



Neumann János Egyetem
Műszaki és Informatikai
Kar

Járműkarosszéria lemezek alakváltozási képességének vizsgálata

Examination of the deformation
capability of vehicle body panels

Borbély Richárd
D600XW

Dr. Béres Gábor József, egyetemi adjunktus

2023

Tartalomjegyzék

BEVEZETÉS	7
1. ALAKÍTHATÓSÁGI VIZSGÁLATOK	8
1.1. LEMEZYANYAGOK ALAKÍTHATÓSÁGI VIZSGÁLATA	8
1.2. R-N VIZSGÁLATOK	8
1.2.1. <i>Képlékenységi anizotrópia tényező: r</i>	8
1.2.2. <i>Keményedési kitevő: n</i>	10
1.3. ERICHSEN-FÉLE MÉLYÍTŐVIZSGÁLAT	10
1.4. CSÉSZEHÚZÓ VIZSGÁLAT	11
1.5. NAKAZIMA VIZSGÁLAT	12
2. KÜLÖNBÖZŐ TULAJDONSÁGOKKAL RENDELKEZŐ LEMEZEKBŐL ÖSSZEÁLLÍTOTT LEMEZTERÍTÉKEK	14
2.1. MÉRETERE SZABOTT, HEGESZTETT LEMEZTERÍTÉKEK (TWB-K) ÁTTEKINTÉSE	15
2.2. TWB-K ALAKÍTHATÓSÁGA	16
3. VÉGESELEM MÓDSZER HASZNÁLATA A LEMEZALAKÍTÁSBAN	17
3.1. AUTOFORM R7	17
4. NAKAZIMA VIZSGÁLAT TWB LEMEZEKEN	19
4.1. ANYAGOK	19
4.1.1. <i>Alacsony szénttartalmú acélok</i>	19
4.1.2. <i>Növelt szilárdságú acélok</i>	20
4.1.3. <i>A vizsgált anyagok jellemzőinek meghatározása</i>	20
4.2. PRÓBADARABOK	20
4.3. VIZSGÁLATI KÖRÜLMÉNYEK	21
4.3.1. <i>Nakazima vizsgálat a laboratóriumban</i>	21
4.3.2. <i>Nakazima vizsgálat modellezése az Autoform szoftverben</i>	23
5. EREDMÉNYEK	26
5.1. NAKAZIMA VIZSGÁLAT EREDMÉNYEI LABORKÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT	26
5.2. NAKAZIMA VIZSGÁLAT EREDMÉNYEI SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZETBEN	28
6. KONKLÚZIÓ	32
ÖSSZEFOGLALÁS	33
ÁBRAJEGYZÉK	34
IRODALOMJEGYZÉK	35

Bevezetés

Napjainkban a különböző iparágakban szereplő nagyvállalatok versenyképességüket azzal tudják növelni, ha a vevői igényeket minél jobban kiszolgálják. Azonban a vevői igényeken kívül egyre több egyéb követelményt és szabályt is szem előtt kell tartaniuk, amelyek együttes betartása nehézséget okoz. A járműiparban például egy jelentős ellentmondást jelent a súly- vagy károsanyag kibocsátás csökkentése és a járműkarosszériára vonatkozó biztonsági előírások teljesítése. Az elvárások növekedésének kielégítése érdekében a vékonyabb lemezek alkalmazása előtérbe került. Ezáltal a jármű könnyebb lesz, ami kevesebb üzemanyag felhasználását eredményezi és csökkenti a CO₂ kibocsátást. Azonban a karosszéria biztonságának megőrzése érdekében szükség van új anyagokra, melyek nagy szilárdsággal és energiaeinyelő képességgel rendelkeznek. Ezek az anyagok lehetővé teszik az akár több mint 30%-os tömegcsökkenést anélkül, hogy az ütközési energia elnyelése, azaz a törésbiztonság csökkenne.

A gazdaságosság és biztonság egyensúlyának fenntartása mellett folyik a kutatás a nagy szilárdságú, drága anyagok céltudatos felhasználására, kiemelve a gazdasági szempontokat. A fő cél az, hogy a teherhordó és védő elemek anyagát optimalizált módon használjuk fel. Az alapgondolat az, hogy az alkatrészhez kapcsolódó funkciókat a lehető legmegfelelőbb anyagból készítsük el. Ez a „anyagidealizálás” azt jelenti, hogy az alkatrészek különböző vastagságúak, bevonatúak vagy eltérő szilárdságú terítékekből összeállítva kerülnek kialakításra, amelyek az adott feladatot a leoptimálisabban látják el.

A dolgozatomban egy hagyományos és egy nagyszilárdságú járműipari karosszéria lemezanyag viselkedését vizsgálom. A vizsgálat során a hagyományos és nagyszilárdságú acélokból anyagpárokat készítettem és a szabványos Nakazima vizsgálatnak vetettem alá őket. Az anyagpárosításokat lézerhegesztés technológiájával kötöttem össze.

Dolgozatom célja vizsgálni az anyagpárok alakváltozási képességét és az esetleges anyagok közötti kölcsönhatást.

1. Alakíthatósági vizsgálatok

Az alakíthatóság vizsgálata rendkívül fontos napjainkban, ugyanis ahhoz, hogy a választott anyag alakváltozási képességét meghatározzuk, elengedhetetlenek az ilyen jellegű vizsgálatok. Az alakváltozás szorosan összefügg az anyagok alakítási szilárdságával is, ugyanis a fémek alakítása során a szilárdság növelése általában csökkenti az alakváltozási képességeket. A műszaki fejlődés során fontos, hogy tartsuk meg az anyag alakíthatóságát, miközben biztosítjuk a kívánt szilárdsági jellemzőket. Hamar felismerték, hogy az alakváltozás mértékét érdemes számszerűsíteni, ezért számos eljárás kidolgozása mellett ennek érdekében alkották meg az alakíthatósági határdiagrammok módszerét, (Forming Limit Diagram) amely a lemezanyagok alakíthatóságának jellemzésére, és számszerű értékének meghatározására szolgál.

Az alakíthatóságok vizsgálatára az FLD módszerén kívül egyéb módszerek is kialakultak melyeket évtizedek óta alkalmaznak. Ezek az eljárások gyakran számszerűsítik az anyagok alakíthatóságát, de az is előfordul, hogy szimplán a vizsgálat elvégezhetőségét, avagy el nem végezhetőségét határozzák meg. A következőkben néhány klasszikus, legnagyobb mértékben elterjedt alakíthatósági vizsgálat áttekintését fogom megejteni. [1]

1.1. Lemezanyagok alakíthatósági vizsgálata

A dolgozat témájából adódóan az alakíthatósági vizsgálatok bemutatása során a lemezanyag alakíthatóságával foglalkozó vizsgálatokra helyeztem a hangsúlyt. A jellemző vizsgálatok a lemezanyagok mélyhúzási, nyújtva alakítási és hajlítási tulajdonságait írják le.

