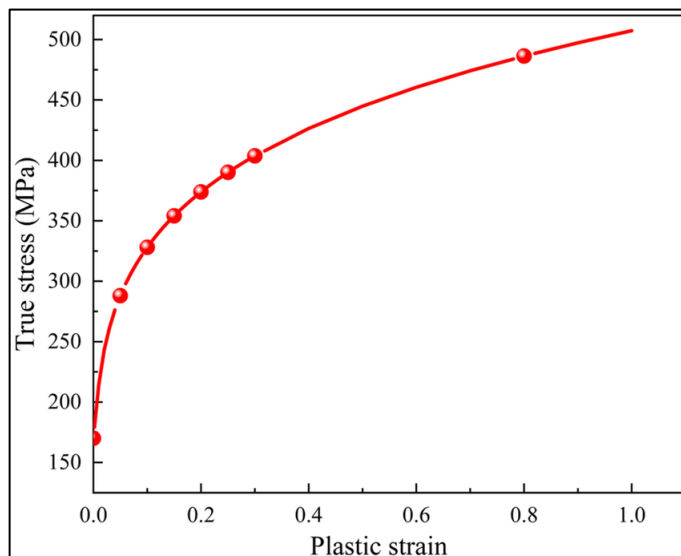
Függően az alkalmazási területtől az ötvözetlen DC acélok 01-től 05-ig terjedően különböző szilárdsági osztályokba sorolhatók, az izzított és keményre hengerelt változatokig. A DC04 anyagból felhasználhatóságát tekintve készíthető például különböző karosszériaelemek, bútorszerelvények, festett fémlemez burkolatok. Ellenben rugóanyagként nem használhatók ezek az ötvözetlen acélok. [18]

A „DC” a kifejezésben a „Drawing and Cold Forming” (húzás és hidegalakítás) rövidítése, vagyis ez az acélminőség alkalmas olyan eljárásokhoz, amelyekben az anyag húzása (az anyag nyújtása összetett formák létrehozásához) és hidegalakítása (az anyag szobahőmérsékleten történő alakítása) történik. A „04” az acél különleges kémiai összetételére és mechanikai tulajdonságaira utal. A DC04 acél viszonylag alacsony széntartalommal rendelkezik, melynek köszönhetően könnyebben befolyásolható különböző formák kialakítása, miközben a megfelelő szilárdságát és tartósságát megtartja.

Tipikus kémiai összetétele szerint az alapalkotó, vas mellett még maximum 0,08% szénből, 0,3% magnéziumból, 0,03% foszforból, és 0,03% kénből. Más szennyeződések is jelen lehetnek kis mennyiségben, de a fent felsorolt elemek az elsődleges alkotóelemek és szennyezők, amelyek alapvetően befolyásolják az anyag tulajdonságait.

Mechanikai tulajdonságaira térve lágyacélnak tekinthető, mely tulajdonságok alkalmassá teszik a formázásra, alakításra, és egyéb alkalmazásformákra. A következőkben kisebb részletességgel kifejtem a felhasznált anyag attribútumait. A DC04 szakítószilárdsága jellemzően 270 és 410 MPa között mozog, olyan tényezőktől függően, mint a feldolgozási

körülmények és az anyag vastagsága. A szakítószilárdság azt a maximális szakító (húzó) erőt méri, amelyet egy anyag a törés előtt elvisel.



1. ábra: Valódi feszültség a plasztikus nyúlás függvényében DC04 esetén [14]

Folyáshatára 210 és 360 MPa közötti értéket vehet fel. A folyáshatár azt a mechanikai feszültséget jelenti, amely tiszta húzás esetén az anyag maradó, plasztikus alakváltozását okozza. A nyúlás mértéke 28-34%. Ez az érték azt méri, hogy egy anyag milyen mértékben képes megnyúlni vagy deformálódni, mielőtt megrepedne. A magasabb nyúlási értékek jobb alakíthatóságot jelentenek. A szóban forgó anyag feszültség – képlékeny alakváltozás diagramját a 1. ábra mutatja.

Keménysége a feldolgozási körülményektől és a hőkezeléstől függően változik. Általában a 40-50 Rockwell-B keménység (HRB) tartományba esik. Alakíthatóság szempontjából kiváló, azaz bonyolult alkatrészek is készíthetők belőle, repedés vagy szakadás nélkül. Ezen felsorolt tulajdonságokat befolyásoló körülmények, tényezők, a gyártás során végzett hengerlési és lágyítási folyamatok, valamint a tervezett alkalmazások sajátos követelményei.

A hideghengerlési eljárás a DC04 anyag gyártásának kulcsfontosságú lépése, mivel ez adja meg az acélnek a kívánt mechanikai tulajdonságokat, a felületi minőséget és a méretpontosságot. Az eljárás egyébként meleghengerléssel kezdődik, amikor is az acél magas hőmérsékletre történő hevítést követően hengereken vezetik át, ezzel csökkentve a vastagságát. A meleghengerlés javítja az anyag szemcseszerkezetét, és előkészíti azt a további feldolgozásra. [19]

Ezt követően szabályos hűtésnek, majd hideghengerlésnek vetik alá. Ebben a lépésben ugyanúgy többféle hengerállványon vezetik át, csak szobahőmérsékleten. Ez a folyamat

összenyomja és megnyújtja az anyagot, deformálja szemcseszerkezetét, fokozatosan csökkentve annak vastagságát és javítva a felületét. A feszültségek csökkentésére és az anyag tulajdonságainak további javítására közbenső hőkezelési lépéseket vezethetnek be. Ez magában foglalja az acél bizonyos hőmérsékletre történő melegítését, majd lassú hűtését. Ezzel a mikroszerkezet is finomítható. Utolsó lépésként egy simítási stratégiát alkalmaznak, mely sima, egyenletes felületet kölcsönöz az acélnek. Az 1. táblázatban a DC04 jelű anyag főbb tulajdonságai láthatók.

1. Táblázat: DC04 anyag alapvető tulajdonságai [18]

Mechanikai tulajdonságok	
Szakítószilárdság [Mpa]	270-350
Folyáshatár [Mpa]	220
Nyúlás (A80) [%]	37
Húzószilárdsági exponens	0,170
Kémiai összetétel	
Szén (C)	max. 0,08
Foszfor (P)	max. 0,03
Kén (S)	max. 0,03
Mangán (Mn)	max. 0,40

Összességében a DC04 anyag jelentősége a modern gyártásban tagadhatatlan. Tulajdonságainak keveréke, beleértve a kivételes alakíthatóságot, sok komponenshez elfogadható szilárdságot, az autóipartól az építőiparig az egyik sokat alkalmazott anyagává teszi. Ahogy az iparágak tovább fejlődnek, a DC04 szerepe a technológiai fejlődés és a hatékony, tartós és fenntartható anyagok iránti növekvő kereslet hatására tovább fog nőni. A következő fejezetben a hengerlés technológiáját, mint a DC04 jelű acél fő gyártástechnológiáját fogom röviden ismertetni.

1.2. A hengerlés elmélete

[15] A képlékenyen alakított lemeztermékek zömét hengerléssel állítják elő, akár többszörös hengerléssel is (előnyújtó és készrehengerlés, meleg- és hideghengerlés). A különféle hengerek alakítószerszámai lehetnek hengeres, görgős vagy éppen tárcsaalakú forgó testek, amelyek párosával működnek. Ezek az együttműködő hengerek egymással ellentétes irányban forognak, viszont tengelyeik egy síkban helyezkednek el és általában párhuzamosak. A hengerpár nem érintkezik egymással, köztük úgynevezett hengerrés vagy üreg található. Ebbe a résbe kell a hengerlendő darabot bevezetni, beszúrni, mely természetesen vastagabb, mint maga a rés, illetve keresztmetszete is nagyobb, ezáltal a

Szúrásnak nevezzük azt a műveletet, amikor a munkadarab áthalad a hengerek között. A kiinduló darabból a legtöbb esetben nem lehet egyetlen szúrással a kívánt méretű és alakú szelvényt kialakítani. A több szúrás számszerűsített összegét hívjuk szúrásszámnak. Hengerléskor az alakítóerő hatására a hengerek, a hengerállító sorok, a csapágyak rugalmas alakváltozást szenvednek. Ebből az következik, hogy a hengerrés megnövekszik, vagyis a hengerek közül kifutó darab vastagsága a rugalmas alakváltozás mértékével nagyobb lesz, mint amekkorára az előzetes hengerrés be volt állítva. A résnövekedés mértéke függ az alakítóerővel terhelt szerkezeti elemek méreteitől, a hengerek átmérőjétől, testhosszától és anyagától, de ez általában a hengerátmérő 0,3...1,0%-a. A térfogatállandóság következtében a magasságsökkenéssel egyidejűleg a darab másik két mérete is változik, a hossza megnő, míg valamekkora növekedésen a szélesség szempontjából is átmegy, feltéve, hogy nem szélesedés nélküli hengerlésről beszélünk.

7

1.3. Folyásgörbékről általában

[6] Az anyagok alakításuk során összetett feszültségi állapotoknak vannak kitéve. Az alakításhoz szükséges feszültség, a folyási feszültség ezért több tényezőtől függ, mint például az alakváltozás, az alakváltozás sebessége, a hőmérséklete és a feszültségi állapota. Az egytengelyű szakítóvizsgálatokból érthetjük meg legegyszerűbben az anyagok viselkedését. A szakítóvizsgálati adatok alapján meghatározhatjuk az úgynevezett folyási feszültséget, bár ennek a módszernek korlátot szab a kontrakciónak nevezett lokalizált deformáció, mely az anyag egy pontban történő elvékonyodásával, majd elszakadásával jár.

A folyásgörbe a szakítódiagramhoz képest olyannyira hasonló görbe, hogy annak egy részét képezi bizonyos átszámítások figyelembevételével, a képlékeny tartományra összpontosítva. A folyásgörbéből határozható meg a folyási feszültség, mint egy adott alakváltozás vagy deformáció előidézéséhez szükséges feszültség, mely a következőképpen írható le Nádai elmélete szerint:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (1)$$

Ahol „K” a szilárdsági együttható (MPa), „ ε ” a képlékeny alakváltozás, illetve „n” az alakváltozási-keményedési kitevő. A legtöbb fém esetén ez az együttható $0,1 < n < 0,5$ közötti értéket vesz fel. Tehát ha tudjuk az alakváltozás végső értékét, akkor meghatározhatjuk a folyási feszültséget ezen egyenlet alapján. A folyásgörbén a feszültség és a deformáció értékek valódi feszültség és deformáció értékek.

[7] Ha egykristályoknak szeretnénk a folyásgörbét megkapni, akkor ezt a legegyszerűbb esetben az egytengelyű szakító-, vagy zömítővizsgálat során mért erő és nyúlás értékek alapján tudjuk meghatározni, felvenni. Az egyenletes nyúlás alatti feszültségtartományban feltételezzük, hogy a feszültség állandó a munkadarab a keresztmetszetében. Az F/A arányt, ahol „A” az aktuális keresztmetszet, „F” pedig az aktuális erő, hívjuk folyási feszültségnek (MPa):

$$\sigma_f = \frac{F}{A} \quad (2)$$

A legtöbb fém képlékeny alakváltozása esetén a térfogatismegmaradás feltétele jó pontossággal teljesül. Vagyis a tényleges „A” keresztmetszet kiszámítható a mért nyúlásból a következő módon:

$$A = \frac{\pi \cdot r_0^2 \cdot L_0}{L_0 + \Delta L} \quad (3)$$

Ahol „ L_0 ” a munkadarab kezdeti mérőhossza. Folytatva a sort az előzőek alapján, a folyási alakváltozás:

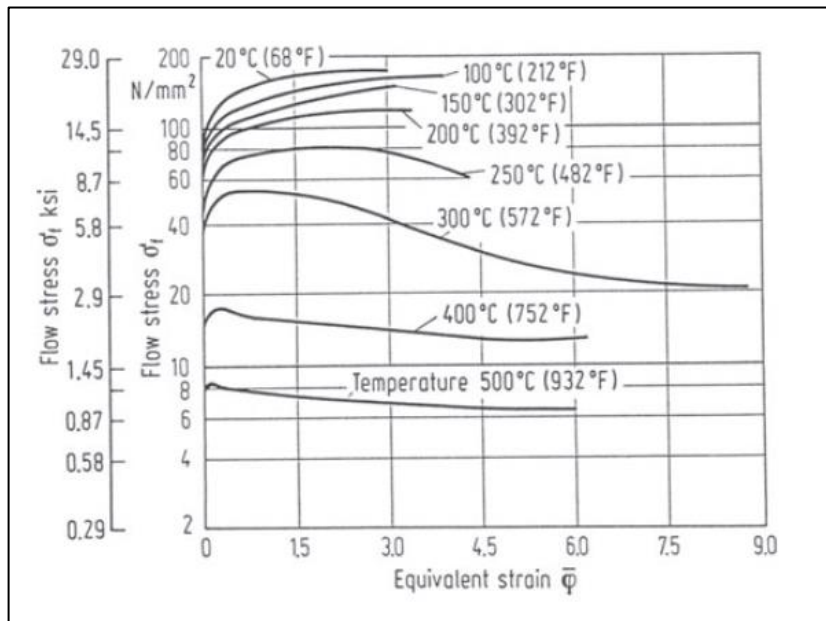
$$\varepsilon = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \quad (4)$$

Mely alapján a folyási feszültség-alakváltozás függvénykapcsolat:

$$\sigma_f = \sigma_f(\varepsilon) \quad (5)$$

Ezt hívjuk folyási görbének. Ez az egytengelyű feszültségi állapotban, a képlékeny alakváltozáshoz szükséges feszültséget adja meg, mely az eddig emlegetett folyási feszültség. Előre vetítve a saját esetemre, mely a síkalakváltozásokat veszi alapul, az esetben kéttengelyű feszültségi állapotról beszélhetünk.

Kibővítve az elméletet a polikristályok terére, a kísérletekből kapott folyásgörbék alapvetően a diszlokációk elméletével magyarázhatók. Az egykristályoktól abban térnek el, hogy az egyes szemcsék nem deformálódhatnak a szomszédos szemcséktől függetlenül. Ezért minden egyes szemcsében több, úgynevezett „csúszási rendszert” kell aktiválni. Magas hőmérsékleten, amikor megújulás és átkristályosodás zajlik, a folyásgörbék nagymértékben függenek a hőmérséklettől és az alakváltozás sebességétől. 220 °C feletti hőmérsékleten az alumínium anyagok folyásgörbéi egy lokális maximum feszültséget mutatnak. Erről látható több példa a 3. ábrán.



3. ábra: Az alumínium folyási feszültsége az alakváltozás függvényében különböző hőmérsékleteken [7]

Normál esetben, ha alakváltozás következik be, a folyási feszültség a hőmérséklet növekedésével csökken. Mivel mind a megújulás, mind pedig az újrakristályosodás véges, hőmérséklettől függő sebességgel megy végbe, ezért a folyási feszültség jelentősen függ az

alakváltozás sebességétől. Adott hőmérsékleten az alakváltozási sebességnek a folyási feszültségre gyakorolt hatását a következő összefüggéssel lehet közelíteni:

$$\sigma_f \approx \sigma_{f1} \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_1}\right)^m \quad (6)$$

Ahol „ σ_{f1} ” a folyási feszültség a „ $\dot{\epsilon}_1$ ” alakváltozási sebességen. Acélok esetében az „ m ” kitevő tipikus értékei -0,02 és +0,05 között mozognak 20-450°C-ig terjedő hőmérsékletskálán, illetve +0,1-től +0,2-ig 850°C feletti hőmérsékleteken.

1.4. Egyéb folyásgörbe felvételi próbák

A folyásgörbe felvétele kulcsfontosságú lépés a fémek mechanikai tulajdonságainak megértésében, különösen a plasztikus deformációval foglalkozó fémmegmunkálási eljárások során. A folyásgörbe a feszültség és a deformáció közötti kapcsolatot szemlélteti, amely lehetővé teszi a mérnökök és anyagtudósok számára, hogy előre jelezzék, hogyan viselkedik egy adott anyag különböző terhelési körülmények között. Rengeteg különböző eljárás, próba ismert a folyásgörbék felvételére tömbi anyagok alakítása esetén, ám vékony fémlemezeknél csak korlátozott számban lehet kísérleteket alkalmazni. Számunkra az utóbbi eset a releváns.

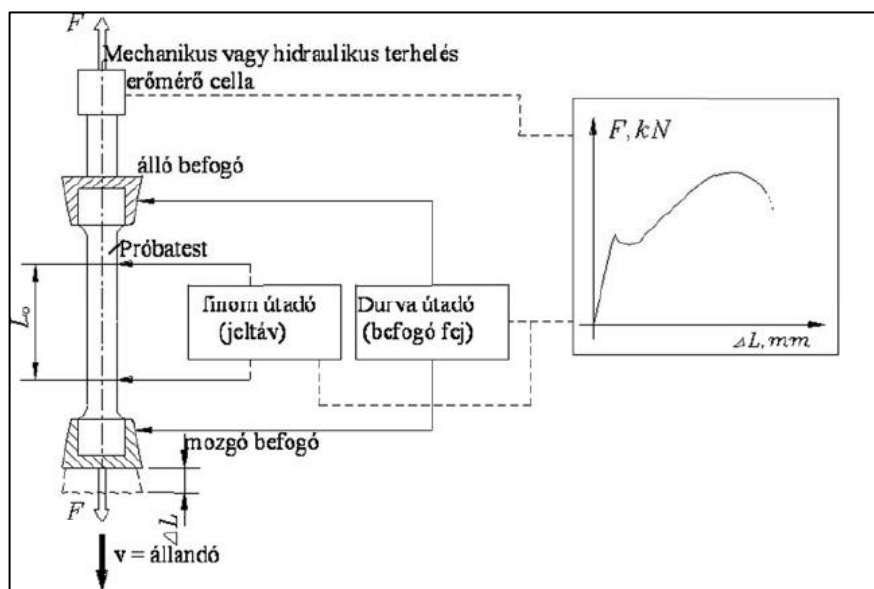
Elsősorban lemezeknél a képlékeny anizotrópia nagyobb jelentőséggel bír, mint a térfogatalakítás kapcsán, ezért a lemezek folyási görbéinek a meghatározására szolgáló módszereknek információt kell nyújtaniuk az anizotrópiáról egyaránt. Vékony lemezeken végzett szakítóvizsgálat csak az egyenletes nyúlás alatti alakváltozások esetén teszi lehetővé a folyásgörbe meghatározását, mivel a kontrahált keresztmetszet kontúrját nem lehet kellően jó pontossággal mérni. [7] A nyomóvizsgálatokat 5-7 mm-nél vastagabb lemezekre korlátozzák, mivel ellenkező esetben a mérések relatív hibája túl nagy lenne. Esetünkben az összenyomódás mértéke gépi úton, az INSTRON 4482 5900R gép által lesz követve, illetve mérőórával és az aktuális lemezvastagságok összehasonlításával, meghatározott időpillanatokban kerül összehasonlításra.

A műszaki lemezalakítási eljárásokban, mint például a mélyhúzás esetén, nagy alakváltozások érvényesülnek, ezáltal a folyásgörbéket is nagy alakváltozásokra célszerű meghatározni. Ezért szükség van más vizsgálati módszerekre is a szakítóvizsgálat mellett.

1.4.1. Szakítóvizsgálat

[10]A szakítóvizsgálat a legszélesebb körben alkalmazott kvázi-statisztikus anyagvizsgálati módszer. Általában szabványosított alakú és méretű próbatesttel végzik. Elsődleges célja az anyagok egytengelyű húzó igénybevétellel szembeni ellenállásának meghatározása, vagyis

az ehhez tartozó anyagjellemzők megállapítása, mint például a szakítószilárdság, vagy folyáshatár. A módszer lényege tehát, hogy ezt a szabványosított méretű és alakú próbatestet szakítógépben kontrahálásig vagy szakadásig terhelik, közben mérik a terhelőerőt, valamint a jeltávolságon belüli megnyúlást, mely paraméterek alapján lesznek képesek a szakítódíagram felvételére (4. ábra). A szakítódíagramban található nem-lineáris szakasz a plasztikus nyúlás szakasza, melynek jellemzésére a folyásgörbét használjuk.



4. ábra: A szakítóvizsgálat elve [10]

A szakítódíagram maximális pontja adja a szakítószilárdságot, ez a pont két főbb részre osztja a görbét. Az első rész, ahol az erő a nyúlással növekszik, míg a másodikban az erő a nyúlással csökken. A tényleges anyagról tudnunk kell, hogy nem ideális kontinuum, vagyis tartalmaz tökéletlenségeket. Ez azzal jár, hogy tulajdonságai általában nem lesznek azonosak minden egyes keresztmetszetben, következtetésképpen van egy leggyengébb pont, amely pontban történik meg elsősorban a kontrakciós deformáció. Ebben a pontban a próbatest elkezd megnyúlni, a keresztmetszet pedig ezzel egyetemben csökkenni. Azonban, mivel az erő állandó marad, így az adott keresztmetszetre ható húzófeszültség megnő, és az összes többi keresztmetszetre ható feszültségnél nagyobb lesz. Egy kisebb szakaszon folytatódik a húzás hatására ez a deformáció, mely egy kis zónába koncentrálódik, ahol is egy úgynevezett kontrahált keresztmetszet alakul ki. Ebből levonható következtetésképpen, hogy a szakító próbatest képlékeny alakváltozása a maximális erő elérése után egy instabil jelenség.