1.2. r-n vizsgálatok

A lemezanyagok alapvető mechanikai tulajdonságait a szakítóvizsgálatokból származó ún. r-n vizsgálatokkal határozzák meg. Az r érték, amit a képlékenységi anizotrópia tényezőjeként (vagy más néven Lankford-féle számként) ismerünk, valamint az n érték, mint a keményedési kitevő, alapvető mutatószámok, amelyek meghatározzák a lemezanyagok alakíthatóságát.

1.2.1. Képlékenységi anizotrópia tényező: r

Az r érték azt mutatja meg, hogy egy lemez próbatest milyen mértékben változtatja meg a szélességét a vastagságához képest egytengelyű szakítóvizsgálat során:

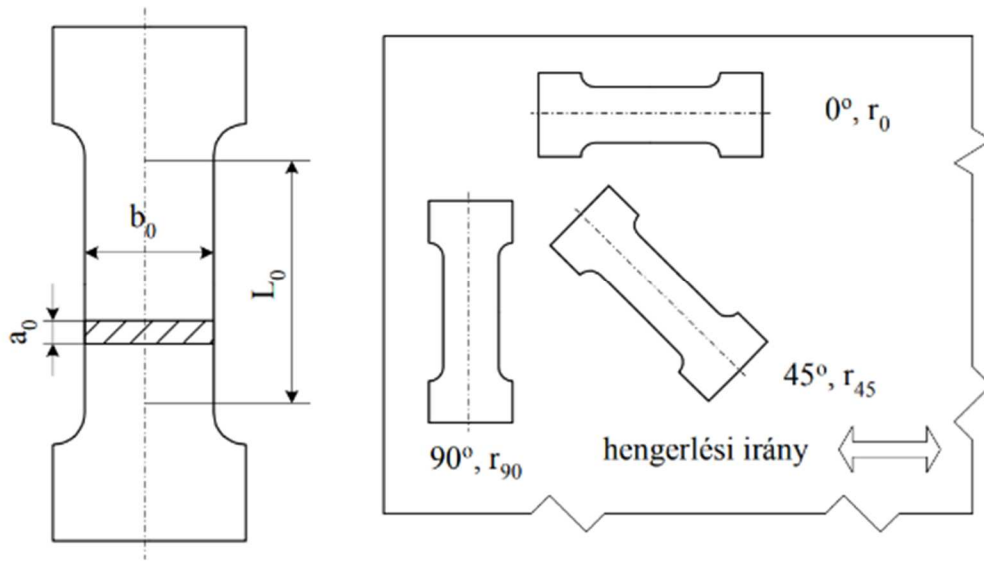
$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad (1)$$

ahol φ_b a lemez szélességi méretének valódi (logaritmikus) alakváltozása, és φ_s a lemez vastagság irányú méretének valódi (logaritmikus) alakváltozása.

$$\varphi_b = \ln \frac{b_0}{b} \quad (2)$$

$$\varphi_s = \ln \frac{s_0}{s} \quad (3)$$

Ebben az összefüggésben „b” és „s” a szakítóerő hatására bekövetkező méretváltozásokat jelentik a szélesség és a vastagság irányában, míg „b₀” és „s₀” a lemez próbatest eredeti méreteit reprezentálják. A „b” és „s” méretek változását az egyenletes nyúlás szakaszában mérjük, közelítőleg a mérnöki alakváltozás, 20%-os alakváltozási mértékének pillanatában. A leggyakrabban használt jeltávolság L₀ = 80 mm. [2] [3]



1. ábrán vizsgálatához használt próbatest geometria méretei és elhelyezése a lemezen [4]

A vékony lemezek vastagságának mérése olyan kihívást jelent, amit a megengedhető mérési hibák miatt nehezen lehet vagy egyáltalán nem lehet megvalósítani. Emiatt a térfogat-állandóság elvéből kiindulva a lemez vastagsága kifejezhető a próbatest hossz- és szélességi méreteinek segítségével.

$$l_0 \cdot b_0 \cdot s_0 = l \cdot b \cdot s \text{ (mm}^3\text{)} \quad (4)$$

$$\frac{s_0}{s} = \frac{l \cdot b}{l_0 \cdot b_0} \quad (5)$$

ahol „l” a megnyúlt hossz, „l₀” pedig az eredeti jeltávolság. És ebből a képlekenységi anizotrópia: [5]

$$r = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{l \cdot b}{l_0 \cdot b_0}} \quad (6)$$

1.2.2. Keményedési kitevő: n

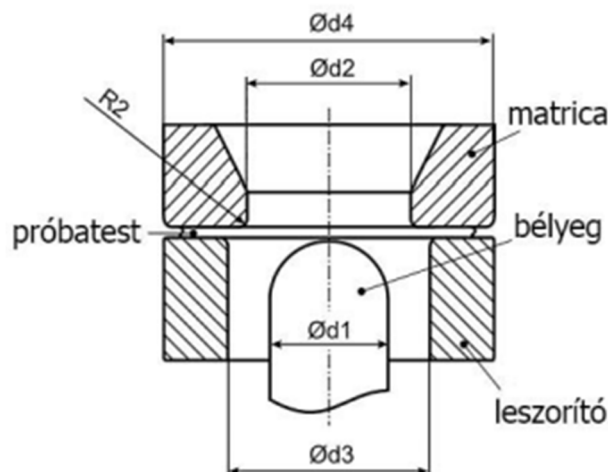
A keményedési kitevő az anyag keményedési képességét meghatározó paraméter. Leggyakrabban a képlékenyalakításra felírt, Nádai-féle keményedési törvényt leíró egyenletben találkozhatunk vele.

$$\sigma = k\varepsilon^n \text{ (MPa)} \quad (7)$$

A képletben szereplő K az anyag keménységi együtthatóját, n a keménységi kitevőt, és ε a tényleges deformációt reprezentálja. A keménységi kitevő értékét ugyanazon szakítóvizsgálattal lehet meghatározni, mint amit a képlékenységi anizotrópia esetében alkalmazunk. A keménységi kitevő értéke közelítőleg megegyezik az egyenletes nyúlás tartozó tényleges nyúlással.

1.3. Erichsen-féle mélyítővizsgálat

A technológiai próbák célja, hogy előidézzék a hideg vagy meleg alakítás során bekövetkező alakváltozásokat. Erőmérés általában nem történik ezeknél a vizsgálatoknál, a próba addig tart, amíg be nem következik a tönkremenetel, vagyis az anyag elreped. A technológiai próbák lényege, hogy meghatározzák azt a maximális alakváltozást, amit az adott anyag elviselhet repedés keletkezése nélkül az alakítás során. Erre a célra használható az Erichsen-féle mélyítő vizsgálat [4][6]. A vizsgálati elrendezést a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra Erichsen-féle mélyítővizsgálat elrendezése [7]