Ez az instabilitás minden olyan esetben bekövetkezik, amikor a tényleges húzóerő a nyúlás növekedésével csökken. Ennek leküzdésére és a stabil nyúlás megvalósítása érdekében el kell érünk, hogy a nyúlás növekedésével növekedjen a húzóerő is. Erre a

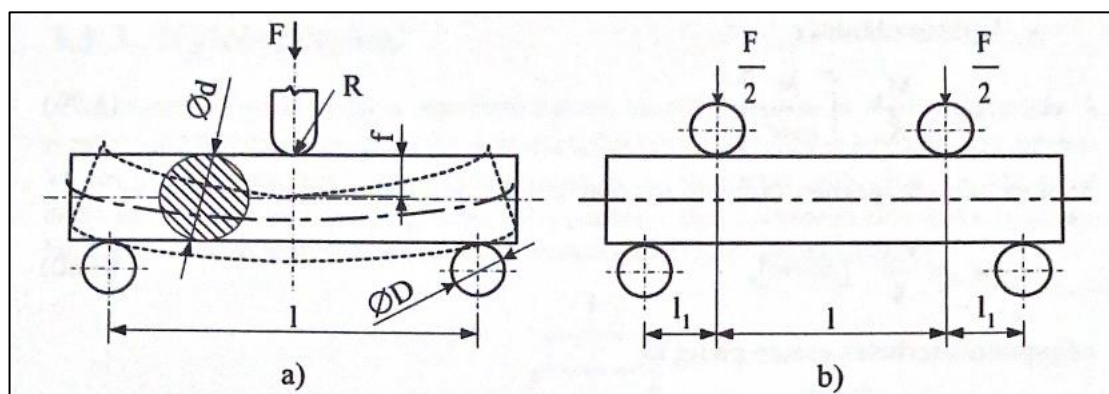
legismertebb mechanizmus, vagy jelenség az úgynevezett „felkeményedés”. Ez egy olyan jelenség, amely az anyag szilárdságának növekedését okozza (húzó) igénybevétel hatására. Ez minden közönséges (műszaki) fémnél megfigyelhető valamekkora mértékben. Ezt tovább fejtenve bevezethető a következő feltétel, melynek teljesülése esetében a kontrakció nem következik be, hanem az anyag stabil állapotban keményedik. Ezen feltétel a Considère-feltétel, mely a (7) összefüggéssel írható le [16]:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} > \sigma \quad (7)$$

Vagyis az alakváltozási keményedéshez a feszültség és az alakváltozás deriváltjainak hányadosának nagyobbak kell lennie, mint magának a feszültségnek. Tökéletesen képlékeny anyagok esetében a deriváltak hányadosa nullával lesz egyenlő, tehát ezek az anyagok nem teljesítik a feltételt és nem is keményednek fel a képlékeny alakváltozás hatására.

1.4.2. Hajlítóvizsgálat

A lemezalakítási folyamatok során a maximális alakváltozás gyakran nagyobb, mint az egytengelyű szakítóvizsgálat során elérhető egyenletes alakváltozás. Az alakváltozás stabilitásának előrejelzését nagymértékben befolyásolja a tényleges keményedési sebesség, ezért a teljes alakváltozási tartományra vonatkozóan pontos folyási feszültség adatokra van szükség. A hajlítóvizsgálat célja különböző szilárdsági jellemzők meghatározása, amelyeket, hasonlóan a nyomóvizsgálatokhoz, rideg és képlékeny anyagok vizsgálatára alkalmazzák, képlékeny fémek, kompozitok, polimerek, stb. A hagyományos, egyszerű, hárompontos és négypontos terhelésnek alávetett hajlítóvizsgálatok könnyen elvégezhetők egy univerzális szakítógépen, melyekből mérhető az erő-behajlás, avagy a hajlítódiaagram.



5. ábra: Hárompontos (a) és négypontos (b) terhelés [5]

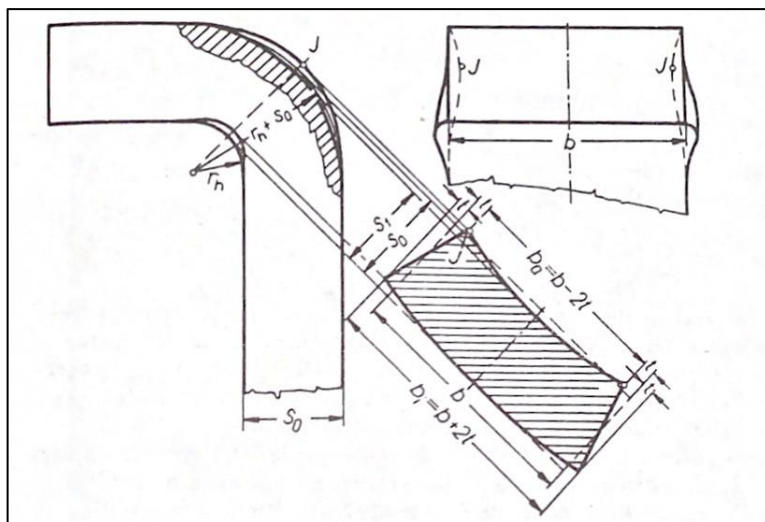
A különböző paramétereket, melyek az ábrán is láthatók, a „d” a próbatest névleges mérete függvényében kell megválasztani. Ezek a paraméterek az ábra jelölései szerint az

alátámasztó görgők távolsága „l”, átmérője „D” és a nyomófej lekerekítési sugara „R”. A behajlási értéket, mely az a) ábrán látható „f” jelöléssel a nyomófej elmozdulásának mérésével kell meghatározni, ezért egy előterheléssel kell indítani a mérést, hogy elkerüljük a mérési hibát, illetve itt szükséges az elmozdulásmérő nullázását elvégezni. Ez az előterhelés szintén a próbatest névleges méretének a függvénye. A behajlás legnagyobb értéke az előterhelés befejezésétől a törésig mért elmozdulás. Hajlítódiagramokból is többféle jellegzetes görbe létezik, attól függően, milyen anyagról beszélünk.

Ezekkel a vizsgálatokkal kapcsolatban az a probléma, hogy a hajlító alakváltozásban axiális és keresztirányú erők is részt vesznek. Ezenkívül a súrlódás és az érintkezési pontok alatti helyi deformáció is hibaforrás lehet. Ezen tényezők figyelembevételével a vizsgálatok kiértékeléséhez egyszerűsítő feltételezések jelentek meg. Ezek olyan egyszerűsítéseket fednek le, mint az oldalirányú erők elhanyagolása, az alakváltozások vastagságirányú lineáris eloszlása (azaz a külső és belső felületen azonos nagyságú alakváltozás), illetve a külső felületen fellépő húzófeszültséget a belső felületen fellépő nyomófeszültséggel azonos nagyságúnak kell feltételezni. A hajlítóvizsgálatokkal meghatározott folyási feszültség legtöbbször lényegesen kisebb, mint a szakítóvizsgálatokkal elért, ebből kifolyólag nem túl hatékony módszer erre a célra. Ellenben a hajlítással történő fémalakítás műszaki folyamatainak körülményeit szimulálja. [7]

Hajlítás során csak a szerszám által határolt lemezrészben, az úgynevezett hajlítási gócban, illetve annak környezetében történik alakváltozás. Mint a nyomóvizsgálatok esetén is, a hajlítási viszonyok elemzésekor is különbséget kell tenni széles (ahol a lemez szélessége minimum háromszorosa a vastagságának) és keskeny (ahol kevesebb, mint háromszorosa) darabok hajlítása között. Ha a lemez szélesnek tekinthető, akkor a szélesség irányú alakváltozás elhanyagolható, vagyis sík alakváltozási állapotról beszélhetünk. Ha a lemez keskeny, akkor kizárásos alapon szélesség irányban is számottevő alakváltozás megy majd végbe, miszerint ebben az esetben sík feszültségi állapot jelentkezik. A lemez szélesedése Oehler szerint a (8) összefüggéssel írható le. A hajlítás során fellépő deformációt a 6. ábra szemlélteti.

$$t = 0,4 \cdot \frac{s_0}{r_h} \quad (8)$$



6. ábra: Hajlítás során deformálódó keresztmetszet [4]

Ahol „ t ” a lemez szélesedése a hajlítás során (mm), „ s_0 ” a lemez vastagsága (mm), „ r_h ” pedig a hajlítás sugara (mm). A hajlító tűskétől távol eső, azaz külső anyagrész megnyúlik, míg a belső oldalon lévő pedig megrövidül. Ezek mellett egy olyan réteg is található a darabon, amelynek hossza azonos lesz a kiinduló hosszal, ezt nevezzük semleges rétegnek. A lemez vastagsága - az ábrán alkalmazott jelöléseket felhasználva - „ s_0 ”-ról „ s_1 ”-re csökken, ám ez keskeny lemez hajlításakor sem haladja meg a 10%-os csökkenést. A semleges réteget elsősorban a kiterített méret miatt érdemes ismerni, mivel a semleges réteg hossza megegyezik a hajlítandó anyagrész kiindulási hosszával. A fellépő alakváltozás hajlítás közben a hajlítási sugártól függ, vagyis, ha a hajlításhoz szükséges alakváltozást a lemez anyaga nem képes elviselni anélkül, hogy megrepedne, ezesetben a hajlítást két műveletben kell elvégezni közbenső lágyítással. A feldolgozandó anyag egyes rétegei nem azonos igénybevételt szenvednek alakítás közben. A lemez belsejében mindig, a hajlítás befejező stádiumában is vannak olyan rétegek, amelyek rugalmas állapotban maradnak. Ez különösen a keményebb anyagokra igaz, hogy a hajlító erő megszűnése után a rugalmasan terhelt rétegek a leterheléskor visszarugózáshoz vezetnek. Ezért a próbatestet kismértékben tovább kell hajlítani, hogy kiküszöböljék ezt a visszarugózást.

1.4.3. Keménységmérés és a folyási feszültség kapcsolata

A műszaki gyakorlatban az egyik legáltalánosabb és leggyakrabban alkalmazott anyagvizsgálati módszer a keménységmérés. A keménységmérési eljárásokat mindenekelőtt egyszerűségük és gyorsaságuk, illetve az a tény, hogy az így számszerűsíthető anyagtulajdonság szoros kapcsolatban áll a felhasználó szempontjából fontos anyagjellemzővel, tették elterjedté és jelentőssé. Említendő előnye, hogy kis térfogatú

anyagon is elvégezhető a mérés, emellett viszonylag kevés korlátot és nehézséget jelent a szükséges próbatest előkészítése. Ugyanakkor a meghatározott mérőszámok többsége nem, vagy csak korlátozottan rendelkeznek fizikai tartalommal, kvázi alapvetően összehasonlító jellegű mérőszámoknak kell ezeket tekinteni. Legáltalánosabb definíció szerint a keménységen a szilárd anyagoknak az alakváltozással szemben tanúsított ellenállását értjük.

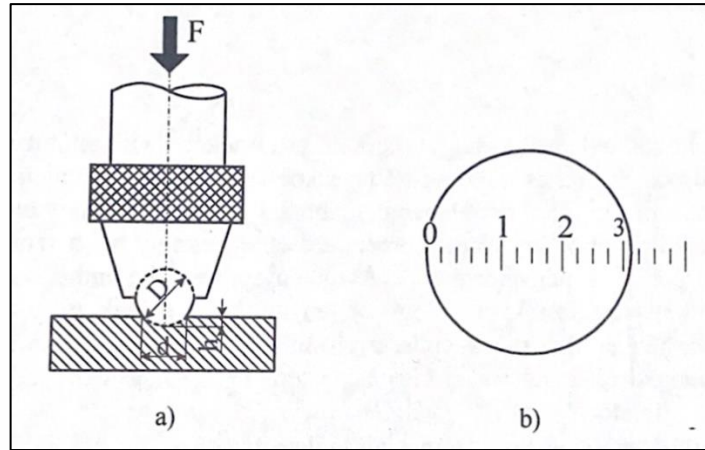
Számos, elvében és technikájában jelentősen különböző vizsgálati eljárás tartozik ebbe a témakörbe. Az első ismert eljárások a karcolás révén való összehasonlításra alapultak. Ennek lényege, hogy a mérendő anyaggal egy olyan rúd felületét karcolták végig, amelynek keménysége fokozatosan növekszik. A keménység mértékét a távolsággal jellemezték, amelyet a karcolás láthatóságának hossza szimbolizált a rúd felületén. Később megnőtt az igény a pontosabb kvantitatív mérési eredményt adó vizsgálatokra. Így kialakultak a napjainkban is a legelterjedtebben használatos szúrókeménység vizsgálatok, melyek közös alapelve, hogy a vizsgálandó anyagnál keményebb anyagból készített, szabványos alakú és méretű szúrószerszámot ismert terhelőerővel a felületbe nyomva, az így létrejött benyomódás mértékével jellemezzük az anyag keménységét. Ezen eljárások közé tartoznak a Hertz, Brinell, Vickers, Rockwell, illetve Knoop eljárások. Dinamikus módszerekkel is vizsgálhatjuk egy anyag keménységét, amelynek alapelve, hogy a rugalmas ütközés során elnyelt energia nagyságával arányosítjuk a keménységet, ezt hívjuk ejtő-keménységvizsgálatoknak, a leginkább közismert módszer a szkleroszkóp.

Brinell keménységvizsgálat során az alkalmazott szúrószerszám egy edzett acélgolyó, melyet ismert erővel kell a vizsgált test felületébe nyomni. Értékét az erő és a benyomódás felületének hányadosaként számított, mértékegység nélküli mérőszámként értelmezzük. A benyomódás felülete gömbsüveg alakú (7. ábra). Alapul véve a Brinell, Vickers és Knoop eljárásokra jellemző összefüggést (9):

$$H = \frac{F}{S} \quad (9)$$

A Brinell eljárásra vonatkoztatva a következő módon határozható meg a keménység (10):

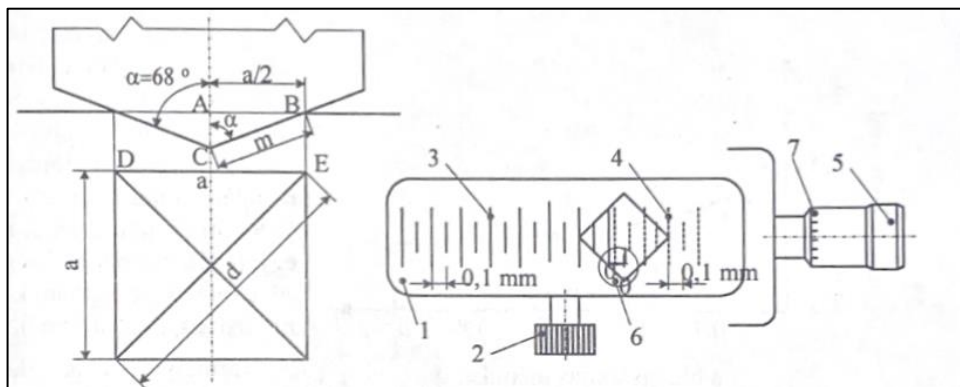
$$HB = \frac{F}{D \cdot \pi \cdot h} \quad (10)$$



7. ábra: A Brinell keménységmérés alapelve [5]

Egyik fontos korlátja a mérési módszernek abból ered, hogy a szűrőszerszám edzett acélból készül, ezért nem alkalmazható nagy keménységű műszaki anyagok vizsgálatára, mivel a lenyomat létesítése közben magában a szűrőszerszámban is történne alakváltozás, ebből fakadóan használhatatlan lenne a mérés. Tény, hogy 450 HB érték felett nem megbízhatóak a mért értékek.

A Vickers eljárás a Brinell módszer hiányosságait küszöböli ki. Mivel szerszáma egy 136° -os lapszögű gyémántgúla, így keményebb anyagok vizsgálatára is alkalmas, illetve a formából adódóan csökken a mérés terhelőerőtől való függése (8. ábra).



8. ábra: A Vickers eljárás elve és a lenyomat leolvasásának módja. [5]

A mért területet „S”-el jelölve a következő módon tudjuk helyettesíteni használva az ábra jelöléseit:

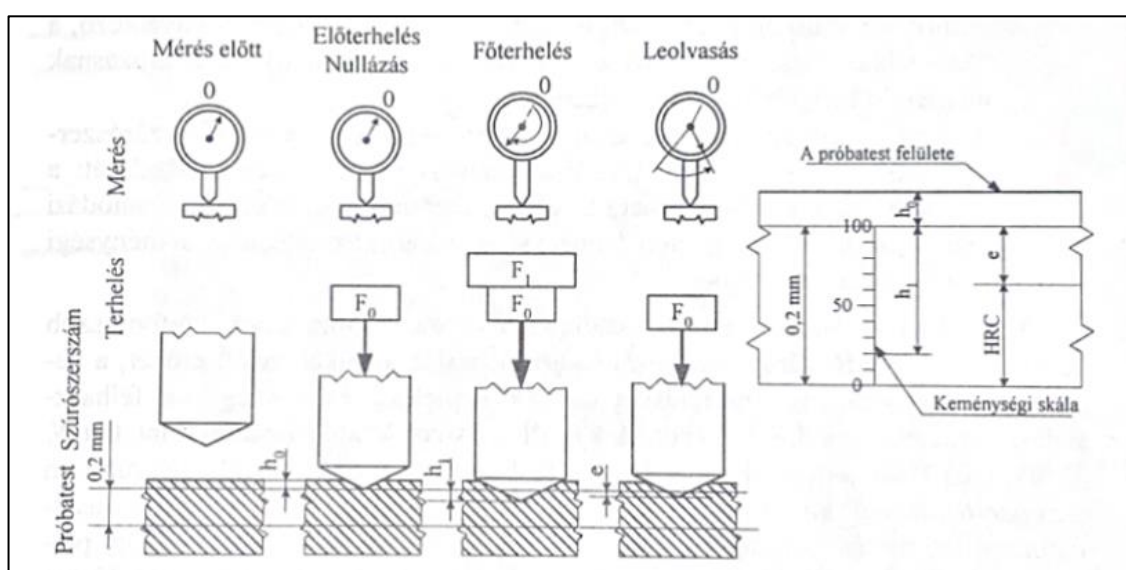
$$S = 4 \cdot \frac{a \cdot m}{2} = \frac{4 \cdot a}{2} \cdot \frac{a}{2 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{a^2}{\sin 68^\circ} = \frac{d^2}{2 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d^2}{1,854} \quad (11)$$

A (11) összefüggést behelyettesítve a (9) kifejezésbe a Vickers keménységmérés mérőszámának meghatározására a

$$HV = \frac{0,102 \cdot 1,854 \cdot F}{d^2} = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (12)$$

kifejezést kapjuk. Hasonlóan a Brinell eljáráshoz, a gyakorlatban ez esetben is a keménységet a terhelőerőkre vonatkozó táblázatokból kereshetjük ki. Szintén mértékegység nélküli szám.

A Rockwell eljárás több, azonos elven működő, de egyes paramétereiben különböző vizsgálati módszereket jelent. Legelterjedtebb a Rockwell C típus, mely szűrőszerszáma egy 120°-os csúcshöghű gyémántkúp. Pontossága nagyban függ a benyomódás mélységétől, melyet jelentősen befolyásol, hogy a mérést megelőzően a szerszám hogyan érintkezik a felülettel, mivel a felületi egyenetlenségek is rontják a leolvasás megbízhatóságát. Ezért egy kisebb terhelőerővel, úgynevezett előterhelő erővel egy kis mértékű benyomódást hozunk létre, ennek pozíciója lesz a kiinduló helyzet (9. ábra).



9. ábra: A Rockwell C eljárás elve és a mérés menete [5]

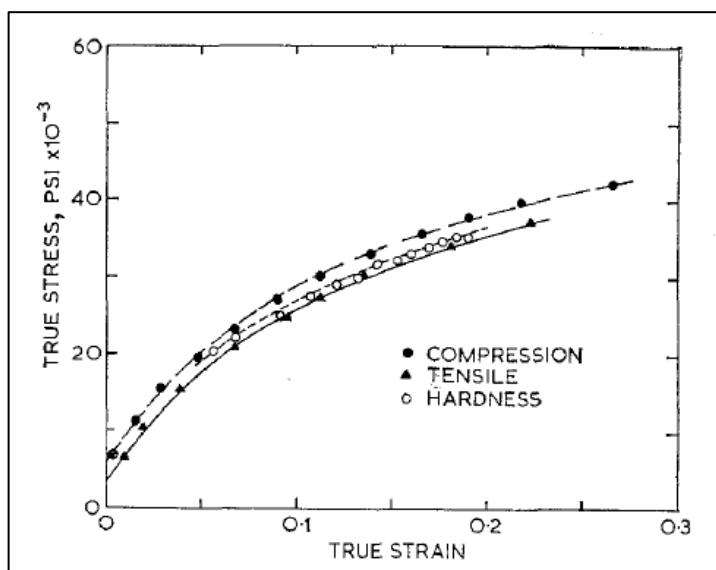
A W. J. Tomlinson és K. Talbot megjelentetett egy cikket, melyben a kapcsolatot fejtegetik a keménység és fémek folyásgörbéi között. Általában húzó- és nyomóvizsgálatokkal kaphatunk valódi feszültség/alakváltozás görbéket. Tabor azonban javasolt egy módszert, amellyel ezen görbék képlékeny tartománya meghatározható benyomódásos keménységmérésekből. A módszer, ugyan egy bizonyos mértékig képlékenységi elméletén alapul, alapvetően empirikus. A benyomódási folyamat elemzéséből Tabor arra a következtetésre jutott, hogy a valódi feszültség, jelölése „ σ ”, a Meyer-féle keménységgel (HM) függ össze a következőképpen:

$$HM = 2,8 \cdot \sigma \quad (13)$$

Illetve a valódi alakváltozás, jelölve „ ε ”, az alábbi módon:

$$\varepsilon = 0,2 \cdot \frac{d}{D} \quad (14)$$

Ahol a „d” a „D” átmérőjű golyó által okozott bemélyedés átmérője. Vagyis, ha a Meyer-féle keménységet „d” és „D” értékek tartományában, teljes képlékenység mellett kapjuk meg a (13) és (14) egyenletekből egy közelítő folyásgörbe származtatható. Tabor jó egyezést talált az egyenletei alapján kapott eredményekkel, amelyeket összehasonlított a lágyacélon, rézen és alumíniumon végzett nyomóvizsgálatból származó értékekkel. A Tabor-féle korreláció hasznossága akkor a legnyilvánvalóbb, ha az anyag csak kis mennyiségben áll rendelkezésre. A cikkben szereplő zömítővizsgálatokat 6,35 mm átmérőjű és 7,6 mm hosszú hengereken végezték. A próbatesteket polírozták és kenőanyagként 0,064 mm vastag PTFE fóliát használtak. Egyenletes alakváltozáshoz szükséges feltételeket választottak. A mérést bizonyos időközönként megállították és lemérték a minta hosszát és átmérőjét mikrométerrel, ezzel nem befolyásolva a kialakuló folyásgörbét. Különböző fémeket vizsgáltak, mindegyik kereskedelmi (hagyományos) tisztaságú volt. Kiemelve a vizsgált réz alapú ötvözetet (Cu), a szakító-, zömítő-, illetve keménységmérő vizsgálatok a 10. ábrán látható folyásgörbéket eredményezték:



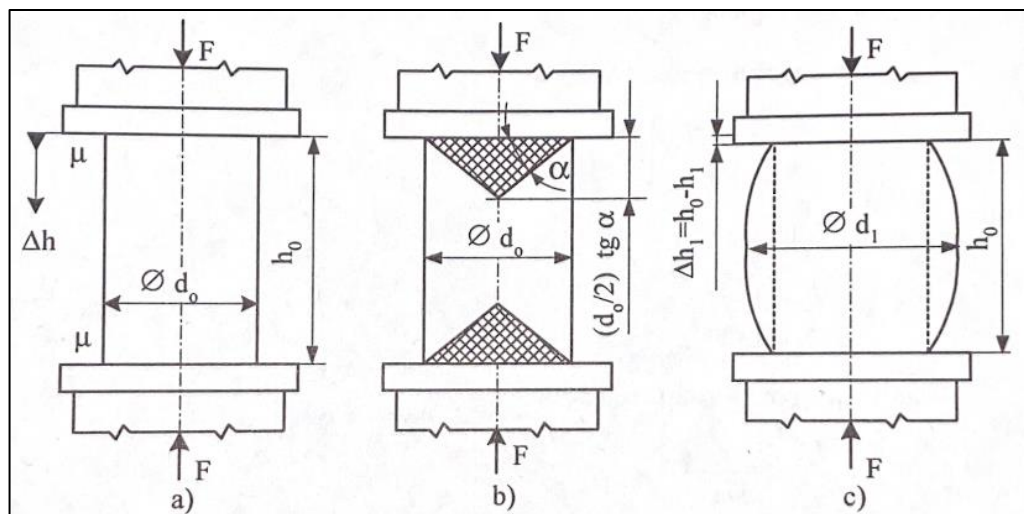
10. ábra: Folyásgörbék Cu szakító-, zömítő- és keménységmérő vizsgálataiból [17]

Levonható következtésként a 10. ábráról, hogy a háromféle vizsgálat kifejezetten jó egyezést mutat. [17] A keménység különösen fontos a plaszticitással járó érintkezési mechanikában. Ebben az értelemben a keménység tekinthető a súrlódás és a kopás vizsgálatának kezdeti lépésének a tribológiai problémákban. Bowden és Tabor érvelése az érintkezési területre vonatkozóan feltételezi, hogy a keménység (H) jól meghatározott egy empirikus tényező és az anyag folyáshatára által, de megkérdőjelezhető, hogy ez az összefüggés a fémalakítási körülmények között lévő anyagokra is érvényes-e.

Egy másik tanulmányban meleghengerléssel gyártott alumíniumötvözeteket vizsgáltak annak reményében, hogy feltárjanak megalapozott kapcsolatot a fémalakítási folyamatok során használt anyagok keménysége és a termoviszkoplasztikus (melegalakítás állapotában jellemző) folyási feszültség között. Megállapították, hogy bizonyos alumíniumötvözetek meleghengerlésénél például nemcsak az alakváltozási keményedés, hanem az idő- és hőmérsékletfüggő anyagtulajdonságok is szerepet játszanak az anyag folyási feszültségében (további képlékeny alakváltozást okozó valódi feszültségben). [1]

1.5. Alkalmazott módszer – Síkalakváltozási nyomóvizsgálatok

Általánosan a nyomóvizsgálatok legfőbb célja különböző szilárdsági jellemzők meghatározása. Ez a mechanikai tulajdonság megmutatja, hogy az anyag mennyire képes ellenállni a nyomóerőnek anélkül, hogy deformálna (pl. beton anyagoknál) vagy eltörne (fémeknél). A vizsgálatok során többnyire kör, ritkábban négyzet keresztmetszetű próbatestet központosan ható erővel terhelve összenyomjuk és regisztráljuk az erő-magasságváltozás diagramot, másnéven nyomódiagramot. Az ... ábrán látható módon lehet elrendezni a vizsgálatot:



11. ábra: A nyomóvizsgálat elrendezése (a), nyomókúpok (b), a próbatest hordósodása (c) [5]

A hengeres próbatest átmérője (d_0) általában 10 és 30 mm között mozog. A kezdeti magasság (h_0) alsó határértékét korlátozza az a kialakuló alakváltozási kötöttség, mely a próbatest szerszámmal érintkező felületeiről indul ki (11. ábra b) részlet). A kúpok magasságát a 11. ábra b) részletén is látható tangens szögfüggvényt tartalmazó összefüggéssel számíthatjuk, amelyben, ha az elcsúszás irányát $\alpha=45^\circ$ -nak feltételezzük, akkor a „ h_0 ” magasság értéke, melynek a felső határértékét a kihajlás korlátozza, nagyobb

lesz, mint a próbatest átmérője. Kihajlás elkerülése érdekében $2,5d_0$ -nál kisebb értéken kell tartani a magasságot.

A próbatest homlokfelülete és a nyomólapok között súrlódás lép fel, ezen okból kifolyólag az érintkező felületek mentén az alakváltozás igencsak gátolt. Ennek okán az alakváltozás a magasság irányában nem egyenletes, vagyis a 11. ábra c) részletén látható módon a próbatest hordósodni fog. A súrlódás, egyben a hordósodás kenőanyaggal csillapítható, illetve a súrlódási tényező alapján meghatározható kúposágú nyomószerszám alkalmazásával tovább mérsékelhető.

[5] [13] A nyomóvizsgálatok egyik speciális változata a Watts-Ford módszer, vagyis 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. Ez a méretarány egy olyan geometriai feltétel, melynél $w/b > 5$ esetén síkalakváltozási állapotról beszélhetünk jó közelítéssel, ahol „w” a próbatest szélességére, míg „b” a szerszám szélességére utal. Ezenkívül fontos paraméter még a munkadarab vastagsága is, ezt jelölje „h”. Nuttakorn [12] ezen paraméterek alapján meghatározott összefüggése a pillanatnyi feszültség ($\bar{\sigma}$) és alakváltozásra ($\bar{\epsilon}$) a következő módon írható fel:

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{1,155 \cdot w_i \cdot b} \quad (15)$$

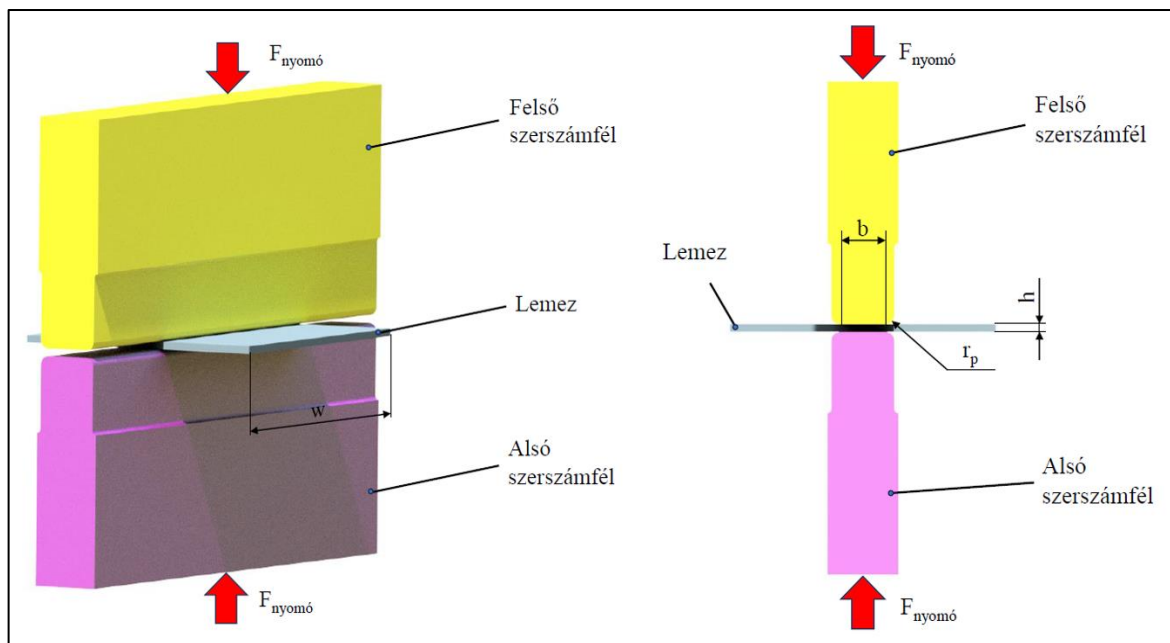
$$\bar{\epsilon} = 1,155 \cdot \ln \left(\frac{h_0}{h_i} \right) \quad (16)$$

Ahol „F” az összenyomó erő, „w_i” a pillanatnyi lemezszélesség, „b” a szerszám szélessége, „h₀” a kezdeti, „h_i” pedig a pillanatnyi lemezvastagság. A lemezvastagság (h₀, h_f) és a lemezszélesség (w₀, w_f) kezdeti és végső mérete közvetlenül a vizsgált próbatestből mérhető. A pillanatnyi lemezszélesség (w_i) értékének kiszámításához a pillanatnyi lemezvastagság (h_i) a (17) és (18) egyenletekben meghatározásra került az úgynevezett szélesedési kitevő (s) a próbatest folyási viselkedésének előrejelzésére a vizsgálat során. Jellemzően az „s” értéke a valós kísérletből származik, amelyet erősen befolyásolt az alkalmazott szerszámelmozdulás és a próbatest kezdeti méretei. Ehhez végeselemes analízis használható, mely összehasonlításra kerül az egyenletből kapott értékkel.

$$\frac{w_i}{w_0} = 1 + c - c \cdot \left[\frac{h_i}{h_0} \right]^s \quad (17)$$

$$c = \frac{\frac{w_f}{w_0} - 1}{1 - \left[\frac{h_i}{h_0} \right]^s} \quad (18)$$

A síkalakváltozási nyomóvizsgálat különlegessége, hogy a folyásgörbét nagy alakváltozási tartományban is egyetlen próbatesttel meg lehet határozni a nyomószerszámok cseréjével. A kísérlet szerszámát, a próbatestet és paramétereiket szemlélteti a 12. ábra egy kezdeti stádiumban.



12. ábra: Síkalakváltozási nyomóvizsgálat felépítése

[12] Becker és Pöhlandt szerint fontos jellemzői a síkalakváltozási nyomóvizsgálatoknak, hogy maga a minta egyszerű, általában téglalap alakú lemez, illetve a szerszám által nyomott terület megközelítőleg állandó marad. Ezekkel az előnyökkel szemben azonban hátrányos eset, ha a nyomószerszámokat éleik lekerekítése nélkül használjuk, ugyanis ezen hosszanti élek mentén koncentrálódik a feszültség, amely az alakváltozás mértékének növekedésével növekszik. Ez egy olyan „korai” töréshez vezethet, amelynél a mintaanyag alakváltozási képessége egytengelyű igénybevétel esetén még nem merülne ki. Ez a feszültségkoncentráció azonban csökkenthető a hosszanti élek lekerekítésével.

A vizsgálati eljárás alapvető felvetése, hogy egy téglalap alakú fémlemezről készült munkadarabot két, szintén téglalap alakú szerszám közé préselnek, amelyek túlnyúlnak a munkadarabon, vagyis hosszabbak, mint a munkadarab legalább egyik oldala. Ezek között a szerszámok között megtörténik a préselés, melynek hatására a munkadarab a szerszám alatti területen összenyomódik és hosszirányban mérete növekszik. Az egyik szerszám mozgó, míg a másik álló. Közben méri az erőt is, melyből aztán a kéttengelyű feszültségi állapothoz tartozó feszültség-alakváltozás görbét származtatják. A szerszám és a

munkadarab közötti súrlódást valamilyen kenőanyag segítségével csökkentik, ez lehet például grafitból, üvegből, polimerből (teflon), olajból álló kenőanyagok, ezeket elsősorban a vizsgálat hőmérsékletétől függően választanak ki. A munkadarab képlékeny alakváltozásának megfelelő teljes elmozdulást a vizsgálat előtt és után mért kezdeti és végső munkadarabvastagság közötti különbséggel lehet megbecsülni.

[9] A síkalakváltozási nyomóvizsgálatok nem kifejezetten elterjedt technológiák, így szabványosítás nem készült rájuk. Nagy alakváltozások és kéttengelyű feszültségállapot jellemzi, ezért a folyásgörbe számításához szükség van Tresca vagy von Mises által meghatározott összefüggések használatára. A von Mises-féle valódi feszültség összefüggését az (19), a valódi alakváltozásra vonatkozó összefüggést a (20) egyenlet szemlélteti.

$$\sigma_{vm} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (19)$$

Ahol „ σ_{vm} ” a valódi feszültség (N/mm²), „F” a nyomóerő (N), „ A_0 ” pedig a próbatestek kezdeti felülete (mm²).

$$\varepsilon_{vm} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

Ahol „ h_1 ” az összenyomott lemezvastagság (mm), „ h_0 ” a kezdeti lemezvastagság (mm), „ ε_{vm} ” a valódi alakváltozás (-).

A minta előkészítésénél a meghatározó geometriai jellemző az anyag lemezvastagsága. A minta többi, vagy a nyomószerszám származtatott méretei közvetlenül, vagy közvetve a minta vastagságától függenek. A folyásgörbe számításához az erő-elmozdulás görbék jelentik az alapot, mivel a mért erő az aktuális keresztmetszetre alkalmazható. Ezenkívül el kell végezni a folyamattal kapcsolatos korrekciókat. Nyomóvizsgálatok során a szerszám és a munkadarab közötti érintkezési zónában mindig van súrlódás, ezért több erőre is van szükség ezen tényező leküzdéséhez, ezt pedig megfelelően kell korrigálni.

A síkalakváltozási nyomóvizsgálatok során az anyagterhelések hasonlóak a síkhengerléshez, ezért ez a vizsgálat használható a síkhengerlési folyamatok fizikai szimulációjára, de a meleghengerléshez hasonló termomechanikai ciklusokhoz kapcsolódó mikroszerkezet-fejlődések analizálására is. Chermette [2] szerint a síkalakváltozási nyomóvizsgálatokhoz négy fő hátrány emelhető ki. Ezek közül az első a fentebb említett feszültségkoncentráció a nyomószerszám éleiben, ha azok lekerekítés nélkül vannak alkalmazva. Másik fő hátulütője lehet a(z) (oldalirányú) szerszám egytengelyűségi hiba, vagyis amikor a szerszámok nem tökéletesen egy tengely mentén illeszkednek záraskor a munkadarabhoz. Ez csökkenti a szerszámmal érintkező munkadarab területét és befolyásolja

a mért erőt. További hátránynak tekinthető, hogy a munkadarabon belüli feszültségeloszlás heterogén, ami az eredmények értelmezésének problémájához vezethet a vizsgálat során. Végül számításba kell venni a súrlódás hozzájárulását is, Coulomb féle súrlódás által, és megfelelően ki kell értékelni a folyási feszültség meghatározásához.

$$\tau = \mu \cdot \sigma \quad (21)$$

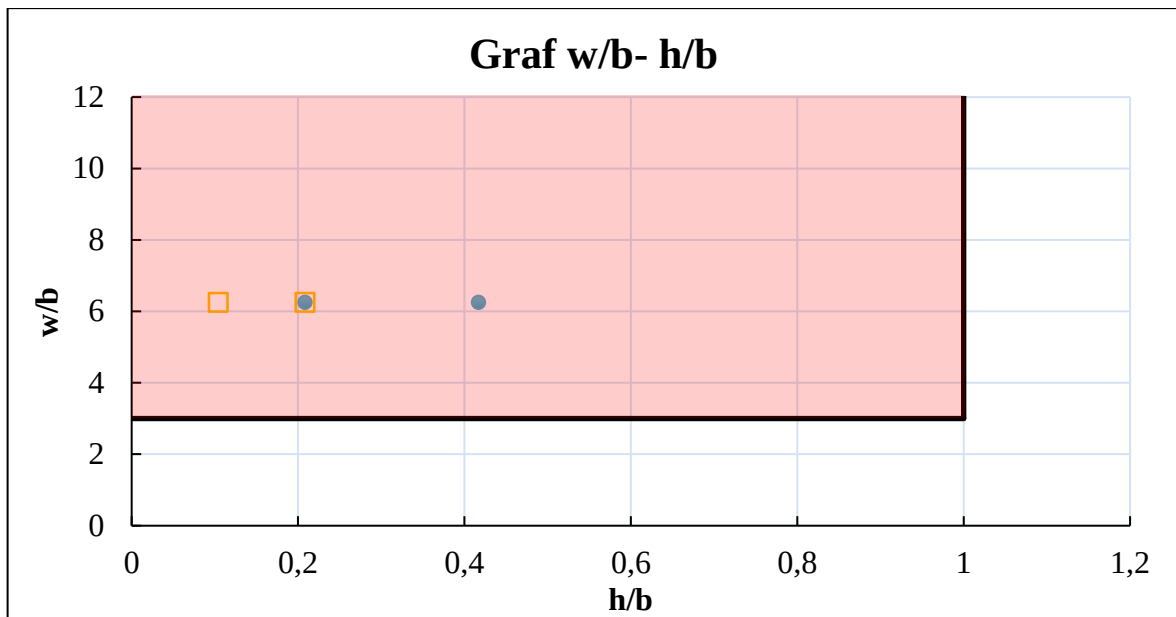
Ahol „ τ ” a súrlódási feszültség (MPa), „ μ ” a Coulomb-féle súrlódási együttható (-), „ σ ” pedig a folyási feszültség (MPa). Chermette és mtsai vizsgálták a képlékeny anizotrópia hatását a mérés szobahőmérsékleten történő alkalmazásakor, melynek eredménye, hogy a vizsgálat egyetlen irányban történő elvégzése, nevezetesen amikor a fő anyagáramlás a lemez síkjában a hengerlési irány mentén történik, elegendő az anyag megfelelő folyásgörbéjének kinyeréséhez. Itt visszautalva Becker és Pöhlant módszerére, vagyis a szerszám éleinek lekerekítésére, az ilyen szerszámmal kapcsolatos fő kihívás az, hogy a szerszám és a munkadarab két legkülső érintkezési pontja közötti távolságként definiált effektív szerszámszélesség változik a mérés során, ezt pedig ki kell értékelni a feszültség és alakváltozás számítása során

Mint az feljebb már említettem, a geometriai jellemzők igen fontos tényezők, melyeket számításba kell venni egy ilyen vizsgálat során. A próbatest alakváltozási heterogenitásának csökkentése érdekében a szerszámszélesség és a lemezvastagság arányának egy bizonyos határértéknél nagyobbnak kell lennie. Az alábbi összefoglaló táblázatban találhatók különböző szerzőktől származó határértékek háromféle geometriai arányra vonatkozóan, mégpedig ezek a lemez szélesség/szerszám szélesség, lemezvastagság/szerszám szélesség, illetve lemez hosszúság/szerszám szélesség.

2. Táblázat: Geometriai összefüggések különböző szerzőktől

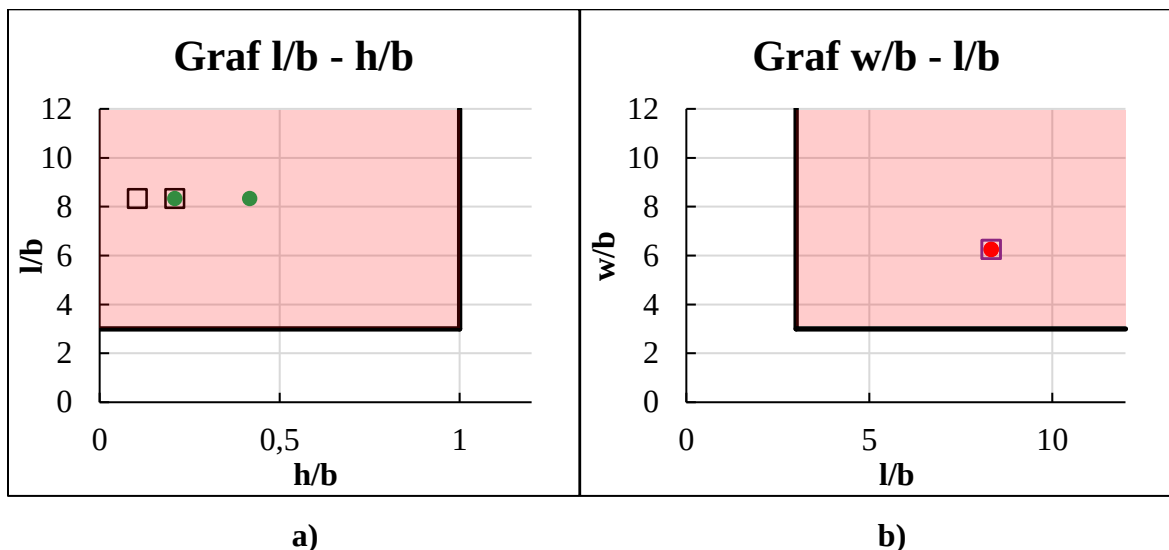
	w/b	h/b	l/b
Graf [9]	≥ 3 (≥ 12)	< 1	> 3
Chermette [2]	≥ 6	$1/4 \leq \dots \leq 1$	> 3
Banabic [3]	≥ 10	-	-
Nuttakorn [13]	≥ 5	$1/4 \leq \dots \leq 1/2$	-
Mohebbi [11]	$12 \geq \dots \geq 5$	$1/4 \leq \dots \leq 1/2$	-
Loveday [8]	≥ 5	-	> 3
Becker, Pöhlandt [12]	> 6	-	-

A 2. táblázatban jól látszik, hogy a legtöbb határértéket a lemez szélesség/szerszám szélesség viszonyra szabták meg, ezért ez a fő szempontunk. Összesen 3 aránypár lett vizsgálva, ideális esetre, amikor is a munkadarab vastagságának 50%-ára történik a préselés. Tehát az 1 mm vastagságú lemezek esetén 0,5 mm-re, míg a 2 mm vastagságúakat tekintve 1 mm-re. Különböző diagramok készültek a 2. táblázat aránypárjai alapján, ezek többnyire munkadarab szélesség / szerszámszélesség (továbbiakban w/b viszony) a munkadarab vastagság / szerszám szélesség (továbbiakban h/b viszony) függvényében. A harmadik geometriai viszony mely vizsgálásra kerül az a munkadarab hosszúság / szerszámszélesség arány (továbbiakban l/b viszony). A rózsaszínnel jelölt, átlátszó területek szimbolizálják azt a tartományt, amelyben a különböző szerzők által a geometriai viszonyok megfelelőek a síkalakváltozási nyomóvizsgálatok teljesüléséhez. A vastag, fekete vonalak ezen tartományok körül jelölik a határvonalakat, melyek a 2. táblázatban szerepeltett határértékek alapján lettek meghatározva (13. ábra). Az ábrákon a különböző diagramokhoz egyéni jelölés tartozik. A h/b viszony szempontjából kisebb értékű telített pontok az 1 mm vastag lemezekre vonatkoznak, míg a nagyobb értékkel rendelkezők a 2 mm vastagságúakra az összenyomás előtti állapotban. Ugyanez igaz az üres négyzetekre is, annyi különbséggel, hogy azok az összenyomás utáni állapotot szimbolizálják. Az egyedüli változó érték a lemezvastagság (h), ezért is változik csak a h/b viszony értéke.



13. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Graf szerint

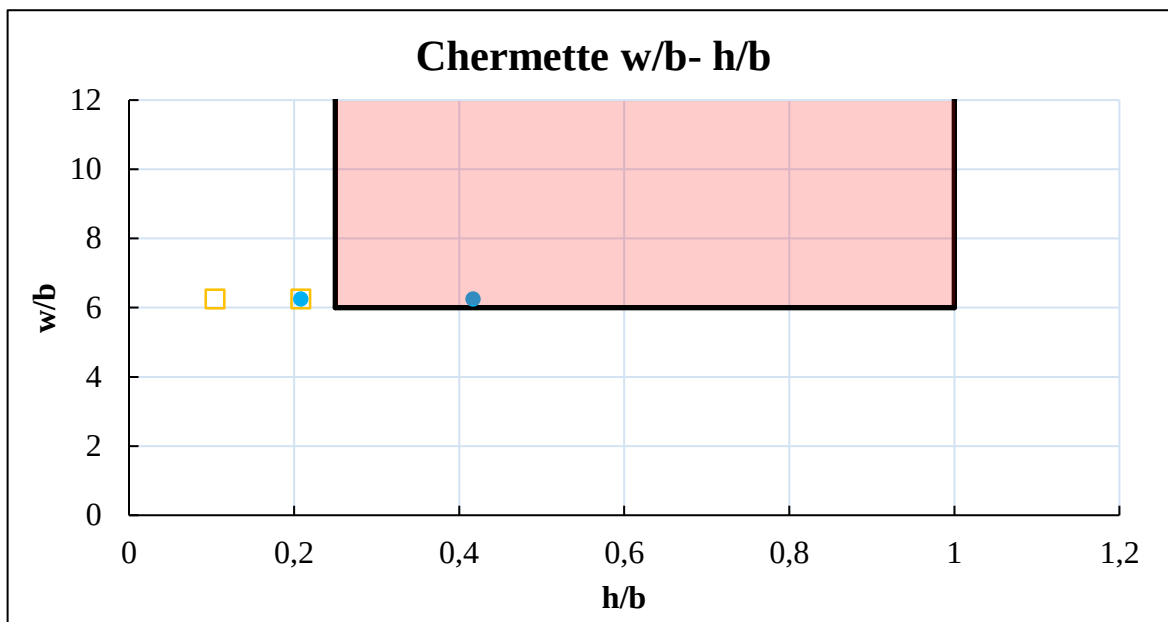
Graf [9] szerint a w/b viszonynak minimum a 3 értéket kell elérnie, és mint ez látható, minden pont a tartományon belülré esik. Ugyanez elmondható a h/b viszonyról is, melynek maximális értéke 1 lehet. Kék, telített ponttal vannak jelölve az összenyomás előtti állapotban a próbatestek, narancssárga, üres téglalapokkal pedig az ideális esetre összenyomott lemezek (lásd 3. táblázat), ezen színek az összes $w/b - h/b$ grafikonra érvényesek (13. ábra).



14. ábra: Az l/b viszony a h/b viszony függvényében (a) és a w/b viszony az l/b viszony függvényében (b) Graf szerint

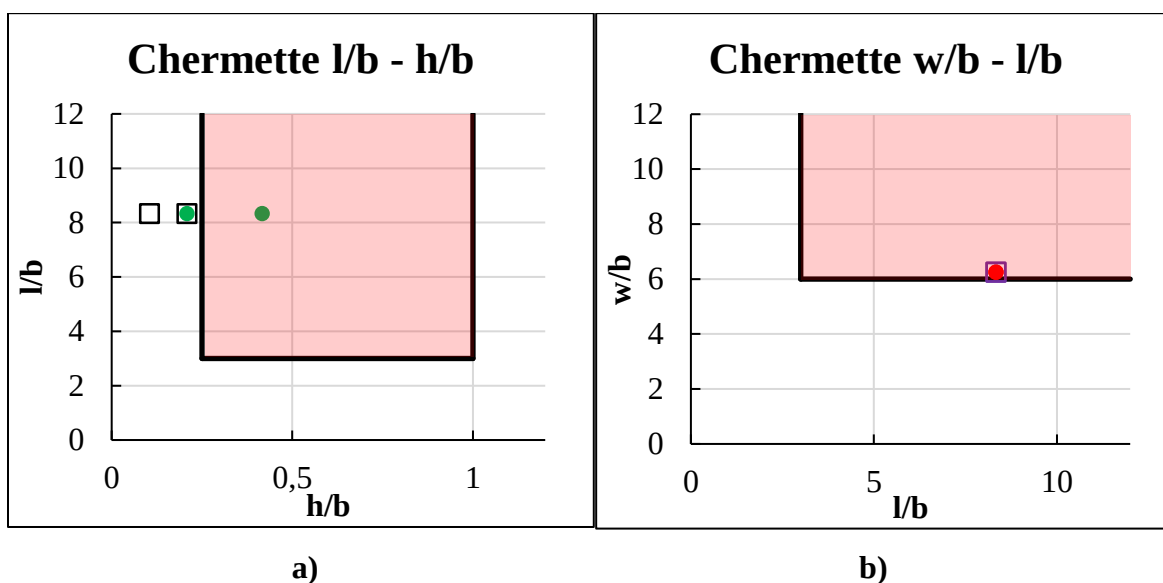
Hasonlóan az 13. ábrához, a 14. ábrán az l/b viszony minimum értéke szintén 3, a h/b viszony változatlan az (a) ábrán. Az összenyomott esetet az $l/b - h/b$ grafikon esetén

egységesen fekete színű téglalap jelöli, míg a kezdeti helyzetet zöld, telített pont. Ebben az esetben is minden pont beleesik a tartományba, ahogyan ez igaz a $w/b - l/b$ grafikonra is, melyet a (b) ábra mutat. Itt a kezdeti állapotot szintén egységesen piros, telített pont, míg az összenyomott állapotot lila téglalap jelzi. Ebből a nézőpontból a pontok egy síkba esnek, mivel a munkadarab hosszúsága közel állandó érték, így ez nem kerül számításba.



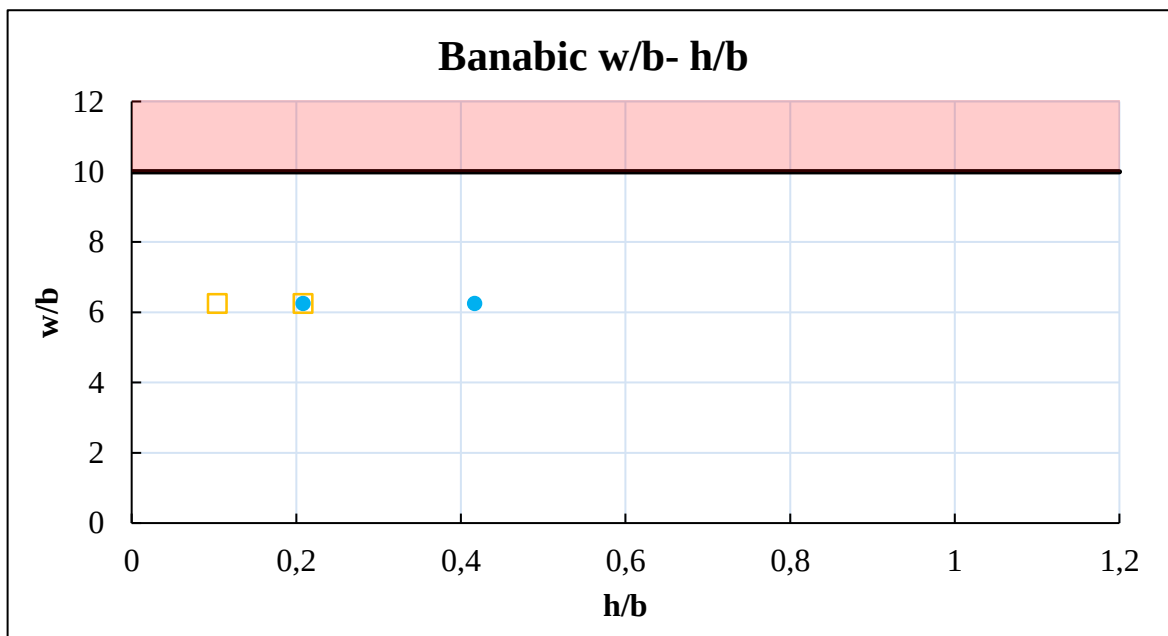
15. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Chermette szerint

Chermette [2] által meghatározott határértékek kevésbé megengedőek, ez látszik is az 15. ábrán. A h/b viszonnak minimum és maximum értéket is meghatározott Chermette, ebbe a tartományba a mi esetünkben egyetlen pont esik bele, ez a pont a kettő, egymásra helyezett lemezek esetére vonatkozik, vagyis Chermette szerint nem felelt meg a vizsgálat feltételeinek. A w/b viszony szempontjából az alsó határérték felett járunk (15. ábra).



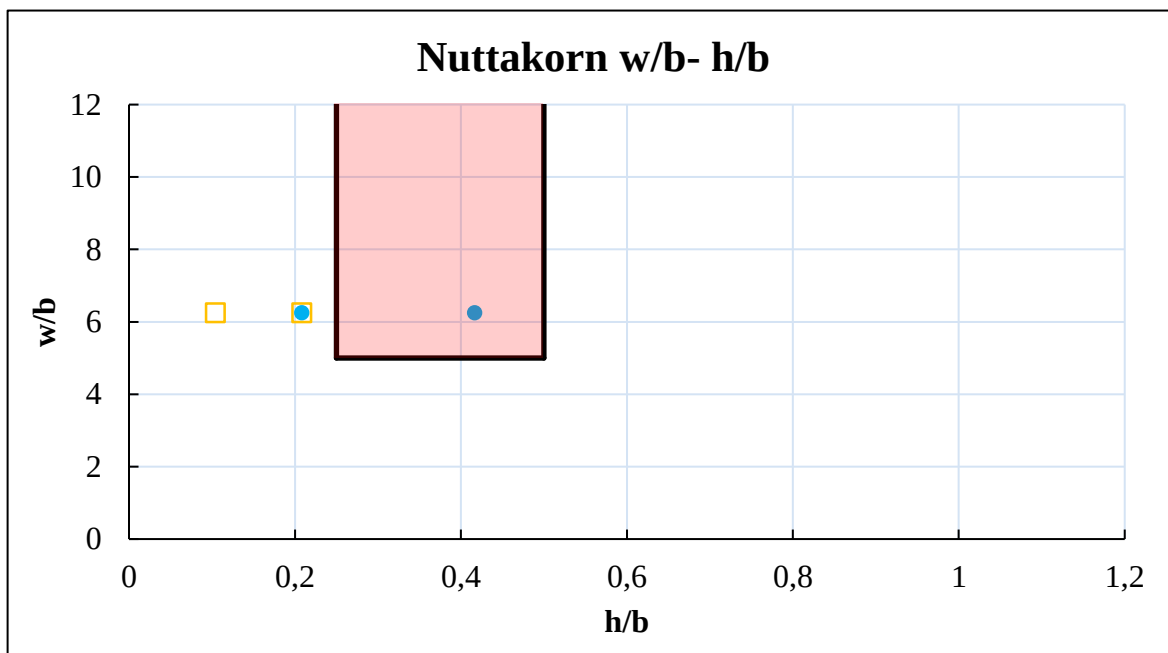
16. ábra: Az l/b viszony a h/b viszony függvényében (a) és a w/b viszony az l/b viszony függvényében (b) Chermette szerint

Hasonlóan az 14. ábrához, az (a) ábrán az $l/b - h/b$ grafikonon szintén egyetlen pont felelt meg a feltételeknek. Az l/b viszony minimum határértéke Chermette szerint is 3, a (b) ábrán az összes pont beleesik a tartományba (16. ábra).



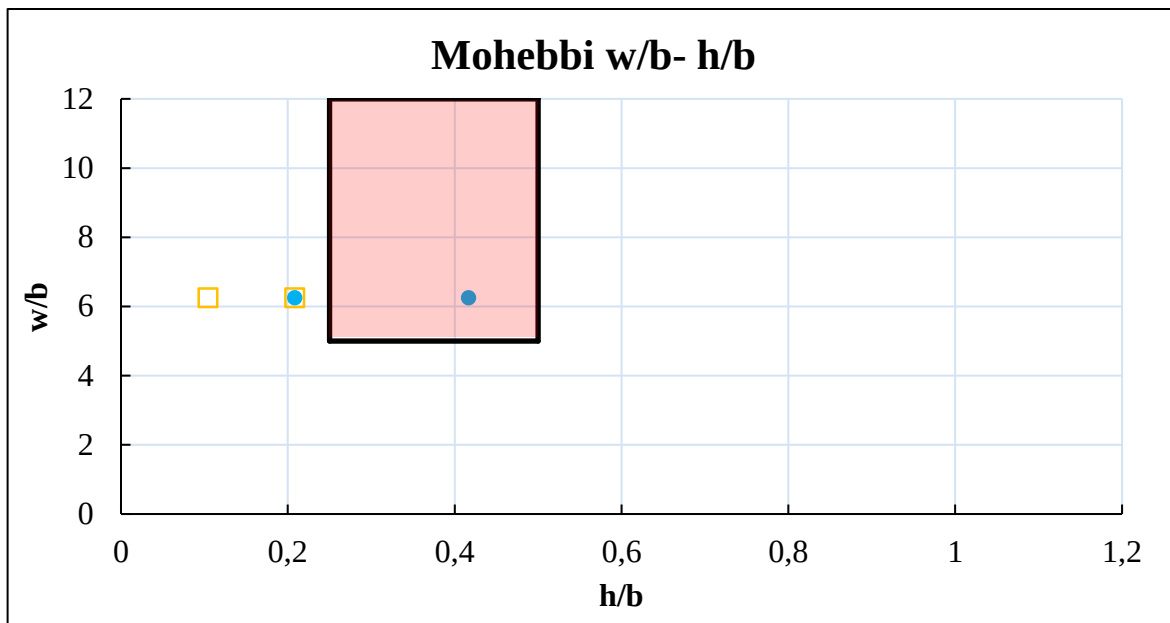
17. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Banabic szerint

Banabic [3] feltétele szerint a minimum w/b érték a 10 lehet, így ebben az esetben egyik pont sem felelt meg a kritériumoknak (17. ábra).



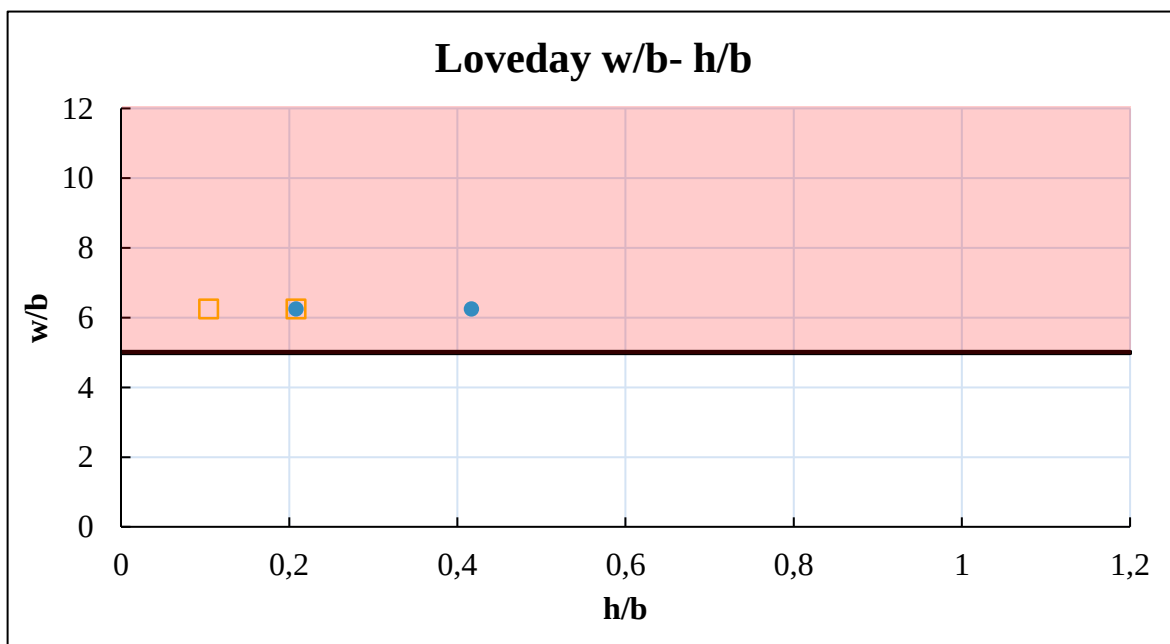
18. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Nuttakorn szerint

Nuttakorn [13] Chermette-hez hasonlóan alsó és felső határértéket szabott meg a h/b viszonyra, annyi különbséggel, hogy a felső határértéket a felére, vagyis 0,5-re csökkentette. Megfelelőség szempontjából ugyanazt a kimenetelt kapjuk, mint Chermette esetében (18. ábra).



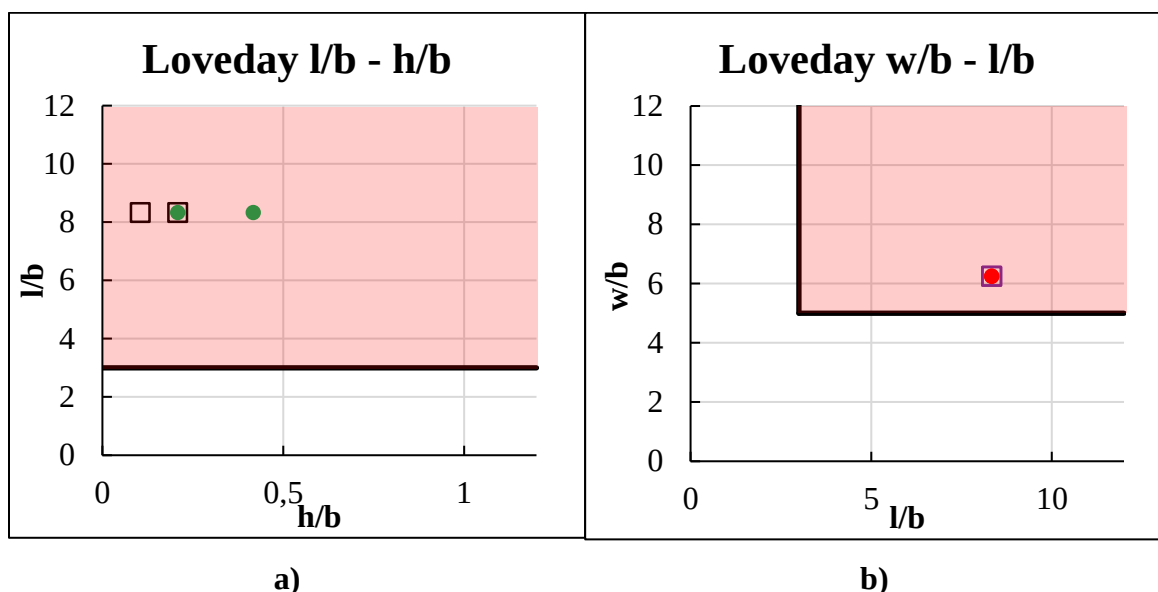
19. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Mohebbi szerint

Mohebbi [11] már a w/b viszonynak is szabott felső határt, a h/b viszony megegyezik a Nuttakorn által meghatározottal, így a kimenet szintén megegyező, mind Nuttakorn-nal és Chermette-tel is, azaz egyetlen pont felel meg az elvárásoknak (19. ábra).