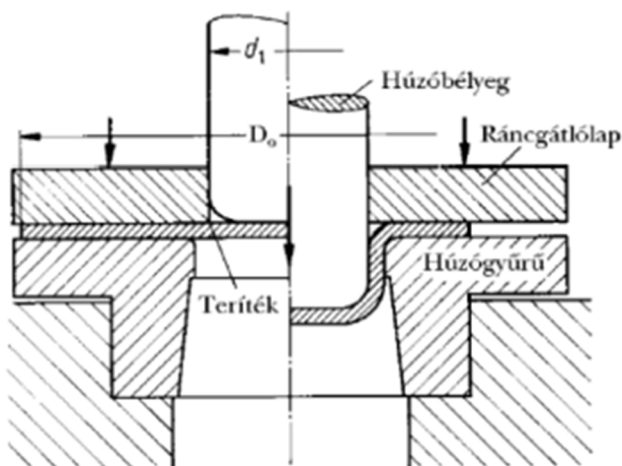
A matrica és a szorítógyűrű közé szorított próbatestet egy gömbvégű bélyeggel terhelik, egészen addig, amíg az anyag elszakad (megreped). A vizsgálat mérőszáma az Erichsen-szám, melyet IE jelöl, és 0,1 mm-es pontossággal kell meghatározni. Ez az érték azt mutatja, hogy milyen hosszú utat tesz meg a bélyeg az anyagon, mielőtt az megreped. Általában 0,2-2 mm vastagságú lemezek vizsgálatára alkalmazzák. A próbatestet a vizsgálat megkezdése

előtt megfelelő kenéssel kell ellátni. Fontos szempont az alakítási sebesség, melyet 5-20 mm/min sebesség tartományban kell végrehajtani. A vizsgálat tehát különböző anyagok alakíthatóságának összehasonlítására használható, ez alapján pedig elmondható, hogy a magasabb IE érték jobb alakíthatóságot jelent. A vizsgálat azonban nem az anyagok mélyhúzhatóságát igyekszik feltérképezni, hiszen az alakítás közben létrejövő feszültségállapot eltér a mélyhúzásnál megfigyelhető feszültségállapottól.

A vizsgálat előnye, hogy viszonylag gyorsan, különösebb mérések nélkül információt kapunk az anyagok alakíthatóságáról, azonban a repedés megjelenésének megítélése szubjektív ezért a mérési eredmények gyakran nagymértékű szórást mutatnak.[4] [8].

1.4. Csészehúzó vizsgálat

Az alakíthatósági vizsgálatok terén ismert eljárás a csészehúzó vizsgálat, amely szorosan kapcsolódik az Erichsen-féle mélyítő vizsgálatához, ugyanis általában egy berendezésen végezhető a két vizsgálati típus. A legfőbb különbség a két vizsgálat között a vizsgálat közben létrejövő feszültségállapot, ugyanis a csészehúzó vizsgálat feszültségállapota megfeleltethető a mélyhúzás során tapasztalt feszültségi állapottal. A két vizsgálat egymáshoz nagyon hasonló, de elvben eltér egymástól és a mérőszámaik között nincs kapcsolat, egymással nem helyettesíthetők. A vizsgálat elvi ábráját a 3. ábra szemlélteti.



3.ábra Csészehúzó vizsgálat elvi vázlata [9]

Vékony lemezek esetében a hidegalakítás során jelentős mértékű képlékeny alakváltozás következik be. A mélyhúzás során síklemez szerű próbatestet alakítunk az aktív szerszámelemek segítségével és a végeredmény egy csészeszerű alkatrész lesz. A próbatest palástja nyújtó, míg a fenékrész nyomó igénybevételnek van kitéve. A vizsgálat egy kör alakú, 3 mm-nél nem vastagabb lemezen alkalmazható. Az eljárás során egy D átmérőjű

lemezt húznak mélyhúzással egy d átmérőjű bélyeggel egy lépésben, ahol a lemez vastagsága lényegében nem változik [4]. A vizsgálat mérőszáma az egy húzásból csészévé alakítható tárcsa átmérője, melyet IG számként ismerünk. Ha a csésze nem bírja el a mélyhúzást, akkor fenékszakadás következhet be, ami azt jelenti, hogy az adott átmérő már nem alkalmas az alakításra. Ahogy a korábbi eljárásnál, itt is fontos a lemez mindkét felületének megfelelő kenése. Ezenkívül kritikus paraméter a ráncgátló gyűrűt terhelő erő meghatározása, melynek szerepe az, hogy megakadályozza a lemez ráncosodását és a mélyhúzás során a még be nem húzott lemez szakadását

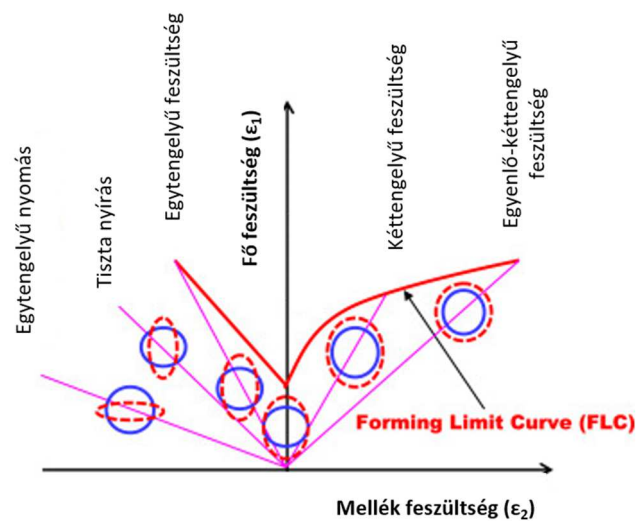
1.5. Nakazima vizsgálat

A Nakazima vizsgálat az egyik legelterjedtebb vizsgálati módszer, amellyel fel tudjuk térképezni az anyagok úgynevezett alakítási határdiagramját. (Forming Limit Diagram-FLD)

Az alakítási határdiagrammok leírják, hogy különböző feszültségállapotokban milyen mértékű alakváltozás szükséges ahhoz, hogy a vizsgált anyag tönkremenetelt érjen el. Az alakváltozási állapotot a síkban értelmezett főalakváltozásokkal (ε_1 , ε_2) jellemezzük, és az általuk alkotott koordináta rendszerben jelöljük a tönkremenetelt. Az így kapott tönkremeneteli pontok egy görbével leírhatók, amelyet az angol elnevezése alapján FLC-nek (Forming Limit Curve) vagy alakítási határgörbének nevezünk. Az így kapott görbével meg tudjuk határozni az alakítás során azt a biztonságos tartományt, ahol az alakítás a tönkremenetel veszélye nélkül elvégezhető, illetve azt a kritikus zónát, ahol a tönkremenetel vélhetően be fog következni.

A kísérletet megelőzően a vizsgálandó próbatest felületére olyan mérőhálót visznek fel, amellyel az alakítás közben bekövetkező nyúlások megfigyelhetők. A mérőhálót jellemzően négyzetek vagy körök alkotják melyek az alakítás következtében téglalapokká, ellipszisekké torzulnak a fő és mellék-alakváltozások következtében. Ezt követően a torzult alakzatok mérésével leírható a lemez alakváltozása. [10][11]

Amint az 4.ábrán látható, az alakítási határdiagram felvételéhez legalább öt különböző geometriájú próbatest szükséges ahhoz, hogy a teljes sík-alakváltozási tartományt (egytengelyű nyúlás-egytengelyű zömülés, egytengelyű nyúlás, és kéttengelyű nyúlás) le tudjuk fedni. A különböző alakú próbatestek lehetővé teszik, hogy a nyúlásra és zömítésre egyaránt jellemző alakváltozási utakat megvizsgáljuk anélkül, hogy a szerszámgeometriát megváltoztatnánk.