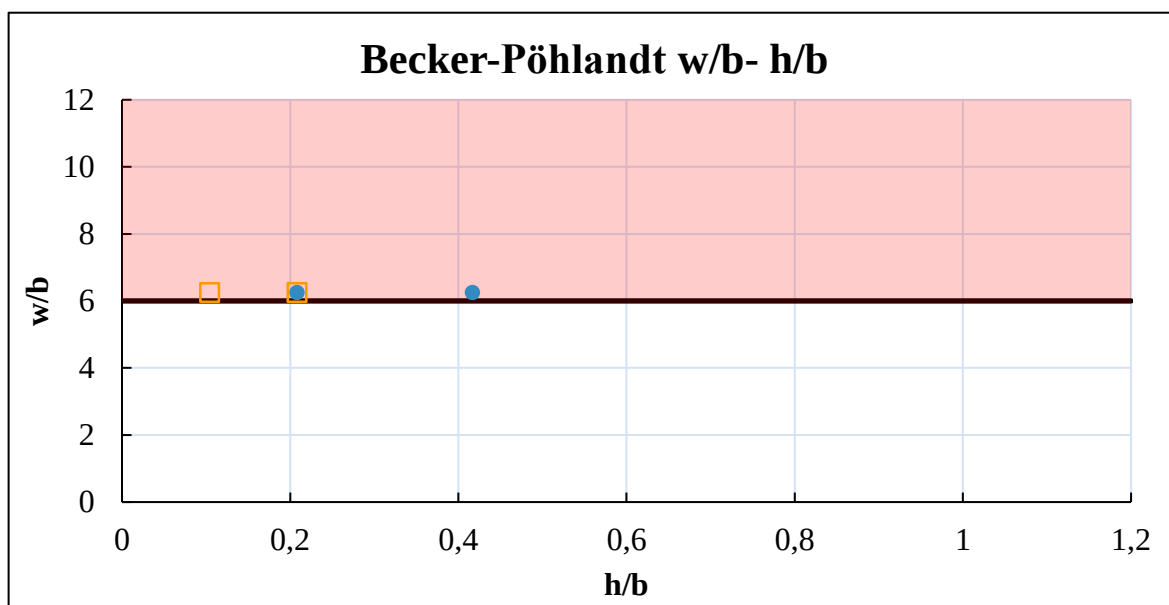
20. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Loveday szerint

Loveday [8] esetén ismét megengedőbbek a kritériumok, ebben az esetben is, Graf-hoz hasonlóan mindegyik pont megfelel. Loveday a w/b viszony also határának adott feltételt, mely érték szerint 5 (20. ábra).



21. ábra: Az l/b viszony a h/b viszony függvényében (a) és a w/b viszony az l/b viszony függvényében (b) Loveday szerint

Továbbá, Loveday a 21. ábra (a) részén látható módon meghatározott az l/b viszonyra is alsó határértéket, mely megegyezik Graf és Chermette által megadott értékkel. Mind az (a), mind pedig a (b) esetben megfelel az összes állapot a kritériumoknak.



22. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Becker és Pöhlandt szerint

Becker és Pöhlandt [12] szintén egyetlen határértéket adott meg a megfelelőség vizsgálatára, ez a w/b viszony alsó határértéke, mely a 22. ábráról jól kivehető.

2. A mérési környezet felépítése és bemutatása

2.1. Kísérlet környezete

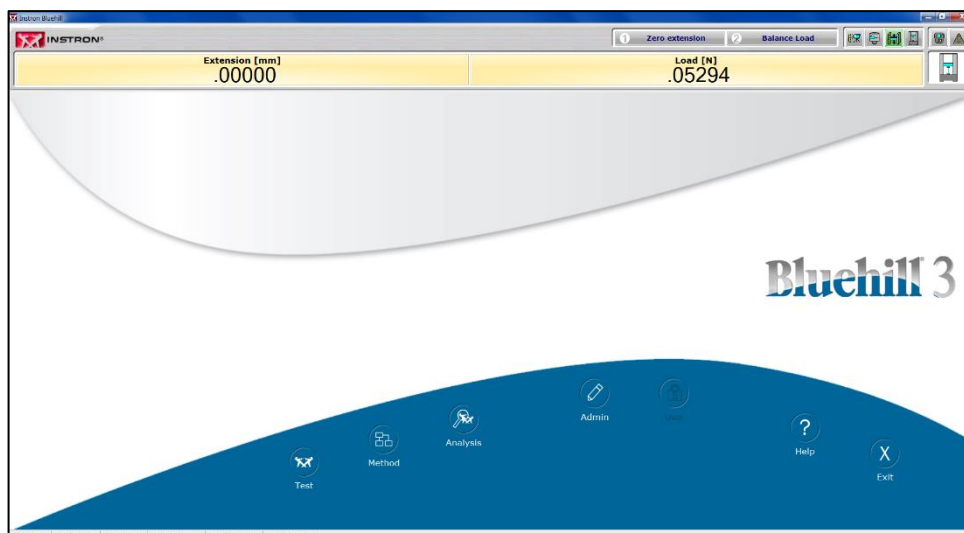
A vizsgáló berendezés, mely a mérésekhez szükséges igen egyszerű, egy univerzális húzó-nyomó gép több, mint megfelel erre a célra. Esetünkben ez egy Instron 4482 5900R univerzális anyagvizsgáló berendezés (23. ábra).



23. ábra: Instron 4482 5900R univerzális anyagvizsgáló berendezés

A mérésekhez fontos kenés alkalmazása a munkadarab és a szerszám közötti súrlódás csökkentése érdekében (lásd. 1.5). Összetett kenést alkalmaztunk, Luba 21 kenőolajat és PTFE (teflon) fóliát. A Luba 21 egy környezetkímélő nagynyomású kenőanyag, kifejezetten minimálkenésre lett kifejlesztve.

A berendezés 100 kN-os erőmérő cellával van felszerelve, attól nagyobb erőt nem bír el. Biztonsági okokból egy felső határérték meghatározásra került 90 kN-os értékkel, ezen érték elérésekor a program megállítja a mérést. A berendezés a Bluehill 3 nevű szoftverrel van összeköttetésben, ezen szoftverben lehet beállítani a különböző paramétereket a mérés végrehajtásához. A Bluehill 3 szoftver kezdőképernyője a 24. ábrán látható. A „Test” gombra kattintva tudunk minden számunkra fontos beállítást elvégezni (mérési, teszt paraméterek beállítása).



24. ábra: Bluehill 3 szoftver kezdőképernyője

Ilyen paraméterek például a mérés sebessége. Ez a 3. táblázatban látható, ahol 0,1 mm/perc sebesség érvényes az 1 mm-es lemezek összenyomása, míg 0,2 mm/perc a 2 mm-es összerakott lemezpár esetében. A sebesség úgy van kalkulálva, hogy az a tized része legyen a lemez(ek) vastagságának.

A vizsgálatokhoz a szoftverben kapott elmozdulási adatokon kívül egy mérőóra is felhasználásra kerül, ugyanis az anyagvizsgáló berendezésnek van egy rugalmas elmozdulása, ezt a mérőórával szeretnénk pontosítani. A 25. ábrán figyelhető meg az óra elhelyezkedése a mérési környezetben.



25. ábra: Mérőóra elhelyezkedése a mérési környezetben

2.2. Szerszám

A szerszám 4,8 mm szélességű, lekerekítés nélküli, HSS anyagú szerszámacélból készült téglalap alakú egység, mely két megegyező félből áll. Hosszúság értékük nagyobb, mint a munkadarabok szélessége, ezeket préselés hatására hosszirányban tágítják. Az Instron 4482 5900R univerzális anyagvizsgáló berendezésen a felső szerszámfél az, amelyik mozog, az alsó pedig áll (26. ábra).



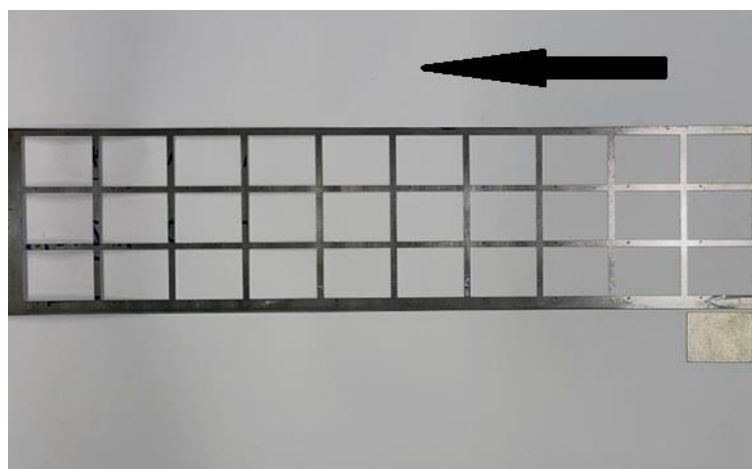
26. ábra: A szerszámok helyzete a nyomópofákban

Ügyelni kell a szerszámfelek pontos illeszkedésére, az esetleges egyéb erőbehatások elkerülése érdekében. A szerszámok rögzítéséhez hézagoló lemezek alkalmazása volt szükséges, mivel a nyomópofák mérete meghaladta a felhasznált szerszámok vastagságát. A rögzítés csavarok segítségével valósult meg.

2.3. Munkadarab

A próbatestek vékony, 1 mm névleges vastagságú lemezek (27. ábra). A lemezek szélessége 30 mm, ezeket lézersugaras megmunkálás segítségével vágtuk ki. Kétféle esetet vizsgáltunk, mikor egy időben egy próbatest, illetve amikor két egymásra helyezett próbatest került összenyomásra, vagyis 1 és 2 mm vastag próbatesteket kaptunk. A 2 mm vastagságú próbatesteket 2 db 1 mm-es lemezből halmozással használtuk fel, úgynevezett „stack compression”-t alkalmazva, szimulálva a vastagabb lemez összenyomását és vizsgáltuk hatását a folyásgörbékre. A lemezek anyaga DC04, ez részletesebben az 1.1-es fejezetben lett tárgyalva. A munkadarab hosszirányban tágul, szélesség irányban megközelítőleg változatlan marad köszönhetően a kéttengelyű feszültségi állapot létének. Keletkezik

ugyanakkor egy minimális hordósodás szélesség irányban, amely átlagosan 1 mm körüli értéknek feleltethető meg 1,5 mm mértékű lemezvastagság irányú elmozdulás mellett. A mérés összefoglaló paramétereit a 3. táblázat szemlélteti.



27. ábra: Lézerrel kivágott próbatest és a lemezsáv (hengerlés iránya fekete nyíllal)

3. Táblázat: Síkalakváltozási nyomóvizsgálat kísérleti körülményei

Szerszám és munkadarab méretek	
Szerszám szélesség (b), mm	4,8
Munkadarab szélesség (w), mm	30
Munkadarab vastagság (h), mm	1
	2
Munkadarab hosszúság (l), mm	40
Feltételek	
Maximális szerszámsebesség, mm/min	0,1
	0,2
Magasságcsökkenés, %	50
Alapanyag	DC04
Kenés	Luba
	Teflon
Vizsgálóberendezés	
Univerzális anyagvizsgáló berendezés (Instron)	100 kN (erőmérőcella)

3. A síkalakváltozási nyomópróbák végrehajtása

A vizsgálat a próbatestek méreteinek meghatározásával indul. Ehhez figyelembe vettük az 1.5 fejezetben, a 2. táblázatban található geometriai viszonyokat különböző szerzőktől. Ezek alapján a próbatest és a szerszám mérete meghatározásra került, így lett a szerszám vastagsága 4,8 mm, míg a próbatestek szélessége 30 mm, hosszúsága 40 mm. Ezen méretek mellett valósultak meg a síkalakváltozási nyomópróbák. Ahogyan az szintén az 1.5 fejezetben említésre került, az ilyen típusú vizsgálatok vastagabb, robusztusabb lemezekre hatékonyabbak. Ennek érdekében vizsgáltunk 2 darab, egymásra helyezett lemezt, ezzel szimulálva a vastagabb munkadarabot. Ez a módszer már a „stack compression” technológiához sorolható.

A tervezés sikerességét követően, a 27. ábrán látható módon, Trumpf lézerberendezés segítségével kivágásra kerültek egy DC04, 1 mm névleges vastagságú lemezsávból a próbatestek, ezzel biztosítva a megfelelő pontosságú méreteket. Ugyanis a lemezolló méretbeli hibákat adhat hozzá, illetve elhajlást okozhat a darabokon. Ezután a mérési környezet felállítása következik, mely az Instron 4482 5900R univerzális anyagvizsgáló berendezésen történik, nyomóvizsgálatokra előkészítve. A berendezésen lehet szakító- és nyomóvizsgálatokat is végezni. A nyomópofákba a szerszámok a 26. ábrán látható módon kerülnek behelyezésre. A mérés a Bluehill 3 szoftverrel történik.

A mérések megkezdése előtt a Bluehill 3 szoftverben a vizsgálat paramétereit be kell állítani, mint a maximális sebesség, amellyel a keresztfej mozog, ez a lemezvastagságtól függően lehet 0,1 mm/perc, illetve 0,2 mm/perc. A szoftverben megfigyelésre kerül a keresztfej elmozdulása, illetve az erő. Az erő maximum 90 kN-ig növelhető, onnantól a berendezés leállítja a mérést biztonsági okokból. A 2.1 fejezetben említett mérőóra is behelyezésre kerül a mérési környezetbe.

Következő lépésként megkezdődnek a mérések. Mind az 1 mm-es, mind pedig a 2 mm-es lemezekből 3-3 vizsgálat kerül elvégzésre. Ezekon kívül egyéb, meghatározott keresztfej elmozdulások pillanatában különböző értékű korrekciós méréseket is végrehajtunk, melyek a folyásgörbék kiszerkesztéséhez szükségesek. A mérések végeztével a Bluehill 3 szoftverből egy pendrive-ra kinyerjük a nyers adatokat, melyek Microsoft Excel felhasználásával korrekciózásra kerülnek. A korrekciózást von Mises (19)(20) és Hill’48-féle összefüggések (22)(23) segítségével végezzük.

$$\sigma_H = \sqrt{1 + \alpha^2 - \frac{2 \cdot R}{1+R} \cdot \alpha \cdot \sigma_{psc}} \quad (22)$$

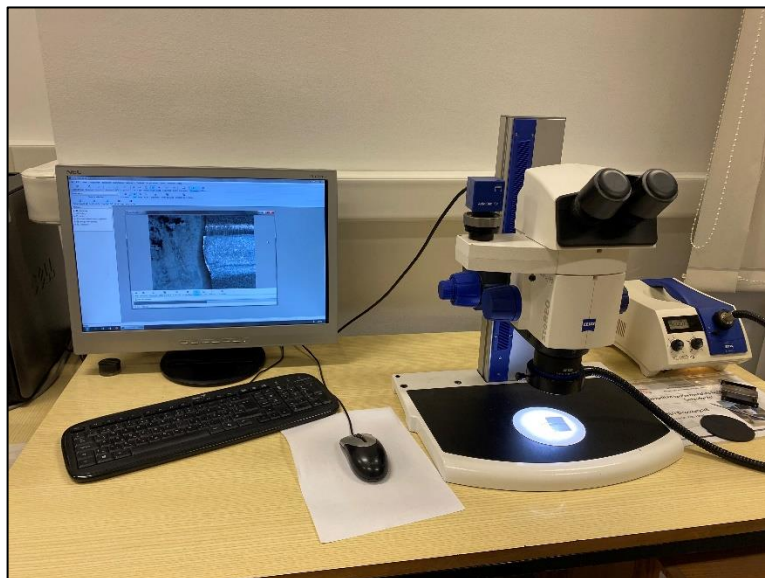
Ahol „ σ_H ” a Hill’48 szerinti valódi feszültség (N/mm²), „ α ” a feszültségi állapot tényező (-), „ R ” a síkbeli anizotrópia tényező (-), „ σ_{psc} ” pedig a mérésekből kinyert nyers erő-keresztmetszet hányados adatok (N/mm²).

$$\varepsilon_H = \left| \sqrt{\frac{1+R}{1+2\cdot R}} \cdot \ln \left(\frac{h_1}{h_0} \right) \right| \quad (23)$$

Ahol „ ε_H ” a Hill’48 szerinti valódi alakváltozás (-), „ R ” a síkbeli anizotrópia tényező (-), „ h_1 ” az összenyomott lemezvastagság (mm), „ h_0 ” pedig a kezdeti lemezvastagság (mm).

4. A kísérleti eredmények kiértékelése, folyásgörbék kiszerkesztése

A mért eredményekről készült fotókat Zeiss SteREO Discovery V8 típusú makroszkópon végeztük, AxioCam ICc 1 típusú kamerával, illetve 1x-es nagyítás mellett. A makroszkóp mérési környezetét a 28. ábra mutatja be. A fotók elkészítéséhez az AxioVision LE64 szoftver járult hozzá.



28. ábra: Zeiss SteREO Discovery V8 makroszkóp

4.1. Az 1 mm vastagságú lemezek összenyomása

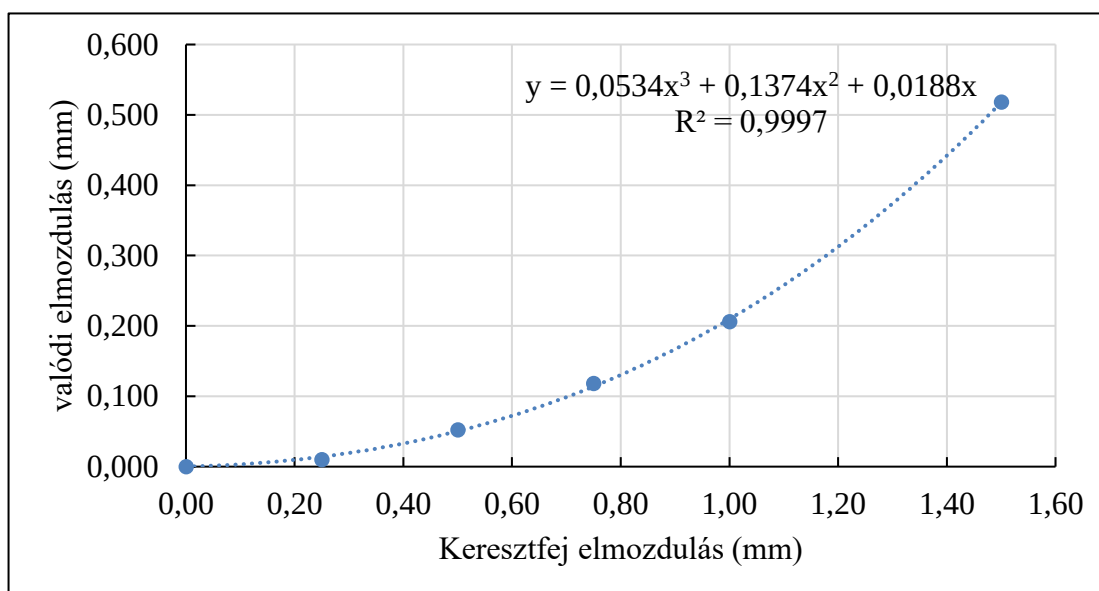
A keresztfej mozgásának sebessége 0,1 mm/perc. Az összenyomódás mértéke mind a Bluehill 3 szoftver, mind a mérőóra felhasználásával mérve és jegyzőkönyveztve lett. Bizonyos elmozdulás értékek keresztfej elmozdulások esetén a mérőóráról leolvasható értékek összehasonlításra kerültek. Az 1 mm vastagságú lemezek esetén ezek az értékek a 4. táblázatban olvashatók.

Mivel a mérőóra sem bizonyult megfelelően pontosnak, így szükség volt korrekciók alkalmazására a valódi alakváltozások meghatározásához. Ezért a mérőórának a folyásgörbe alakulásában további szerepe nincs. A valódi alakváltozásokhoz korrekciós mérésekre volt szükség bizonyos, az anyagvizsgáló gép által mért elmozdulás értékek esetén. Négy pontban, nevezetesen 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; illetve 1,5 mm gépi elmozdulás értékeknél történt. Az 1,5 mm keresztfej elmozduláshoz tartozó érték magasabb, mint a kiinduló 1 mm-es lemezvastagság, tehát ekkora összenyomódás nem történhetett meg a vizsgált lemez szempontjából. Így erre az esetre vonatkozóan az 4. táblázat mutatja a valódi elmozdulás és lemezvastagság értékeket bizonyos mérési pontokban.

4. Táblázat: Valódi lemezvastagságokhoz tartozó valódi elmozdulások 1 mm-es lemezekhez

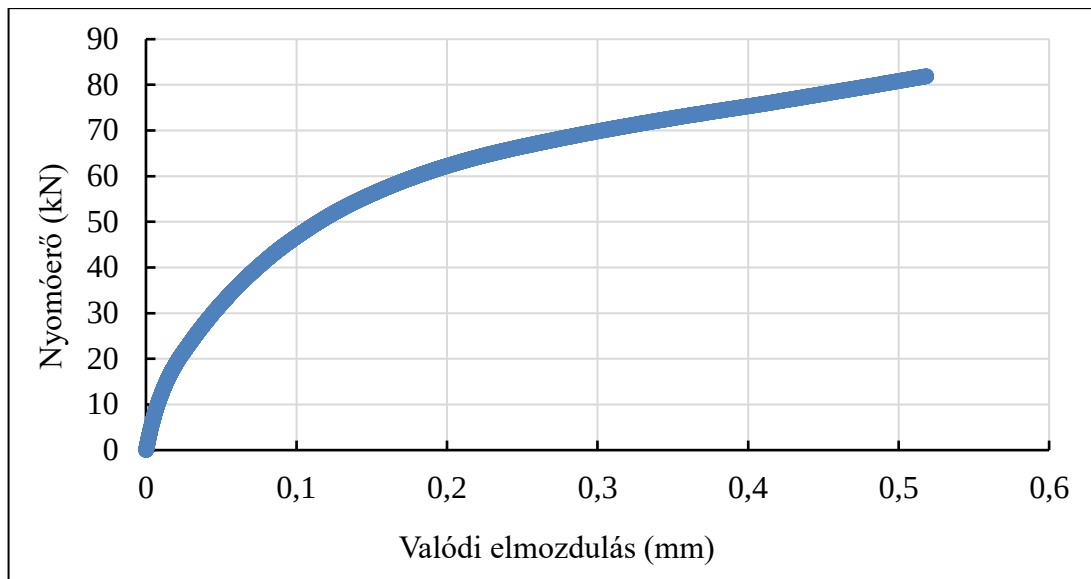
Keresztfej elmozdulás (mm)	Valódi lemezvastagság (mm)	Valódi elmozdulás (mm)
0,00	1,000	0,000
0,25	0,990	0,010
0,50	0,948	0,052
0,75	0,882	0,118
1,00	0,794	0,206
1,50	0,482	0,518

A valódi elmozdulásokat a kezdeti 1 mm-es vastagságból kivont valódi lemezvastagság értékek adják. Ebből egy korrekciós függvény készíthető, melyet a 29. ábra szemléltet.



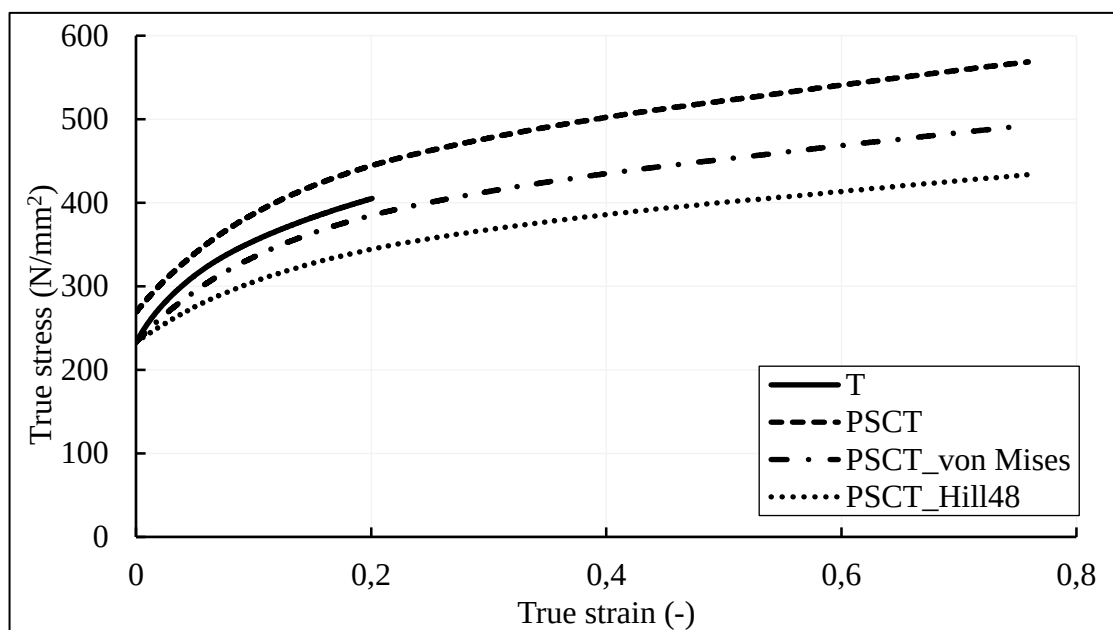
29. ábra: Első esethez tartozó korrekciós függvény

A valódi elmozdulások a nyers adatokra nézve ezen harmadfokú függvénnyel kerülnek kiszámításra minden értékre vonatkozóan. Ezekhez az értékekhez tartozóan kiszámításra kerülnek a valódi lemezvastagságok is szintén minden pontra a nyers adatokból. Ezekből a nyers adatokból számolható egy valódi feszültség érték a nyomóerő és a kezdeti felület hányadosaként, mely korrekciózásra szorul. Ezt követően felhasználásra kerülnek az (19)(20)(22)(23) összefüggések a korrigált valódi feszültség és valódi alakváltozás értékek meghatározásához. Továbbá a mérés erő-út diagramját a 30. ábra mutatja.



30. ábra: Erő-út diagram az első esetben

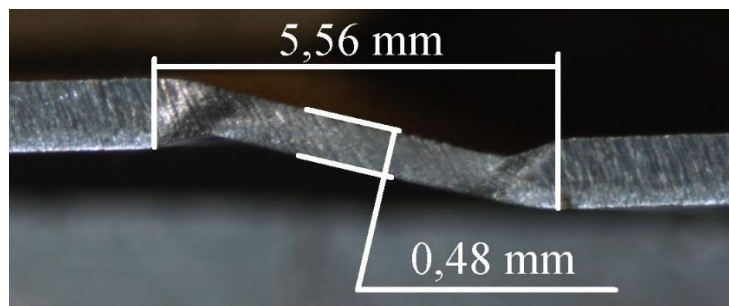
Meglévő szakítópróbából származó értékek a DC04 jelölésű anyagra vonatkozóan kéznél voltak. A folyásgörbe (31. ábra) tartalmazza a szakítópróba görbét, a nyers adatokból, korrekciómentes valódi feszültség – valódi alakváltozás görbét, illetve a két korrigált görbét.



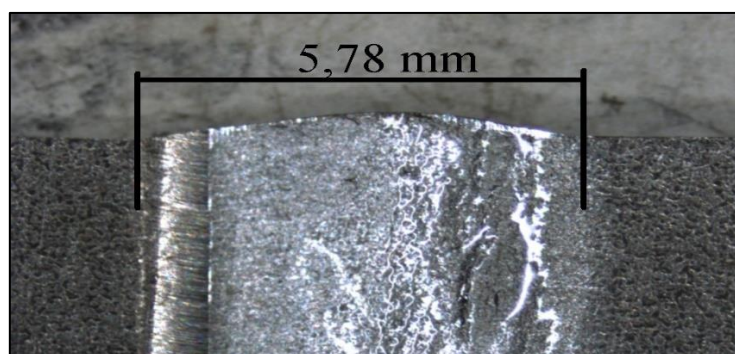
31. ábra: Folyásgörbe az első, 1 mm vastagságú lemez esetén

Az 31. ábrán a „T” görbe jelöli a szakítóvizsgálatot, „PSCT” a nyers adatok alapján meghatározott görbét, a „PSCT_von_Mises” a von Mises elmélet alapján korrigált görbét, illetve „PSCT_Hill48” a Hill’48 elmélet alapján kapott görbét. Az ábráról leolvasható, hogy von Mises elmélete alapján számított értékek közelebb állnak a szakítóvizsgálat általi

értékekhez, mint a Hill'48 elmélet szerint számítottak. Számszerűsítve a szakítóvizsgálat görbéjének legfelső pontja hozzávetőlegesen 405 MPa, ehhez képest von Mises szerint megközelítőleg 385 MPa, míg Hill'48 szerint ugyanezen alakváltozáshoz tartozó érték 345 MPa. A mérést vizuális eredményét a 32. és 33. ábrák szemléltetik.



32. ábra: Első esetben mért 1 mm-es lemez vastagsága és lenyomatának vastagsága mindkét oldalról



33. ábra: Első esetben mért 1 mm-es lemez szélesedésének mértéke mindkét oldalról

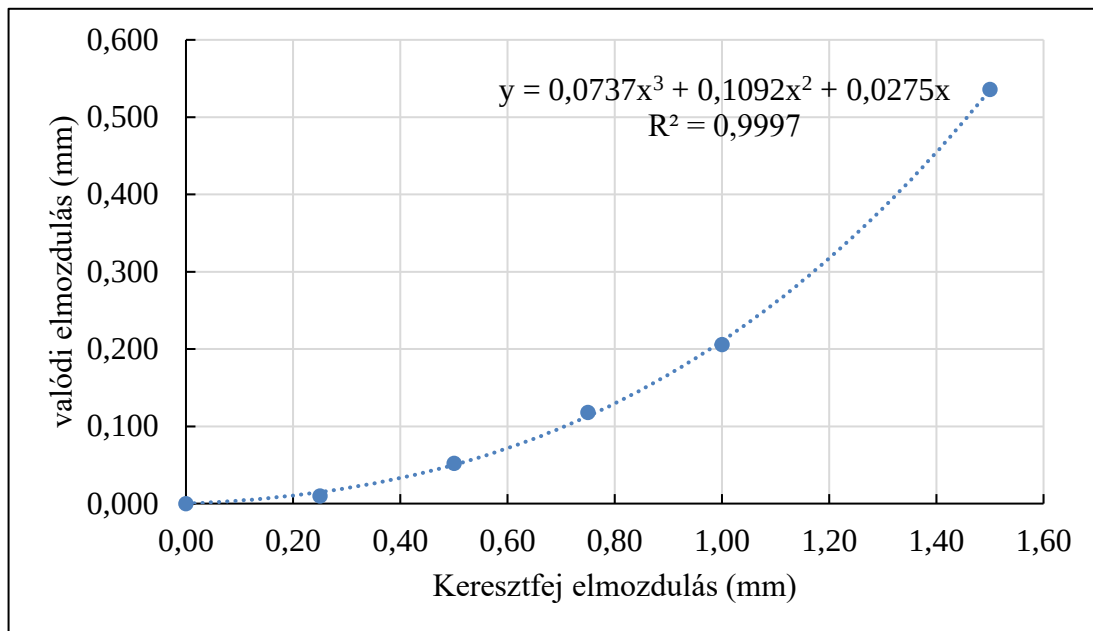
4.2. Második mérés az 1 mm vastagságú lemezen

A keresztfej sebessége szintén 0,1 mm/perc, mivel még mindig 1 mm-es lemezről beszélünk. A mérés ugyanaddig az elmozdulás értékig lett végrehajtva, szám szerint 1,5 mm-ig. A második esethez tartozóan a 6. táblázat szemlélteti a valódi elmozdulások és lemezvastagságok értékeit a keresztfej elmozdulások szerint.

6. Táblázat: Valódi lemezvastagságokhoz tartozó valódi elmozdulások 1 mm-es lemezekhez a második esetben

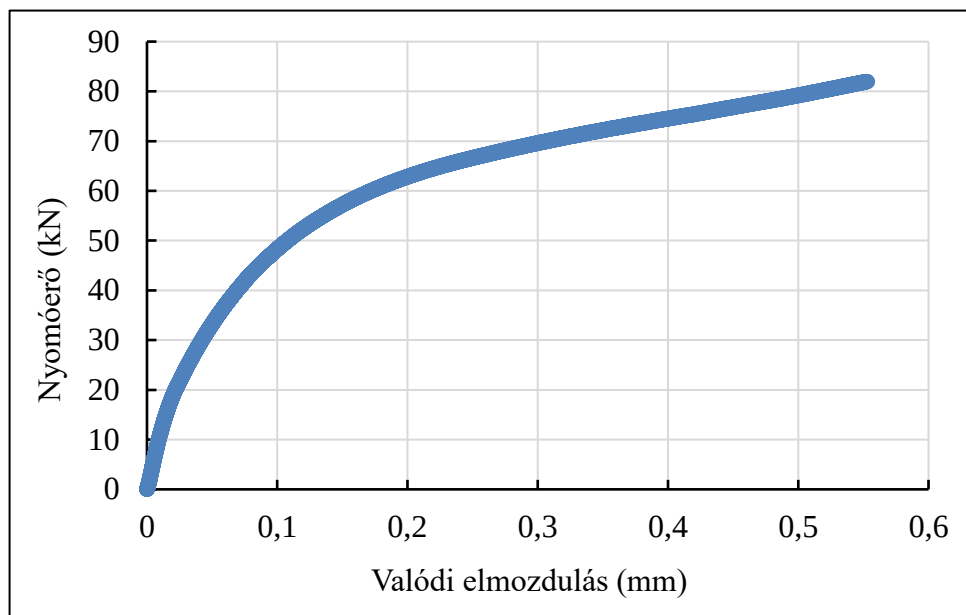
Keresztfej elmozdulás (mm)	Valódi lemezvastagság (mm)	Valódi elmozdulás (mm)
0,00	1,000	0,000
0,25	0,990	0,010
0,50	0,948	0,052
0,75	0,882	0,118
1,00	0,794	0,206
1,50	0,464	0,536

A valódi elmozdulásokat az első esethez hasonlóan itt is az 1 mm-es vastagságból kivont valódi lemeztvastagság értékek adják. Ebből a korrekciós függvényt a 34. ábra szemlélteti.



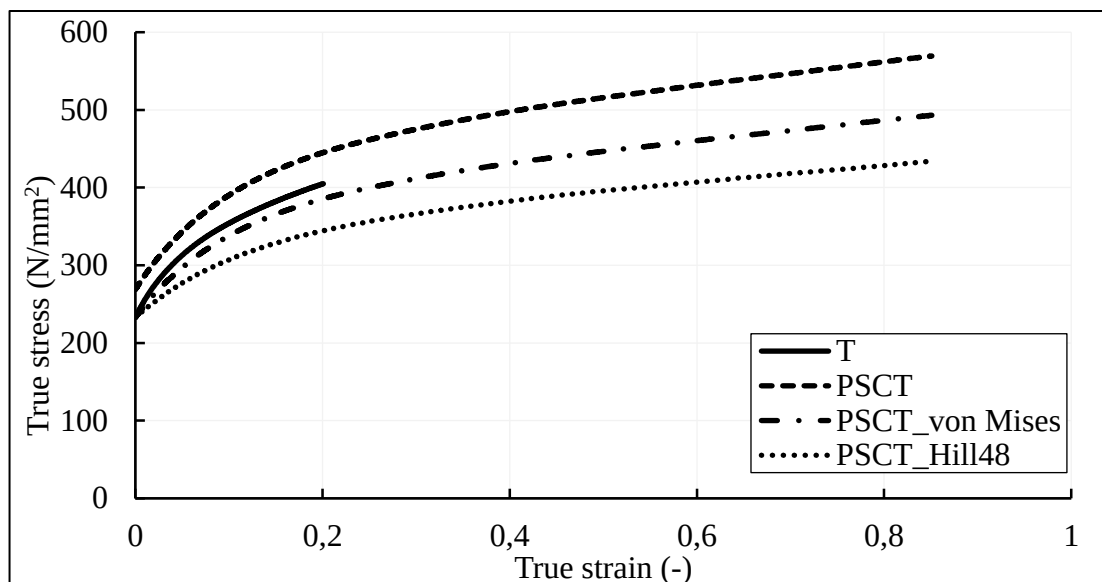
34. ábra: Második esethez tartozó korrekciós függvény

Az eljárás megegyezik az előző esettel, a hozzá tartozó harmadfokú függvény az ábrán látható. A függvény jelentős eltérést mutat a konstansok tekintetében, holott a végső lemeztvastagság csupán 0,017 mm-rel tér el a két esetben. Az erő-út diagramot a 35. ábra mutatja.



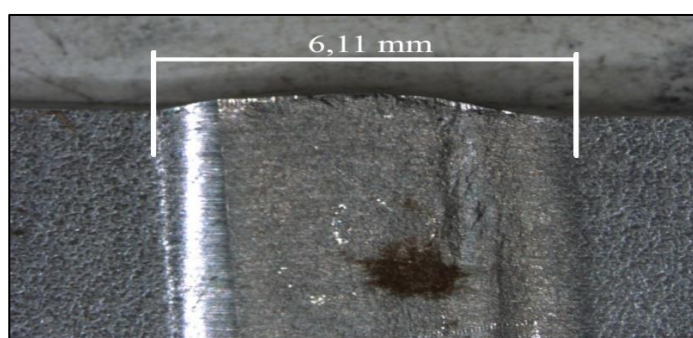
35. ábra: Erő-út diagram a második esetben

Összehasonlítva az első eset erő-út diagramjával szemmel láthatólag a görbe alakja megközelítőleg megegyező, értékek szempontjából a hozzávetőlegesen ugyanakkora erő értékhez (82 kN) minimálisan eltérő elmozdulás értékek figyelhetők meg (0,55 és 0,52 mm). A folyásgörbét a második esetre a 36. ábra szemlélteti.

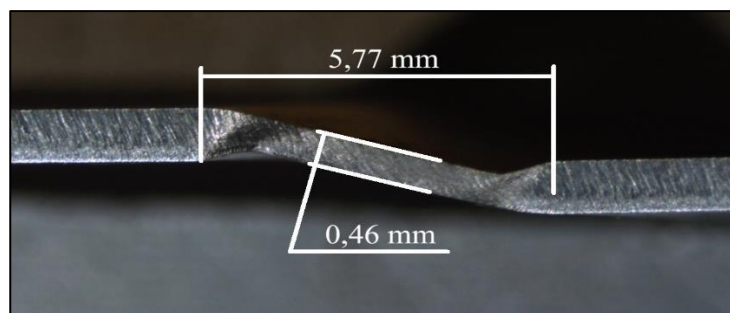


36. ábra: Folyásgörbe a második, 1 mm vastagságú lemez esetén

A folyásgörbe az első esethez képest szinte egyezést mutat mind szemmel láthatólag, mind pedig értékben, ugyanis ugyanakkora alakváltozás értékhez a szakítóvizsgálat esetén a feszültség 405 MPa, von Mises szerinti 385 MPa és Hill'48 elmélete szerint 345 MPa. Vagyis ebben az esetben is a von Mises elmélet közelebbi értéket ad a szakítóvizsgálat eredményéhez. A mérés vizuális eredményét a 37. és 38. ábrák szemléltetik.



37. ábra: Második esetben mért 1 mm-es lemez vastagsága és lenyomatának szélessége mindkét oldalról



38. ábra: Második esetben mért 1 mm-es lemez szélesedésének mértéke mindkét oldalról

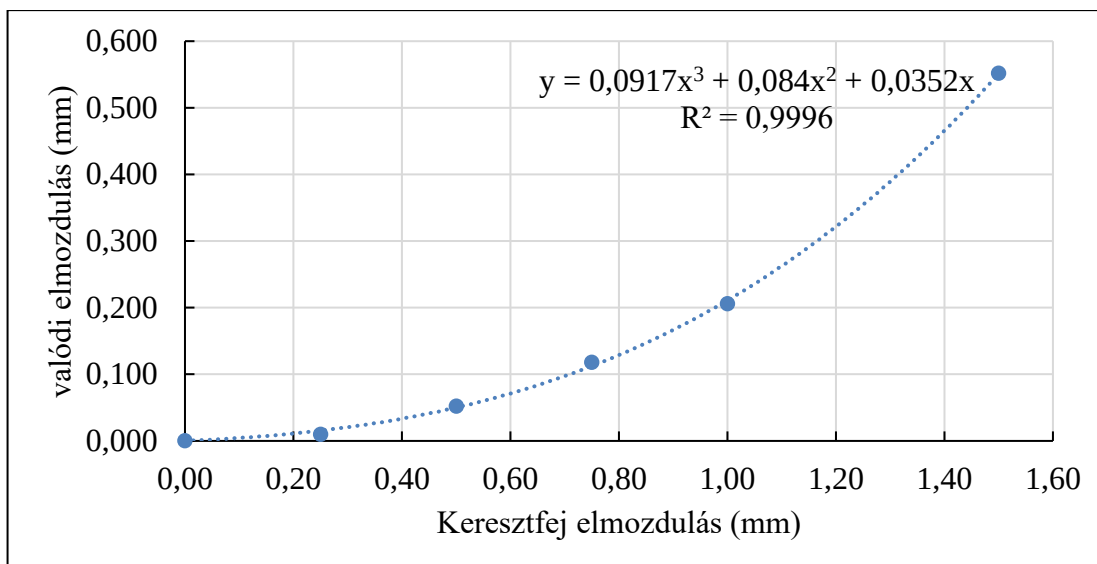
4.3. Az 1 mm vastagságú lemez harmadik mérésismétlése

A keresztfej sebessége 0,1 mm/perc. Szintén 1,5 mm kompresszív elmozdulásig lett elengedve a vizsgálat. A harmadik esethez kapcsolódó valódi elmozdulások és lemezvastagságok értékeit a keresztfej elmozdulások szerint a 7. táblázatban találhatók.

7. Táblázat: Valódi lemezvastagságokhoz tartozó valódi elmozdulások 1 mm-es lemezekhez a harmadik esetben

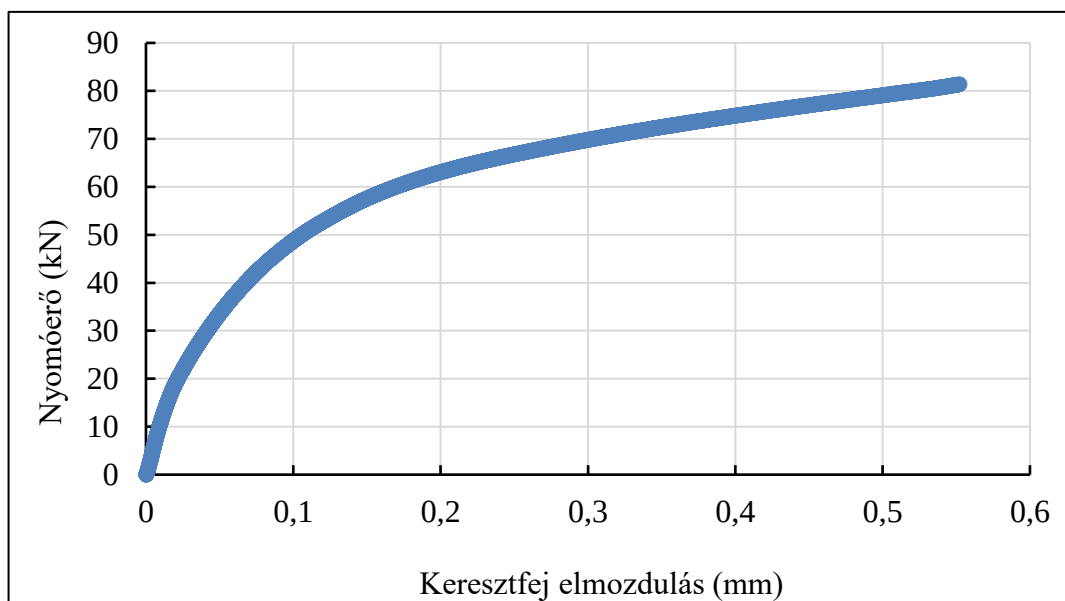
Keresztfej elmozdulás (mm)	Valódi lemezvastagság (mm)	Valódi elmozdulás (mm)
0,00	1,000	0,000
0,25	0,990	0,010
0,50	0,948	0,052
0,75	0,882	0,118
1,00	0,794	0,206
1,50	0,448	0,552

A harmadik esetben is a valódi elmozdulásokat az 1 mm kezdeti vastagságból kivont valódi lemezvastagság értékekből kapjuk. A harmadfokú korrekciós függvényt a 39. ábra mutatja.