5. ábra Lemezalkításra érvényes alakíthatósági határdiagram [12]

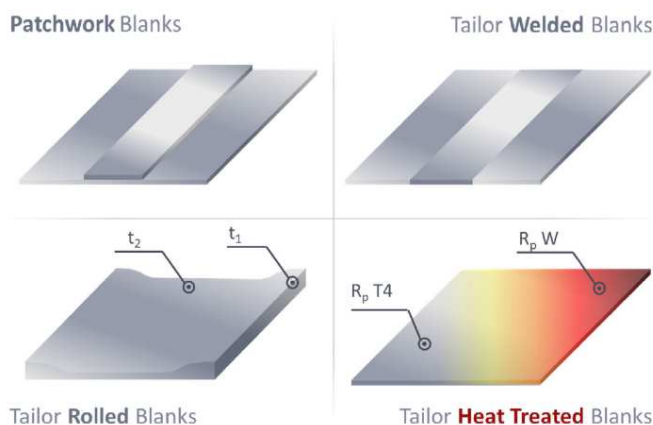
2. Különböző tulajdonságokkal rendelkező lemezekből összeállított lemezterítékek

Ebben a fejezetben a különböző karakterisztikával rendelkező, méretre szabott és különböző kötéstechnológiával összekapcsolt lemezterítékeket mutatom be, azaz – az angol elnevezéséből adódóan - a Tailor lemezterítékeket. (Tailored Blanks-TB) A TB-k a járműiparban terjedtek el leginkább ugyanis a karosszéria elemeket több viszonylag kisebb előgyártott lemezalkatrészből állítják össze. A nagyméretű elemek egyszerre történő préselése csökkenti a szerszám- és gépköltségeket. A kis elemek külön gyártásának elhagyásával a gyártási pontosság is javítható, mivel elkerülhető a tűrések kumulatív hatása.

A méretre szabott lemezek olyan félkész termékek, amelyek tulajdonságait helyileg meghatározzák az őket felépítő elemek, például különböző anyagok, anyagtulajdonságok, bevonatok és lemezvastagságok alapján. Ezek a termékek későbbi felhasználásra optimalizálhatók. Ezáltal előnyt jelent, hogy a terítékek egyes részei készülhetnek nagyobb szilárdságú, ezáltal nagyobb merevséget biztosító vagy éppen korrózió álló bevonattal ellátott lemezekből.[13]

Megkülönböztetünk, olyan lemezterítékek

- amelyeket hegesztés útján készítenek különböző minőségű, vastagságú és bevonatú lemezanyagokból. (Tailor Welded Blanks -TWB)
- ahol lokálisan erősítjük meg lemezeket (Patchwork Blanks - PB)
- amelyeket különböző vastagságú lemezek hengerléses eljárással és folyamatos átmenettel történő összeillesztése révén állítanak elő. (Tailor Rolled Blanks - TRB)
- és olyanokat melyeknél hőkezeléssel, lokálisan megváltoztatjuk az anyagtulajdonságokat (Tailor Heat Treated Blanks - THTB)



5.ábra Tailor lemezek csoportosítása [13]

Az TB-k terjedésének fő okát a gépjárművek fokozott tömegnövekedése idézte elő az elmúlt évtizedben. A járművek karosszériája egyre nagyobbá és bonyolultabbá vált, az elektronikai eszközök felhasználása bővült. A gépjárművek tömegnövekedésének kompenzálására egy eszköz a karosszéria tömegének csökkentése. Ezt úgy érik el, hogy csak a nagy igénybevételnek kitett területeken alkalmaznak olyan anyagokat, melyek nagy szilárdságúak vagy vastagságúak.

A TB-k elterjedése azzal kezdődött, hogy különböző anyagú és vastagságú lemezeket hegesztettek össze. Később megjelent a helyi szilárdság növelését célzó hegesztéses és ragasztós foltozás (patchwork), valamint a hengerlés során történő, folyamatos lemezvastagság-átmenettel történő egyesítés technológiája, különböző vastagságú lemezek alkalmazásakor. Ezen fejlesztések mellett párhuzamosan fejlődött a TB-k lokális hőkezelése is.

A súlycsökkentés terén előre mutatóak a TWB-k és TRB-k, mivel nem szükséges erősítő lemez használata. Azonban a foltozási módszer fejlesztése előre lendítette a gyártási folyamat integritását, mivel az alap- és erősítő lemezeket egyesítés után formálják egy szerszámban. A nagyszilárdságú acél és alumínium anyagok korlátozott alkalmazása abból fakad, hogy alakíthatóságuk korlátozott. Ennek ellenére a lokális hőkezelések alkalmazásával növelhető az alakíthatóság, így olyan karosszériaelemekhez is alkalmazhatók, melyek nagy alakváltozásokat szenvednek el. Ezen felül a TB-k alkalmazásával nem csupán a súly csökkenthető, hanem a törési szilárdság is javítható. [13]

2.1. Méretre szabott, hegesztett lemezterítékek (TWB-k) áttekintése

Ahogy az az előző fejezetben részleteztem a TWB-k tehát különböző karakterisztikájú, méretre vágott és valamilyen hegesztési módszerrel összekapcsolt lemezterítékek. Az egyik legnagyobb kihívást jelentő feladat az ilyen jellegű lemezeknél a képlékenyalakítás jelenti, amit a hegesztési varrat megléte okoz. Számos tanulmány született a hegesztési varrat és annak környezetének feltérképezésére különböző alakítási eljárások hatására.[14][15]

A TWB-k múltja egészen 1964-re nyúlik vissza, amikor is megszületett az első szabvány a lemezterítékek gyártására vonatkozóan. Ezt követően Európában, a Volvo épített be először TWB-ket saját járműveikbe. A technológia hajnalán a lemezterítékeket ellenállás hegesztéssel, később indukciós tompahegesztéssel kapcsolták össze a hatékonyság és bonyolultság növelése érdekében. Azonban a lézertechnológia elterjedésével gyorsan

kiváltotta az előzőekben említett technológiákat és manapság a TWB-k 99%-ban lézerhegesztéssel készülnek. A hegesztési folyamat általában CO_2 gázlézerrel vagy szilárdtestes, $Nd:YAG$ lézerrel történik, védőgáznak pedig He , Ar vagy a két gáz keverékét szokás használni. A védőgáz jelentősen befolyásolja a varrat minőségét, hatással van a beolvadási mélységre ez pedig szoros összefüggésben áll azzal, hogy a szakítással vagy Erichsen tesztekkel mérhető alakíthatóság milyen mértékű. Ennek kapcsán természetesen kutatások is születtek amelyek a különböző paraméterek hatását vizsgálták a hegesztési varrat minőségére vonatkozóan. Ahmed et al. [16] azt találta, hogy a nagyobb He tartalom elősegíti a beolvadást, és az áramlási sebességének növelésével csökkenthető a varrat szélessége.

2.2. TWB-k alakíthatósága

A hegesztett lemez mechanikai tulajdonságainak megértéséhez szükséges az adott hegesztési varrat tulajdonságainak ismerete. Azonban a termék jellemzőit további tényezők is befolyásolhatják, mint például a hegesztési varrat és a hengerlés vagy a főterhelés közötti irány, a lemezek vastagságának aránya, vagy a hozaganyag százalékos mennyisége a varratban.[13]

Az acélok esetében a keménység növekedése a szén (C) tartalmától és a hegesztési eljárástól függ. Ennek oka, hogy kisebb szemcseméret figyelhető meg az eredetihez képest, ami a mikroszerkezetben öntött struktúrához hasonló. A hőhatás övezetében gyakran magasabb a keménység, ami a szilárdsági tulajdonságok növekedésével és az alakíthatóság csökkenésével jár, ami egy megszokott tendencia. Nagyszilárdságú acélok esetében a keménység maximuma nem a hegesztési varratban, hanem a hőhatás övezetben érhető el. [16][17]

3. Végeselem módszer használata a lemezalakításban

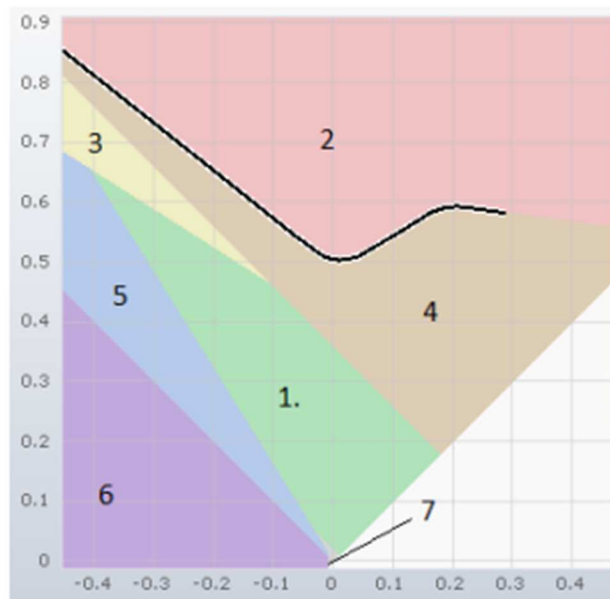
Az informatika gyors fejlődése lehetővé tette bonyolult modellezések és gyors számítások végrehajtását, valamint az eredmények azonnali értékelését. Az iparban elérhető több végeselemes módszert alkalmazó szoftver teszi lehetővé mindezt anélkül, hogy a szoftverbe épített bonyolult matematikai egyenleteket és összefüggéseket ismernénk. Ezek a felhasználóbarát szoftverek megkönnyítik és hatékonyabbá teszik a mérnökök számára a munkavégzést. Ezek a szoftverek kulcsfontosságúak az autóipartól az űrkutatásig terjedő széles skálán, mivel segítenek a gyors tervezésben és a gazdaságos megoldások megtalálásában. Jelenleg a legkorszerűbb szoftverek állnak a mérnökök rendelkezésére, amelyekkel virtuális környezetben lehet szimulálni a különböző lemezalakítási műveleteket. [5][18]

Ezekben a szoftverekben nagyszerűen lehet modellezni a lemezalakításra jellemző mélyhúzási, hajlítási, sajtolási folyamatokat, ezáltal nem csak a technológia tervezésben, hanem a szimulációkban is segítséget nyújtanak. A szimulációkból kapott eredmények kiértékelésére is számtalan lehetőség van, a főbb paraméterek, mint az alakításhoz szükséges erő, megnyúlás, súrlódás mellett komplexebb anyagmodellek megalkotásában is segítséget nyújt. Ebből kifolyólag az alakíthatóság jellemzésére szolgáló FLD, és hozzá tartozó FLC is meghatározható. A végeselemes (VEM) szoftverek nagy előnye, hogy a szimulációkból kapott eredmények a lefutást követően az alakítási folyamat bármelyik időpillanatában megállíthatók és leolvashatók az adott időpillanathoz tartozó eredmények. Így a VEM szoftverek költséghatékony és időtakarékos megoldást kínálnak a valóságban elvégzett tesztekkel szemben.

A következőkben az általam használt végeselemes szoftvert mutatom be röviden.

3.1. Autoform R7

Az AutoForm R7 ma egyike a legmodernebb végeselemes szoftvereknek, mely a lemezalakítás területén széles körben alkalmazható. A szoftver több területen is támogatást nyújt a mérnöki munkában, például alkatrésztervezés, folyamattervezés, szerszámtervezés és technológiatervezés terén. A szoftver lehetőséget biztosít különféle geometriák importálásra, ezáltal elősegítve a valósághű szimulációs környezet létrehozását. A tervezés során egymást követő fázisokon keresztül vezet végig a szoftver majd ez után tudjuk elvégezni a szimulációt, és a kiértékelést. A korábban említett kiértékelési lehetőségek közül a számomra legfontosabb az FLD- volt amit a 6.ábra szemléltet.



6.ábra FLD és jellegzetes területei az AutoForm szoftverben

A 6.ábrán látható számozott és különböző színnel megjelölt területek az alakítás szempontjából fontos tartományokat jelölnek. Az 1. jelű terület a biztonságos alakítás tartományát jelöli, ahol vélhetően tönkremenetel nélkül végezhetünk alakítást. A 2. terület az FLC görbe felett ezzel ellentétben a szakadási, törési tartomány, ahol a tönkremenetel bekövetkezik. A 3. jelzésű terület a szakadás szempontjából kritikus, míg a 4. jelű a túlzott elvékonyodás szempontjából veszélyes. Az 5. terület a nyomó igénybevételeket, a 6-os pedig a ráncosodás bekövetkezését vetíti elő. A 7. terület, amely a diagrammon alig látható, az elégtelen alakváltozáshoz tartozik. A felsorolt területek segítenek nyomon követni a szakadáson kívüli tönkremeneteli módokat is.