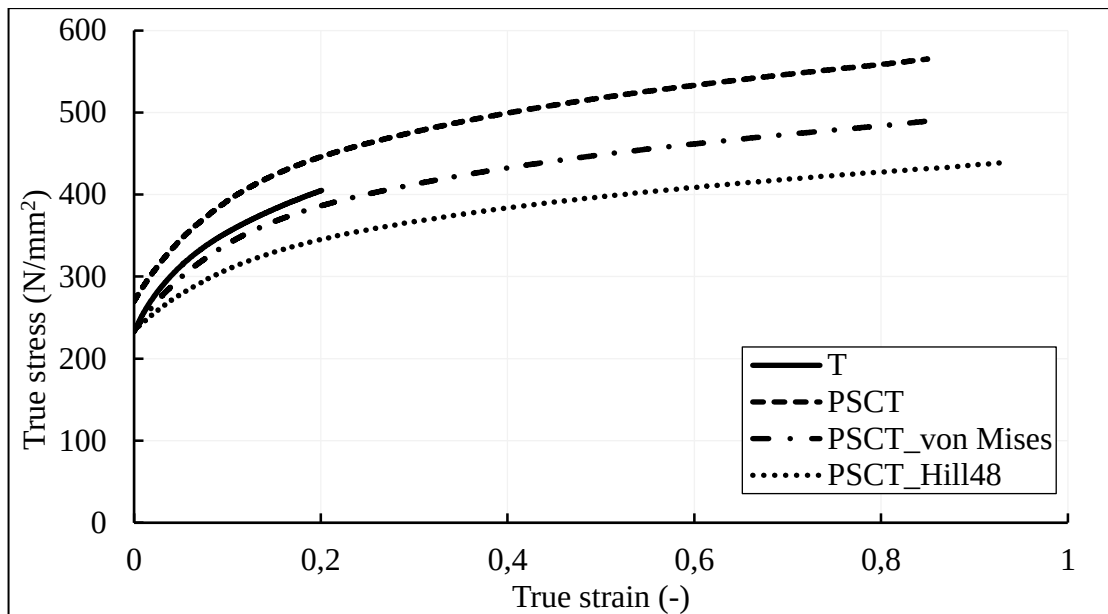
39. ábra: Harmadik esethez tartozó korrekciós függvény

Az 5. a 6. és a 7. táblázatokat összevetve észrevehető, hogy a végső lemezvastagság minimális csökkenést mutatnak. Ez meglátszik a korrekciós függvényeken is, minimális lemezvastagság változás esetén is jelentős eltérések lépnek fel a harmadfokú függvény konstans értékeiben. A harmadik eset erő-út diagramját a 40. ábra szemlélteti.



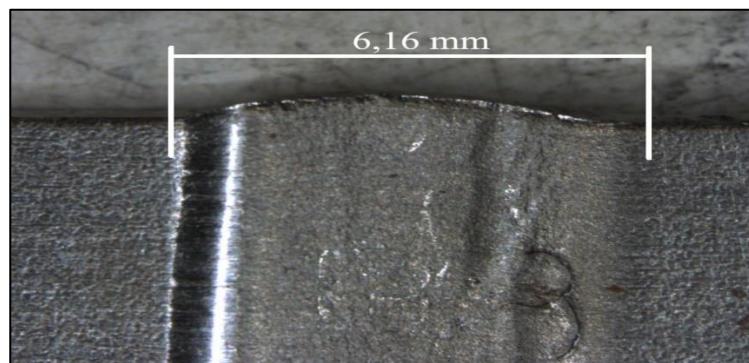
40. ábra: Erő-út diagram a harmadik esetben

Az erő értéke hozzávetőlegesen ezesetben is 82 kN, az ehhez tartozó keresztfej elmozdulás értéke megközelítőleg a második esethez közeli értéket ad (0,55 mm). A harmadik eset folyásgörbéje a 41. ábrán figyelhető meg.

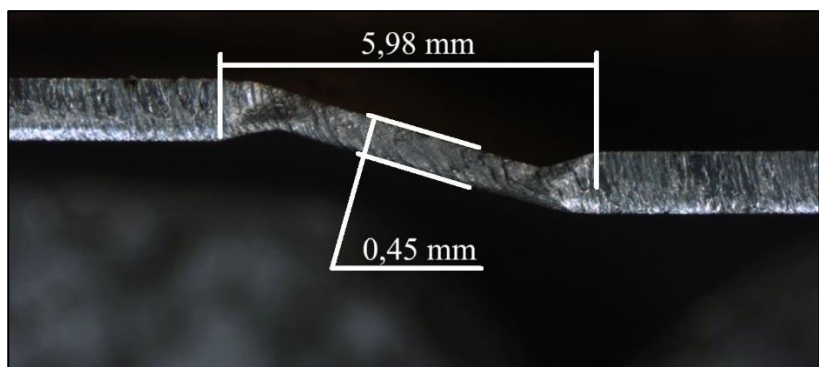


41. ábra: Folyásgörbe a harmadik, 1 mm vastagságú lemez esetén

Hasonlóan az első két esethez, itt is von Mises elmélete áll közelebb a szakítóvizsgálattal elért eredményekhez, mely 405 MPa-t mutat végső értékben, az ehhez az alakváltozáshoz tartozó feszültség érték von Mises esetén hozzávetőlegesen 386 MPa, míg Hill'48 elmélete alapján 347 MPa. Az arányok mindhárom esetben megközelítőleg ugyanakkorának bizonyultak, tehát 1 mm vastagságú lemezek 4,8 mm széles szerszámmal lenyomva 1,5 mm kompresszív elmozdulásig, mely átlagosan 0,5 és 0,55 mm közötti valódi elmozdulás értéket eredményezett. A folyásgörbék kiválóan szemléltetik a mérések közötti hasonlóságokat. A vizuális eredmények a 42. és 43. ábrákon láthatók.



42. ábra: Harmadik esetben mért 1 mm-es lemez vastagsága és lenyomatának szélessége mindkét oldalról



43. Ábra: Harmadik esetben mért 1 mm-es lemez szélesedésének mértéke mindkét oldalról

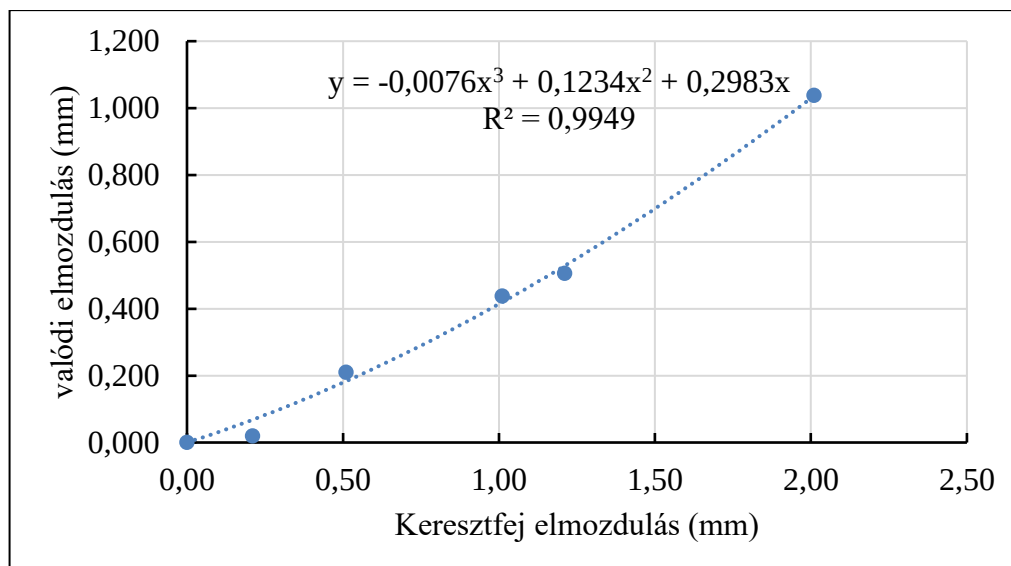
4.4. 2 mm vastagságra halmozott lemezek eredményei

A keresztfej sebessége innentől 0,2 mm/perc, igazodva a vastagság növekedéséhez. A kompresszív elmozdulás ebben az esetben egészen 2 mm-ig lett engedve. A valódi elmozdulások és lemezvastagságok értékeit a keresztfej elmozdulások szerint a 8. táblázat szemlélteti.

8. Táblázat: Valódi lemezvastagságokhoz tartozó valódi elmozdulások 2 mm-es halmozott lemezekhez az első esetben

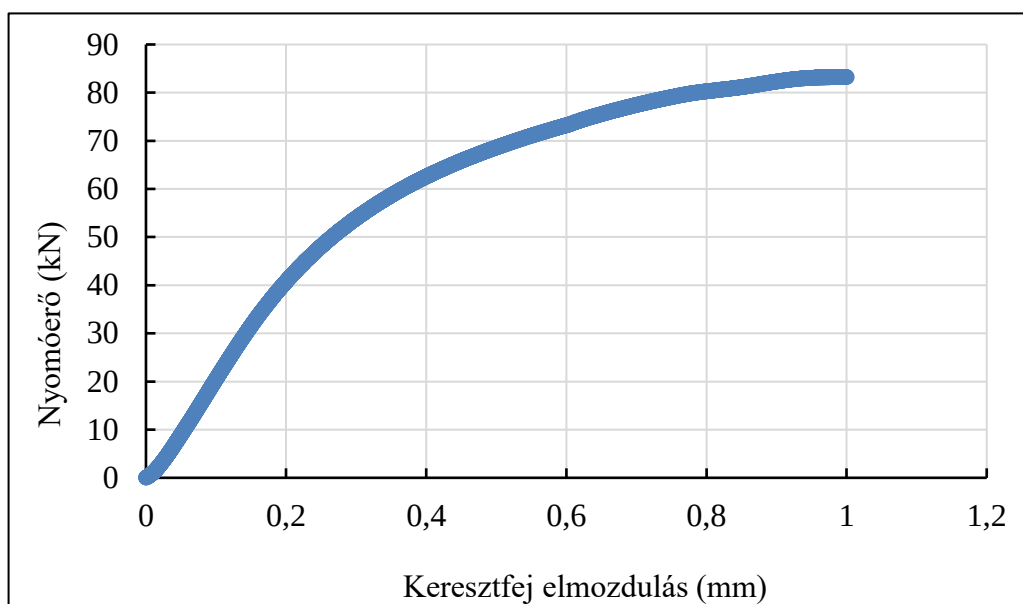
Keresztfej elmozdulás (mm)	Valódi lemezvastagság (mm)	Valódi elmozdulás (mm)
0,00	2,000	0,000
0,21	1,980	0,020
0,51	1,790	0,210
1,01	1,562	0,438
1,21	1,494	0,506
2,01	0,962	1,038

A valódi elmozdulásokat ebben az esetben már 2 mm-es kezdeti vastagságból kivont valódi lemezvastagság értékekből kapjuk meg. A korrekció a 2 mm-es lemezek esetén a 8. táblázat első oszlopában látható értékek alapján került vizsgálatra. A korrekciós függvényt a 44. ábra mutatja.



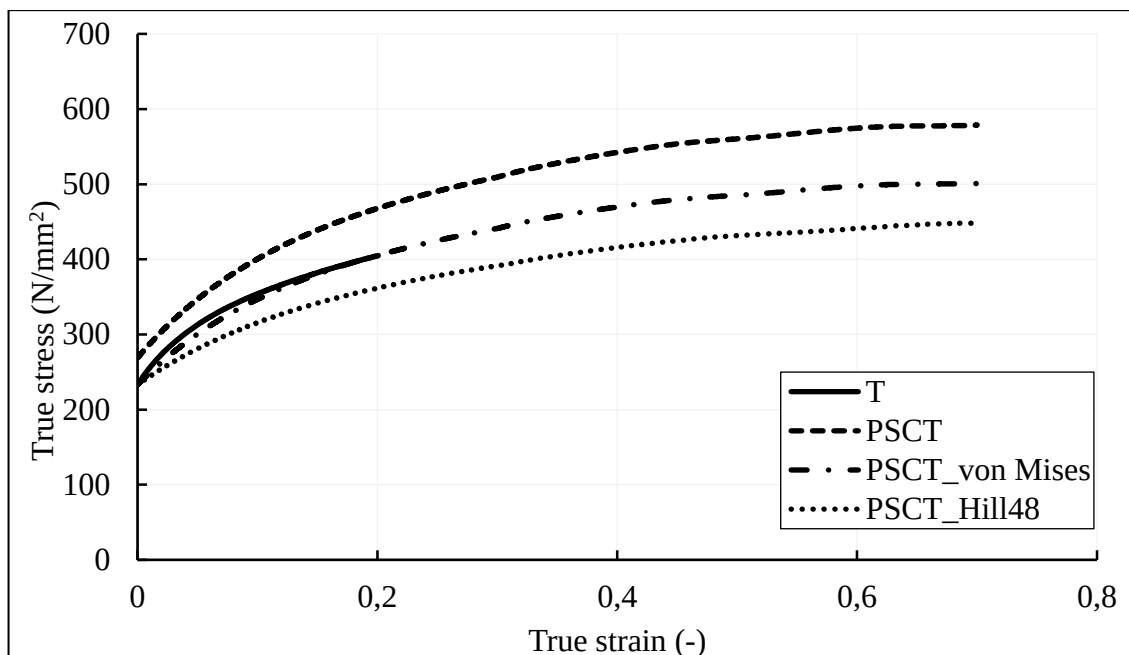
44. ábra: Első esethez tartozó korrekciós függvény 2 mm vastag lemeznél

Az eljárás ebben az esetben is ugyanaz, egyedüli különbség a harmadfokú függvény konstansaiban lelhető fel. Az esethez tartozó erő-út diagramot a 45. ábra szemlélteti.



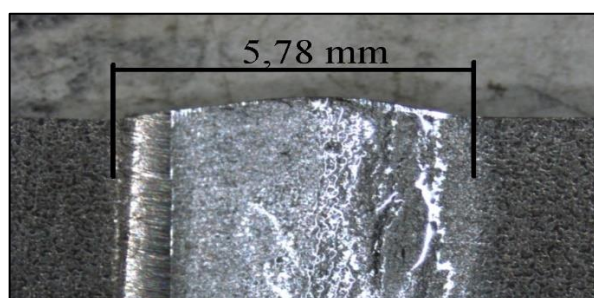
45. ábra: Erő-út diagram az első esetben 2 mm vastag lemeznél

Az 1 mm vastag lemezek erő-út diagramjaihoz képest kevésbé szabályos lefolyású a görbe. Az erő ebben az esetben megközelíti a 84 kN-os értéket, ekkora erő hatására a lemez nem teljesen a vártnak megfelelően viselkedik, ez észrevehető az erő-út diagram minimális kilengésein is. Az esethez tartozó folyásgörbét a 46. ábra mutatja.

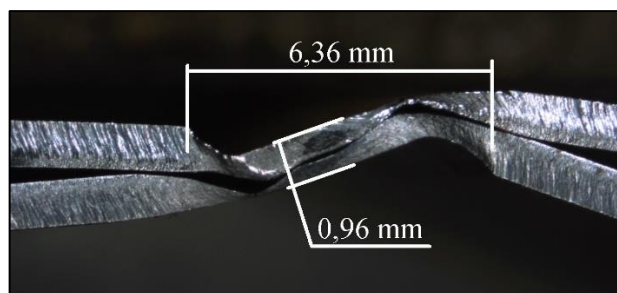


46. Ábra: Folyásgörbe az első, 2 mm vastagságú lemez esetén

Jól észrevehető, hogy a nyers adatokból származó „PSCT_von_Mises” görbe szinte teljesen a szakítóvizsgálatból kapott görbén fut. Az ehhez tartozó feszültség érték hozzávetőlegesen 410 MPa. Az eredeti görbe szemmel láthatólag távolabb esik a „T” görbétől, értékben megközelítőleg 470 MPa-t ér el, míg Hill’48 elmélet alapján 366 MPa, vagyis az első, 2 mm vastagságú lemezpár esetén szintén a von Mises elmélet az, amelyikből pontosabb eredményt kapunk a szakítóvizsgálathoz képest. A mérés az 1 mm vastag lemezekhez képest instabilabb görbét eredményezett, főleg nagyobb alakváltozásoknál. A vizuális eredményeket a 47. és 48. ábrák mutatják.



47. ábra: Második esetben mért 2 mm-es lemez vastagsága és lenyomatának szélessége mindkét oldalról



48. ábra: Második esetben mért 2 mm-es lemez szélesedésének mértéke mindkét oldalról

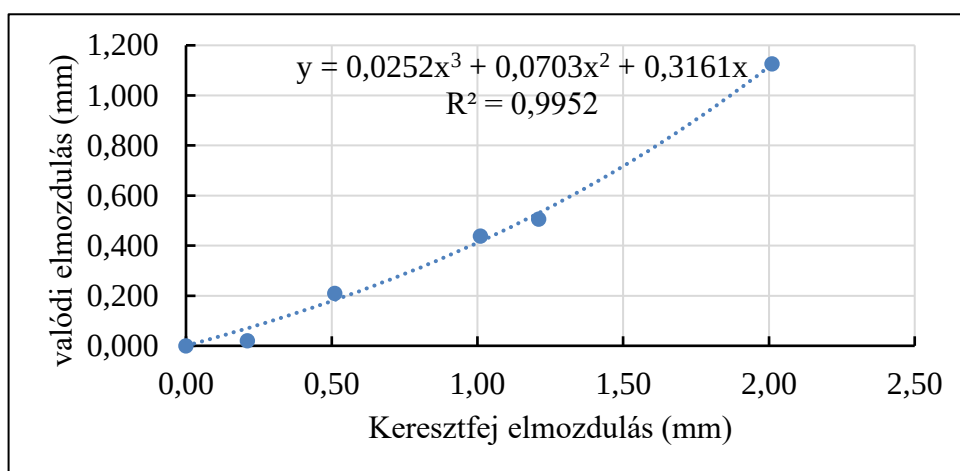
4.5. A 2 mm halmozott vastagságú lemez második mérésismétlése

Hasonlóan az előző esethez, a sebesség itt is 0,2 mm/perc. A valódi elmozdulások és lemezvastagságok értékeit a keresztfej elmozdulások szerint a 9. táblázat ábrázolja.

9. Táblázat: Valódi lemezvastagságokhoz tartozó valódi elmozdulások 2 mm-es halmozott lemezekhez a második esetben

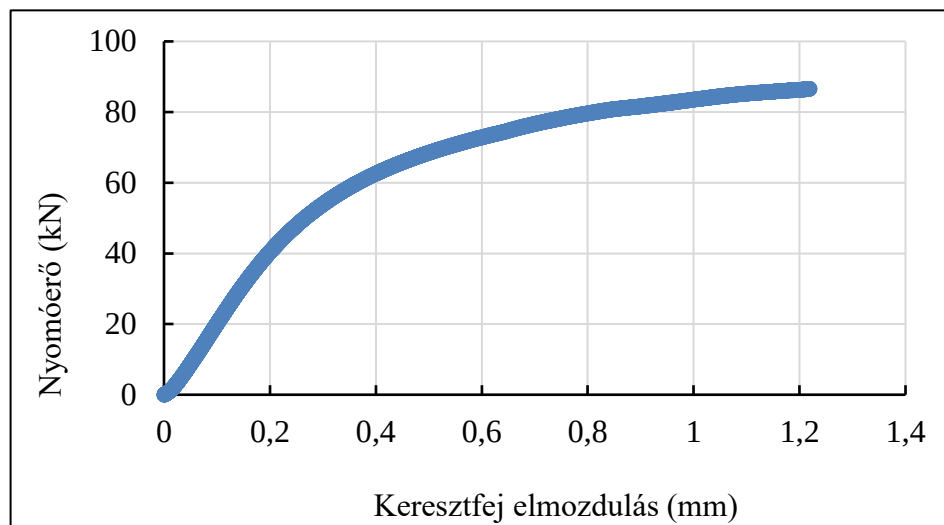
Keresztfej elmozdulás (mm)	Valódi lemezvastagság (mm)	Valódi elmozdulás (mm)
0,00	2,000	0,000
0,21	1,980	0,020
0,51	1,790	0,210
1,01	1,562	0,438
1,21	1,494	0,506
2,01	0,874	1,126

A valódi elmozdulásokat ebben az esetben is 2 mm-es kezdeti vastagságból kivont valódi lemezvastagság értékekből kapjuk meg. A valódi elmozdulás több, mint duplájára nőtt az 1 mm-es lemezekhez képest. Az ide tartozó korrekciós függvényt a 49. ábra mutatja.



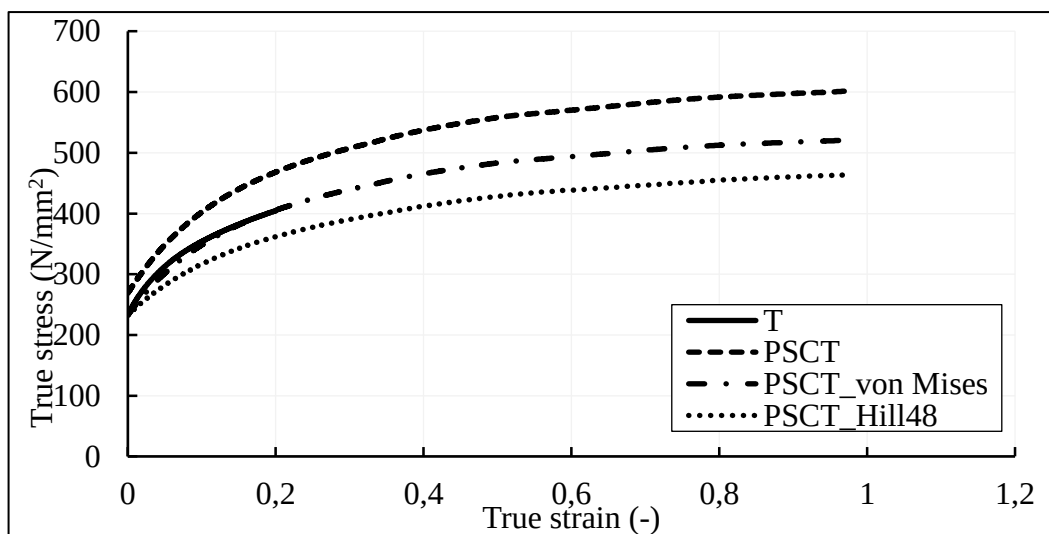
49. ábra: Második esethez tartozó korrekciós függvény 2 mm vastag lemeznél

Továbbá az erő-út diagram az 50. ábrán lelhető fel.