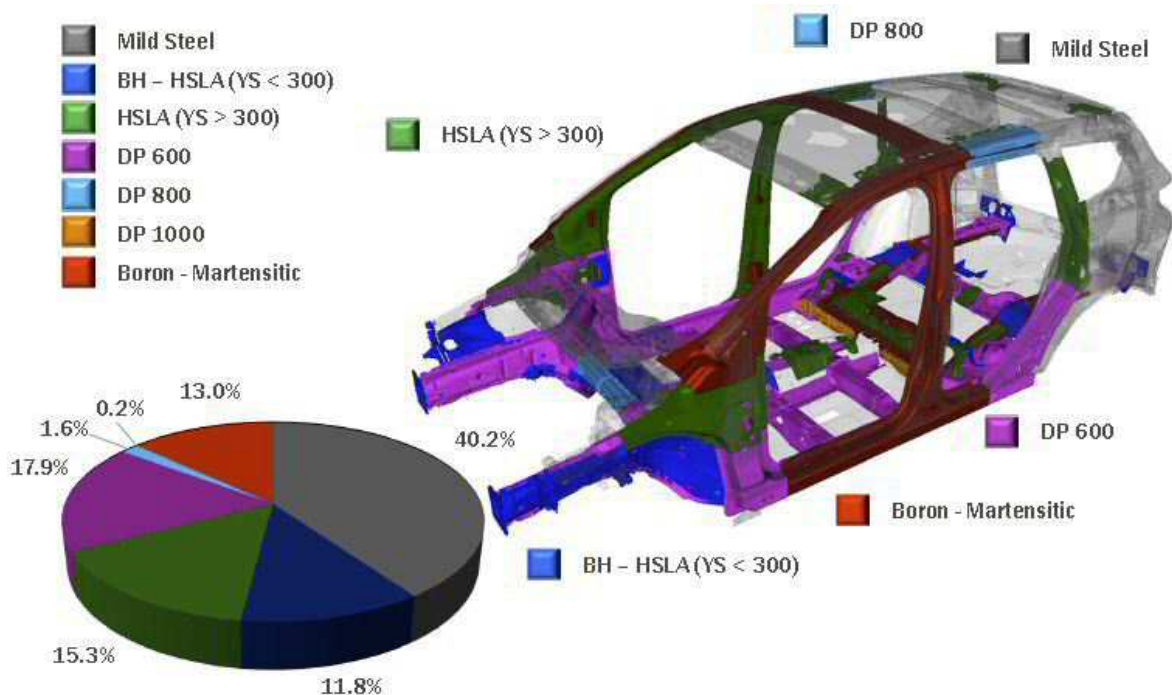
A szoftver leggyakoribb alkalmazási területe a szerszámgyártás és tervezés. Ebben az összefüggésben az a feladata, hogy szerszámokat és technológiákat tervezzenek meglévő alkatrészek geometriájához, ezáltal optimalizálva a végső geometriát a lehető legköltséghatékonyabb módon. Ugyanakkor a szoftver alkalmazható technológiai próbák modellezésére is. Ilyen esetekben, ahol nincs előre ismert alkatrész geometria - mivel nem lehet pontosan megjósolni, hogy mekkora változások következnek be az anyagban a formázás során - a szoftver lehetővé teszi a vizsgáló berendezés szerszám modelljének importálását és egy teríték lemez meghatározását a szimulációhoz. Tehát a szoftver által kínált lehetőségek alkalmazhatók a meglévő technológiák esetében is.

4. Nakazima vizsgálat TWB lemezeken

A dolgozatomban különböző anyagpárosítású és geometriájú méretre szabott lézerhegesztett lemezek alakítási határdiagramját határozom meg szimulációs módszerrel és ezek között összefüggéseket határozok meg.

4.1. Anyagok

Az kísérlet tárgyának választott hagyományos és növeltszilárdságú anyagok nagy mennyiségben megtalálhatók az autóiparban. Ennek oka általában jó alakíthatósági képesség ezáltal kiváló megmunkálhatóság vagy a magas szilárdság, amely a járműre vonatkozó szilárdsági követelmények teljesítését segíti elő. A 7.ábra az autókarosszériában megtalálható lágy, és növelt szilárdságú acélokat szemlélteti százalékos eloszlásban.



7.ábra Lágy és növeltszilárdságú acélok százalékos eloszlása az autókarosszériában [19]

4.1.1. Alacsony széntartalmú acélok

Az anyagpárosítások egyik résztvevőjének mindig egy alacsony széntartalmú acélt, a DC04-et választottam.

A DC04 hidegen hengerelt, alacsony széntartalmú acél, ami elsősorban megmunkálhatóságával és jó formázhatóságával jellemezhető. A hideghengerlés továbbá jó felületi minőséget és dimenziós pontosságot jelent. Az alacsony széntartalom lehetővé teszi az acél könnyű megmunkálhatóságát és formázhatóságát. Ezáltal könnyen hegeszthető és hajlítható. Az ilyen acél, főként olyan alkalmazásokhoz ajánlott, ahol a könnyű

megmunkálhatóság és a jó hajlíthatóság fontosabb, mint a nagy szilárdság. Építőiparban, járműgyártásban és háztartási gépekben gyakran alkalmazzák, ahol a megfelelő mechanikai tulajdonságok és formázhatóság a kulcsfontosságú szempont.

Fontos megjegyezni, hogy az acél konkrét jellemzői és alkalmazása függ a gyártótól, az előírásoktól és a végfelhasználási céltól. A DC04 acél egy általánosan használt típus és különböző gyártók eltérő specifikációkat alkalmazhatnak.

4.1.2. Növelt szilárdságú acélok

Második generációs, növelt szilárdságú acélnak tekinthetők az úgynevezett DP (Dual Phase) acélok. Ezeket az acélokat az autóiparban előszeretettel alkalmazzák (7.ábra), ezek közül a DP600, DP1000 anyagminőségű jelöléssel ellátott anyagokat választottam.

A DP acélok legnagyobb előnye a szövetszerkezetükben rejlik, ugyanis alkotói elemei a lágy ferrit, amely jó alakíthatóságot biztosított, illetve a kemény a martenzit szemcsék, amelyek a nagy szilárdságért felelnek. Az anyag jellemző tulajdonságai a ferrit-martenzit szövetaránytól, valamint a martenzit szigetek alakjától és eloszlásától egyaránt függenek. A különböző típusok kiemelkedő szakítószilárdsággal rendelkeznek, ugyanakkor nincs meghatározott folyáshatáruk. A szövetszerkezetben a martenzit jellemzően 5-30%-ban jelen, de a kiemelten magas szakítószilárdsággal rendelkező anyagoknál akár a 40%-ot is elérheti.[20][21]

Az ilyen típusú nagyszilárdságú, de még optimális mértékben alakítható acélok olyan lehetőséget biztosítanak, amely lehetővé teszi a gépjárművek ütközésekor bekövetkező károsodás mértékének csökkenését anélkül, hogy a gépjármű tömegét jelentős mértékben növelnénk.

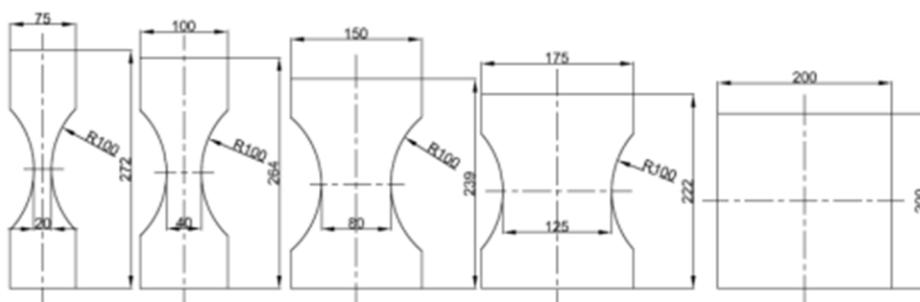
4.1.3. A vizsgált anyagok jellemzőinek meghatározása

Az alakítási határdiagram előzetes meghatározása előtt érdemes az anyag főbb jellemzőit egyszerű szakítóvizsgálattal beazonosítani, mely meglehetősen pontos eredményeket nyújt. Ez azért szükséges, mert később, az AutoForm R7 szoftverrendszer segítségével tervezem elvégezni a Nakazima vizsgálatot, vagyis ennek szimulációját. Ehhez pedig az anyagot jól jellemző bemeneti adatokra van szükségem, hogy a lehető legpontosabb eredményeket kapjam.

4.2. Próbadarabok

A próbadarabok geometriájának megválasztásakor a Nakazima vizsgálat során használt négyzetes próbatest kialakítást használtam különböző hídszélességekkel, (20-200mm)

hogy az alakítási határdiagram (FLD) és alakítási határgörbe (FLC) teljes mértékben meghatározható legyen. A különböző próbatest kialakítások – feszültségállapotok – eredménye, hogy a szakadás helye nem állandó, bizonyos mértékben eltérő helyeken fogjuk tapasztalni a tönkremenetelt. A használt próbatest geometriákat a 8.ábra mutatja be.



8.ábra Nakazima vizsgálathoz használt próbatest geometriák [5]

4.3. Vizsgálati körülmények

A Nakazima vizsgálatot laboratóriumi és szimulációs környezetben is elvégeztem. A szimulációs környezetben végzett tesztek az előzőekben említettek alapján hatékonyabb módon tették lehetővé a vizsgálatokat ugyanis az eredmények kiértékelése rövidebb időt vett igénybe. A laboratóriumi tesztek eredményeit a szimulációs eredmények validálásra használtam.

4.3.1. Nakazima vizsgálat a laboratóriumban

Az alakváltozási értékek és alakítási határdiagrammok meghatározásához a kecskeméti Neumann János Egyetem Innovatív Járművek és Anyagok tanszékén található univerzális lemezalakító berendezését, egy Erichsen 142 típusú gépet és a hozzá kapcsolódó Vialux In-Process 4 kamerás kiértékelő rendszert használtam. A berendezés nagy előnye, hogy három különböző, szabványos lemezalakító próbán keresztül végezhetők el vizsgálatok, melyek rendre az úgynevezett Erichsen-teszt, Swift-féle mélyhúzóhatósági próba és az általam használt Nakazima-féle mélyíthetőségi vizsgálat. A berendezéshez kapcsolódó 4 kamerás kiértékelő rendszer pedig akár folyamat közben digitális képkorreláció elvén működve képes detektálni a vizsgálat során lezajló alakváltozásokat. A berendezést és a hozzá tartozó kamerarendszert a 9.ábra mutatja be.



9.ábra Erichsen univerzális lemezvizsgáló berendezés

a.) Próbatestek előkészítése

Az optikai mérőrendszer képalkotásához azonban szükséges valamilyen geometriai háló felvitele a vizsgálni kívánt lemez felületére. Ennek köszönhetően képes a szoftver követni az egységnyi geometriai alakzatok alakváltozását. A háló alapvetően bármilyen szabályos geometriai elemből állhat, azonban esetemben a hálómegválasztás során a négyzetes hálót választottam. A felvitt háló fontos, hogy jól detektálható és tartós legyen, azaz a vizsgálat végéig, és későbbi kiértékeléséig fennmaradjon. Ennek megfelelően elektro-kémiai úton történő hálófelvitelt alkalmaztam, amely amellet szól, hogy nagyon szabályos hálót eredményez és a megfelelő paraméterek megválasztása mellett jól is detektálható.

b.) Alakítás és képrögzítés

Miután a kamera rendszert megfelelő pozícióba helyeztük, szükséges az eszköz kalibrációja, hogy a képek és mérések pontosak legyenek. Ehhez a kamerához mellékelt kalibrációs egység áll rendelkezésre, amelyen koncentrikus fehér alakzatok vannak elhelyezve. Ezek a mintázatok meghatározott helyeken vannak, és a kalibráció során a kamera ezek alapján azonosítja be a különböző pozíciókat, távolságokat és a megfelelő fénybeállításokat a pontos eredmények érdekében.

Ezután behelyeztem a hálóval ellátott, rácsos mintázatú próbatesteket, a legnagyobb hídszélességtől kezdve, egyesével a lemezvizsgáló gép szerszámába. Az alakító bélyeg és a

próbatestek között kenést (fólia és kenőanyag) alkalmaztam, hogy a keletkező szakadás valószínűsíthetően a próbatest közepénél történjen.

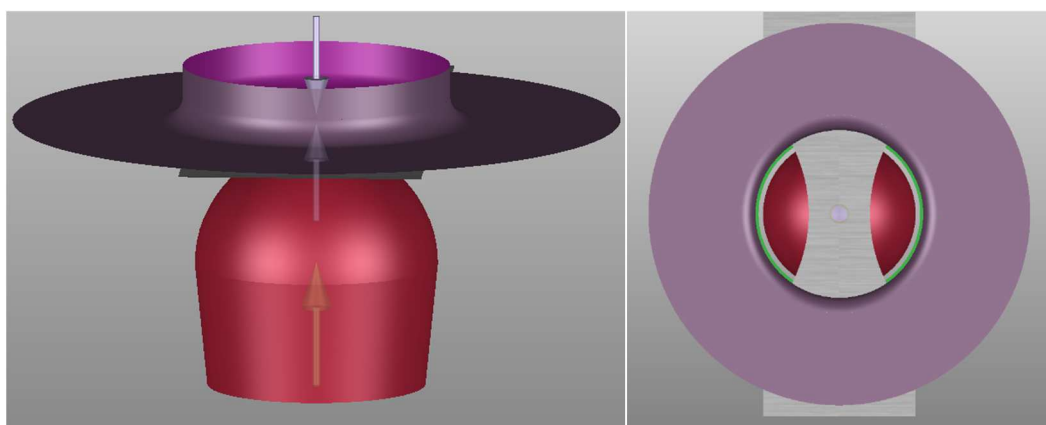
A képrögzítést manuálisan a lemezvizsgáló berendezésével egyidejűleg kezdtem el és a vizsgálat végét a szakadás megjelenése (húzási erőszükséglet lecsökkenése) jelentette. Ezáltal a teljes alakítási folyamat során lejátszódó alakváltozás rendelkezésemre állt, így a kiértékelésnél a számomra megfelelő időpillanatot könnyedén ki tudtam választani.

c.) Kiértékelés

A kiértékelés során olyan paraméterek mérését választottam, amelyek mind a laborkörnyezetben mind a szimulációs környezetben megtalálhatók és mérhetők. Ezek esetében az alakítás során felvett erő-út diagram értékei és az alakváltozás, illetve annak eloszlásának értékei voltak.

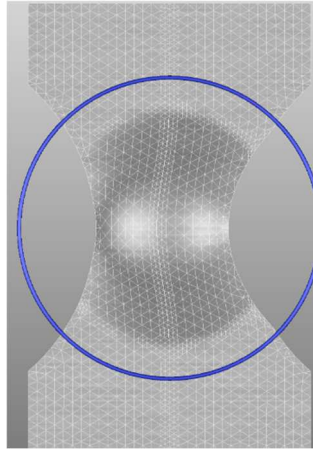
4.3.2. Nakazima vizsgálat modellezése az Autoform szoftverben

A laboratóriumi vizsgálatok előkészülete, elvégzése és kiértékelése jelentősen több időt vesz igénybe, mint a végesselemes szoftverek által nyújtott szimulációs környezetben elvégzett teszteké. A minél pontosabb eredmények elérése érdekében azonban szükség van arra, hogy a teszthez használt bemeneti paraméterek, mint például az anyagok folyásgörbéje, anizotrópia tényezője, mechanikai tulajdonságai megegyezzenek a valóságban használt anyag tulajdonságaival. Továbbá az is fontos, hogy az alakító szerszámok geometriája a szimulációs környezetben megegyezzen a laboratóriumi körülmények között használt berendezés szerszámgeometriáival. Az alakítószerszám geometriája és elrendezése a 10. ábrán látható.