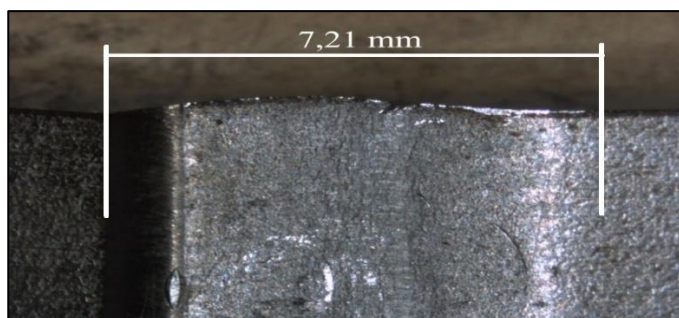
50. ábra: Erő-út diagram a második esetben 2 mm vastag lemeznél

Mind az erő, mind pedig a keresztfej elmozdulása jelentős eltérést mutat az előző esethez képest. A maximális erő megközelítőleg 87 kN, míg az elmozdulás 1,2 mm. A görbe lefutása szemmel láthatólag megegyező a 4.4-es esethez. A 4.5 esethez tartozó folyásgörbét az 51. ábra mutatja.

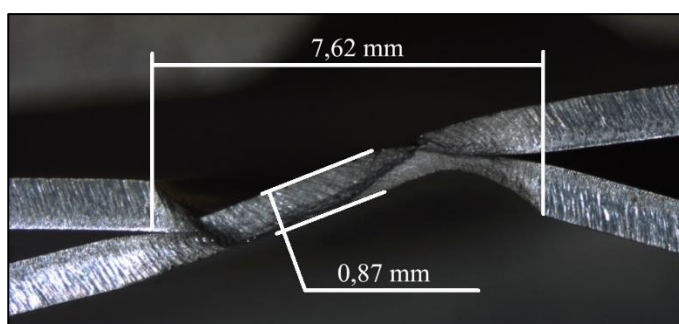


51. ábra: Folyásgörbe a második, 2 mm vastagságú lemez esetén

Ebben az esetben értékbeli eltérések jelentkeznek, de a görbék lefutása közel megegyező az előző esetével. A szakítóvizsgálatból kapott görbe végértéke 408 MPa körüli, Hill'48 elmélete alapján kapott érték ugyanezen alakváltozáshoz tartozóan hozzávetőlegesen 365 MPa, míg korrekciózás nélkül 472 MPa, viszont a von Mises elmélete ad a szakítóvizsgálathoz közelebbi képet. A vizuális eredményeket az 52. és 53. ábrák szemléltetik.



52. ábra: Második esetben mért 2 mm-es lemez vastagsága és lenyomatának szélessége mindkét oldalról



53. ábra: Második esetben mért 2 mm-es lemez szélesedésének mértéke mindkét oldalról

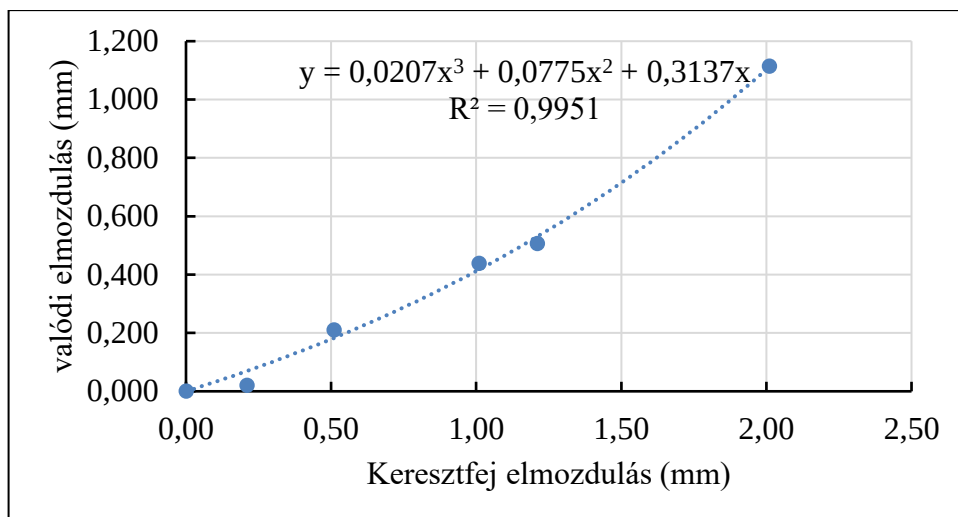
4.6. A 2 mm halmozott vastagságú lemez harmadik mérésismétlése

Az utolsó esetben is a keresztfej sebessége 0,2 mm/perc, minden más beállítás megegyezik. A valódi elmozdulások és lemezvastagságok értékei a keresztfej elmozdulások szerint a 10. táblázatban találhatók.

10. Táblázat: Valódi lemezvastagságokhoz tartozó valódi elmozdulások 2 mm-es lemezekhez a harmadik esetben

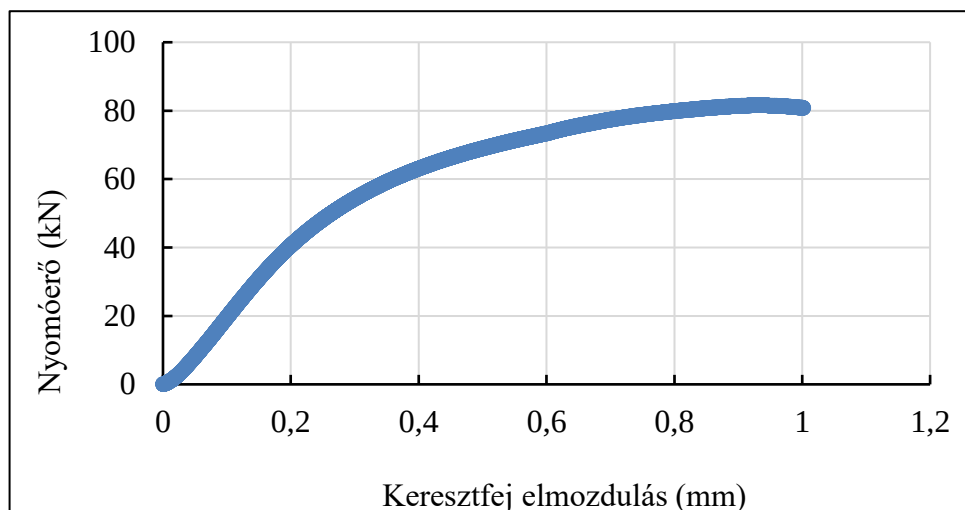
Keresztfej elmozdulás (mm)	Valódi lemezvastagság (mm)	Valódi elmozdulás (mm)
0,00	2,000	0,000
0,21	1,980	0,020
0,51	1,790	0,210
1,01	1,562	0,438
1,21	1,494	0,506
2,01	0,886	1,114

Ebben az esetben is több, mint felére csökkent a lemezvastagság. Az ide tartozó korrekciós függvényt az 54. ábrán lehet megtekinteni.



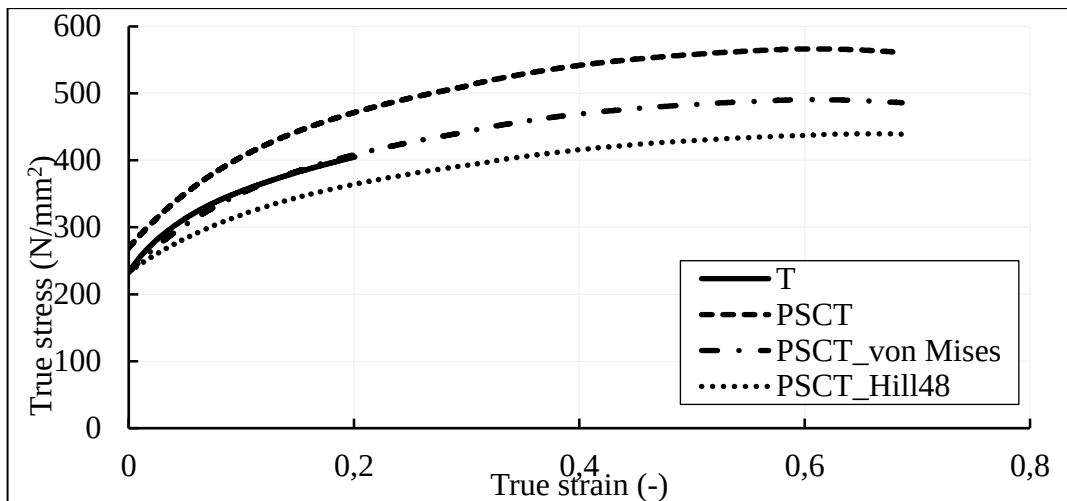
54. ábra: Harmadik esethez tartozó korrekciós függvény 2 mm vastag lemeznél

Továbbá az utolsó esethez kapcsolódó erő-út diagramot az 55. ábra mutatja.



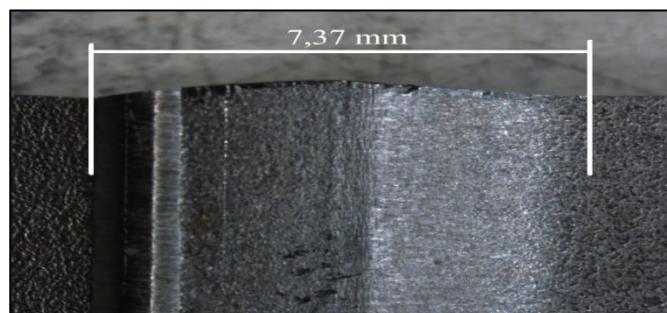
55. ábra: Erő-út diagram a harmadik esetben 2 mm vastag lemeznél

Ezesetben nem történt akkora mértékű terhelés és elmozdulás, mint a 4.5 esetben. A görbe lefutása némileg egyenetlenebb, mint az előző esetekben. A terhelés itt megközelítőleg 81 kN, míg az elmozdulás csupán 1 mm. A folyásgörbét szemlélteti a 56. ábra.

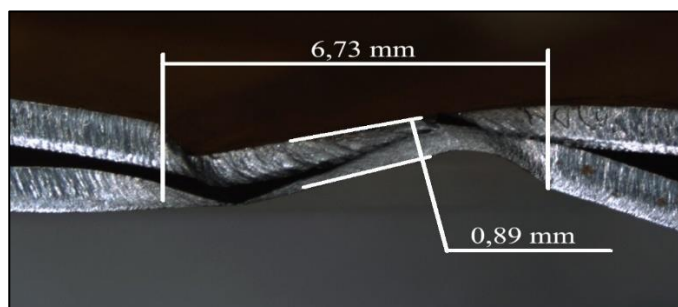


56. ábra: Folyásgörbe a harmadik, 2 mm vastagságú lemez esetén

Megközelítőleg ugyanazt az eredmény kapjuk a görbék alapján, mint az előző esetben, annak ellenére is, hogy a 4.5 eset nagyobb terhelést kapott és kisebb lemeztvastagság értéket ért el. A görbék lefutása a 4.4, 4.5 és 4.6 esetekben közel megegyező. A „T” görbe értéke ez esetben is 408 MPa, korrekció nélkül 475 MPa, illetve Hill’48 alapján hozzávetőlegesen 367 MPa értékű feszültséget kapunk, vagyis itt is a von Mises elmélet alapján kapott értékek állnak közelebb a szakítóvizsgálatból kapott értékekhez. A vizuális eredmények az 57. és 58. ábrákon láthatók.



57. ábra: Harmadik esetben mért 2 mm-es lemez vastagsága és lenyomatának szélessége mindkét oldalról



58. ábra: Harmadik esetben mért 2 mm-es lemez szélesedésének mértéke mindkét oldalról

Összefoglalás

A dolgozat a síkalakváltozási nyomóvizsgálatok alkalmazhatóságát vizsgálta, különös tekintettel a nagy alakváltozásokra érvényes folyásgörbék meghatározására és az anyagok síkalakváltozási feszültségi állapotban mutatott viselkedésének leírására. A hagyományos szakítóvizsgálatok korlátainak áthidalására a síkalakváltozási nyomóvizsgálat olyan értékes módszert kínál, amely különösen alkalmas a képlékenyalakítási technológiák modellezésére.

A kutatás során bemutattam a módszer működési elvét, a vizsgálatokhoz szükséges minták előkészítését, valamint a mérési eljárások során felmerülő nehézségeket, mint például a geometriai korlátokat és a súrlódási hatásokat. Ennek kapcsán kiterjedt elemzéseket végeztem a halmaz zömítő vizsgálatok alkalmazásával, amelyek lehetőséget kínálnak a módszer továbbfejlesztésére vékony lemezek esetében. Összesen 14 számú nyomóvizsgálatot végeztem el a hagyományos és halmazzömítő elrendezésekben, amelyekből három-három eset elemzését mutattam be a 4.1 – 4.6 fejezetekben. A minták méreteinek átgondolására a 13. – 22. ábrákat szerkesztettem ki a geometriai viszonyok szemléltetése céljából. Összehasonlítva az eredményeket, elmondható, hogy a halmaz zömítő vizsgálatok elvét alapul vevő mérések során is megfelelő lefutású görbéket kaptam eredményül.

A dolgozat eredményei igazolták, hogy a síkalakváltozási nyomóvizsgálatok segítségével pontos folyásgörbék állíthatók elő a nagy alakváltozások tartományában. Összességében a kutatás új perspektívát nyújt a nagy alakváltozások vizsgálatához szükséges módszertan továbbfejlesztésére. A bemutatott eljárások és eredmények nemcsak a jelenlegi ipari és tudományos kihívásokra kínálnak megoldást, hanem alapot szolgáltatnak a további kutatásokhoz is, amelyek célja a képlékeny alakítási technológiák hatékonyságának további növelése.

Jelen „Síkalakváltozási feszültségi állapotot megtestesítő nyomóvizsgálatok kísérleti elemzése” a 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008 projekt keretében jött létre. A 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2024-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Ábrajegyzék

1. ábra: Valódi feszültség a plasztikus nyúlás függvényében DC04 esetén [14]	5
2. ábra: A hengerlés szemléltetése [15]	7
3. ábra: Az alumínium folyási feszültsége az alakváltozás függvényében különböző hőmérsékleteken [7]	9
4. ábra: A szakítóvizsgálat elve [10]	11
5. ábra: Hárompontos (a) és négyponthoz (b) terhelés [5]	12
6. ábra: Hajlítás során deformálódó keresztmetszet [4]	14
7. ábra: A Brinell keménységmérés alapelve [5]	16
8. ábra: A Vickers eljárás elve és a lenyomat leolvasásának módja. [5]	16
9. ábra: A Rockwell C eljárás elve és a mérés menete [5]	17
10. ábra: Folyásgörbék Cu szakító-, zömítő- és keménységmérő vizsgálataiból [17]	18
11. ábra: A nyomóvizsgálat elrendezése (a), nyomókúpok (b), a próbatest hordósodása (c) [5]	19
12. ábra: Síkalakváltozási nyomóvizsgálat felépítése	21
13. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Graf szerint	25
14. ábra: Az l/b viszony a h/b viszony függvényében (a) és a w/b viszony az l/b viszony függvényében (b) Graf szerint	25
15. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Chermette szerint	26
16. ábra: Az l/b viszony a h/b viszony függvényében (a) és a w/b viszony az l/b viszony függvényében (b) Chermette szerint	27
17. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Banabic szerint	27
18. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Nuttakorn szerint	27
19. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Mohebbi szerint	28
20. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Loveday szerint	28
21. ábra: Az l/b viszony a h/b viszony függvényében (a) és a w/b viszony az l/b viszony függvényében (b) Loveday szerint	29
22. ábra: A w/b viszony a h/b viszony függvényében Becker és Pöhlant szerint	29
23. ábra: Instron 4482 5900R univerzális anyagvizsgáló berendezés	30
24. ábra: Bluehill 3 szoftver kezdőképernyője	31
25. ábra: Mérőóra elhelyezkedése a mérési környezetben	31
26. ábra: A szerszámok helyzete a nyomópofákban	32
27. ábra: Lézerrel kivágott próbatest és a lemez (hengerlés iránya fekete nyíllal)	33
28. ábra: Zeiss SteREO Discovery V8 makroszkóp	36
29. ábra: Első esethez tartozó korrekciós függvény	37
30. ábra: Erő-út diagram az első esetben	38
31. ábra: Folyásgörbe az első, 1 mm vastagságú lemez esetén	38
32. ábra: Első esetben mért 1 mm-es lemez vastagsága és lenyomatának szélessége mindkét oldalról	39
33. ábra: Első esetben mért 1 mm-es lemez szélesedésének mértéke mindkét oldalról	39
34. ábra: Második esethez tartozó korrekciós függvény	40
35. ábra: Erő-út diagram a második esetben	40
36. ábra: Folyásgörbe a második, 1 mm vastagságú lemez esetén	41
37. ábra: Második esetben mért 1 mm-es lemez vastagsága és lenyomatának szélessége mindkét oldalról	41
38. ábra: Második esetben mért 1 mm-es lemez szélesedésének mértéke mindkét oldalról	42
39. ábra: Harmadik esethez tartozó korrekciós függvény	43
40. ábra: Erő-út diagram a harmadik esetben	43
41. ábra: Folyásgörbe a harmadik, 1 mm vastagságú lemez esetén	44

42. ábra: Harmadik esetben mért 1 mm-es lemez vastagsága és lenyomatának szélessége mindkét oldalról.....	44
43. Ábra: Harmadik esetben mért 1 mm-es lemez szélesedésének mértéke mindkét oldalról	45
44. ábra: Első esethez tartozó korrekciós függvény 2 mm vastag lemeznél	46
45. ábra: Erő-út diagram az első esetben 2 mm vastag lemeznél.....	46
46. Ábra: Folyásgörbe az első, 2 mm vastagságú lemez esetén	47
47. ábra: Második esetben mért 2 mm-es lemez vastagsága és lenyomatának szélessége mindkét oldalról.....	47
48. ábra: Második esetben mért 2 mm-es lemez szélesedésének mértéke mindkét oldalról.....	48
49. ábra: Második esethez tartozó korrekciós függvény 2 mm vastag lemeznél	48
50. ábra: Erő-út diagram a második esetben 2 mm vastag lemeznél.....	49
51. ábra: Folyásgörbe a második, 2 mm vastagságú lemez esetén.....	49
52. ábra: Második esetben mért 2 mm-es lemez vastagsága és lenyomatának szélessége mindkét oldalról.....	50
53. ábra: Második esetben mért 2 mm-es lemez szélesedésének mértéke mindkét oldalról.....	50
54. ábra: Harmadik esethez tartozó korrekciós függvény 2 mm vastag lemeznél	51
55. ábra: Erő-út diagram a harmadik esetben 2 mm vastag lemeznél	51
56. ábra: Folyásgörbe a harmadik, 2 mm vastagságú lemez esetén	52
57. ábra: Harmadik esetben mért 2 mm-es lemez vastagsága és lenyomatának szélessége mindkét oldalról.....	52
58. ábra: Harmadik esetben mért 2 mm-es lemez szélesedésének mértéke mindkét oldalról	52

Irodalomjegyzék

- [1] A. Rudnitskyj et. al.: Investigating the relationship of hardness and flow stress in metal forming, International Journal of Mechanical Sciences 232, 107571, 2022
- [2] 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
- [3] D. Banabic, H.-J. Bunge, K. Pöhlandt, 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
- [4] Dr. Sárvári J. (szerk.) és mtsai: Képlékeny hidegalakítás, Tankönyvkiadó, Budapest, 1979
- [5] Dr. Tisza Miklós (szerk.) és mtsai: Anyagvizsgálat, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2001
- [6] Dr. Pradeep K. Jha: Material behaviour in metal forming, NPTEL Mechanical Engineering – Forming, 2021
- [7] K. Pöhlandt: Materials testing for the metal forming industry, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Stuttgart, 1988
- [8] Loveday MS et. al.: Measurement of flow stress in hot plane strain compression tests. Mater High Temp 23(2):85–118, 2006
- [9] 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
- [10] Magyarkúti J.: Anyagvizsgálatok – Roncsolásos vizsgálati módszerek 1 – szakítóvizsgálatok, Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, Budapest, 2008
- [11] 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
- [12] N. Becker, K. Pohlandt; Improvement of the Plane-Strain Compression Test for Determining Flow Curves, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart/FRG, 1989
- [13] 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
- [14] T. Su, T. He, R. Yang, M. Li: Topology optimization and lightweight design of stamping dies for forming automobile panels, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 121(7-8):1-12, 2022
- [15] Voith Márton: A képlékenyalakítás elmélete, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 1998

- [16] W. C Emmens: Formability, Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, Hengelo, 2011
- [17] W. J. Tomlinson, K. Talbot: On the Relation Between Hardness and the Flow Curve of Metals, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 3, Rugby College of Engineering Technology Eastlands, Rugby, UK, 1968
- [18] Metall Ehrnsberger: Technical Information - unalloyed steel DC04 – 1008, <https://metallstore24.de/en/steel-dc04-1008>, 2024. 11. 15
- [19] BECU: Exploring DC04 Material: Properties, Applications, and Advantages, <https://be-cu.com/blog/dc04-material/>, 2024. 11. 15