10. ábra alakítószerszámok elrendezése az Autoform szoftverben

Az ábrázolásban a leszorítógyűrű nem jelenik meg, ugyanis ezt külön menüpontban kell beállítani a szoftverben. A húzógyűrű átmérője 160 mm, vastagsága pedig 15 mm. A húzógyűrűt a 11. ábra mutatja be.



11.ábra Húzógyűrű helyzete

Az előzetesen szakítóvizsgálattal meghatározott anyagtulajdonságok fontos bemeneti paraméterei a szimulációs szoftvernek. A vizsgált anyagok folyásgörbe adatait az 1. és 2. táblázat foglalja össze

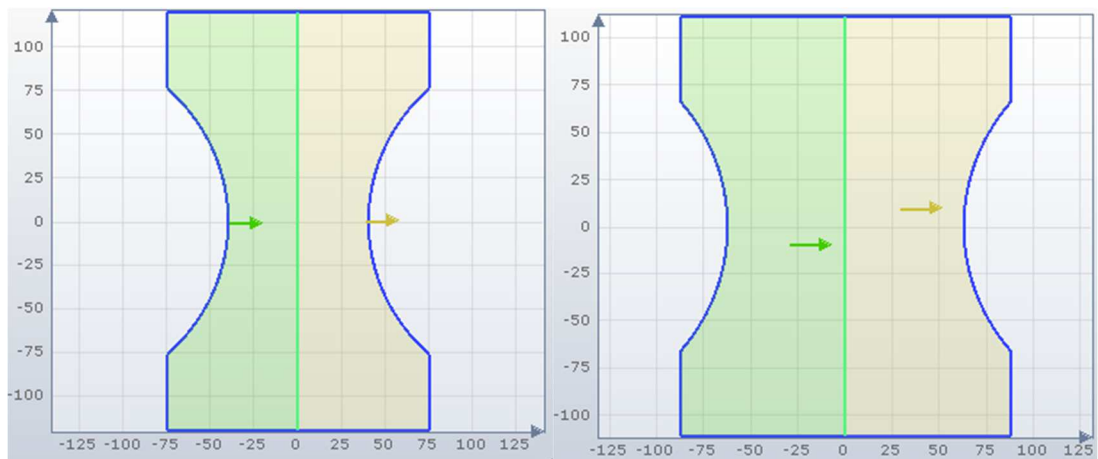
		Folyásgörbe								
		Swift			Hockett-Sherby					
Anyag	s (mm)	ϵ_0	m	C (MPa)	σ_i (MPa)	σ_{sat} (MPa)	a	p	σ_0 (MPa)	R_m (MPa)
DC04	1	0,017	0,22	578	229	456	8.6	0,812	234,8	343
DP600	1	0,001	0,098	1578	788	1160	102	0,785	798,4	1122
DP1000	1	0,004	0,16	1044	448	780	21	0,812	443	668,9

1.táblázat Felhasznált anyagok mért értékei

	Yield surface					FLC	
	Barlat					Arcelor V9	
	r_0	r_{45}	r_{90}	M	r_m	$A_{G,90}$ (%)	$R_{m,90}$ (MPa)
Anyag							
DC04	1,82	1,31	2,38	6	1,71	20,5	325
DP600	0,73	0,894	0,828	6	0,837	6,3	1111
DP1000	0,865	0,929	0,941	6	0,916	12,5	669

2.táblázat Felhasznált anyagok mért értékei

A táblázatos adatokban is megjelenő r értékek a párosított anyagok anizotrópiájára utalnak. A hengerlési irányt minden esetben a hegesztési varratra merőlegesen választottam meg. Ezt mutatja a 12.ábra.



12. Hengerlési irány a hegesztési varrathoz képest a különböző próbadarabokon

A szimuláció során a szerszám-próbadarab közti Coulomb-féle súrlódási értéket 0,05-re vettem, az alakító bélyeg útját pedig 70 mm-re választottam. A hálózás során az elem méretet 6 és 0,09 mm közötti értékre választottam, amely 1000-2000 db.-os elemszámot jelent a próbadarabok geometriájától függően.

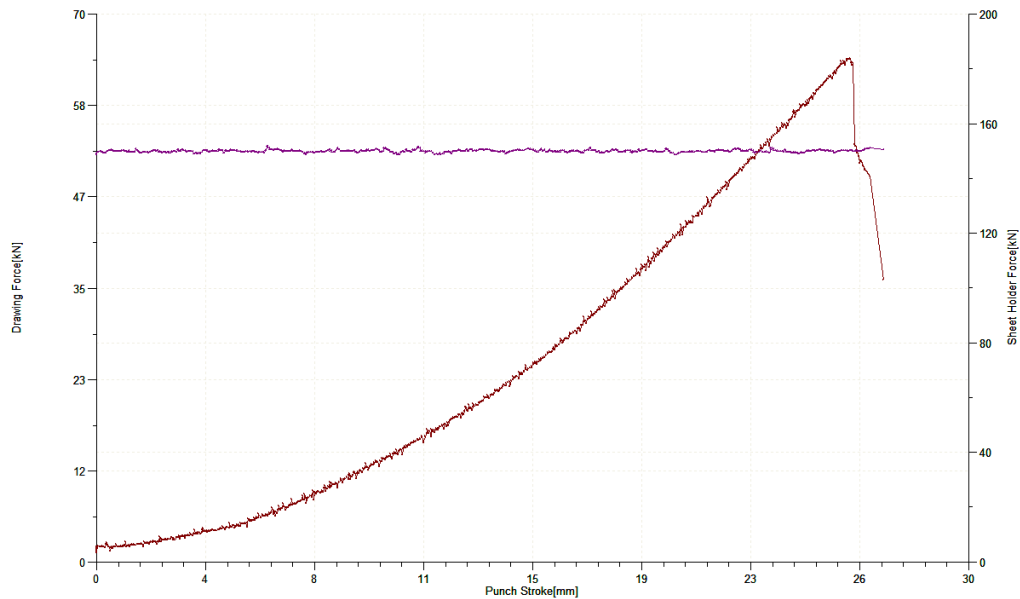
A legnagyobb hídszélességű próbatestből kiindulva az FLD jobb oldali tartományát írtam le. A laboratóriumi vizsgálathoz összhangban, öt különböző próbatestre készítettem szimulációt, a legnagyobbtól a legkisebb, 20 mm hídszélességű próbatestig, amely az FLD bal oldalát eredményezi.

A kiértékelés szakaszában számomra az anyagpárosítások FLD-jének vizsgálata volt a fő cél.

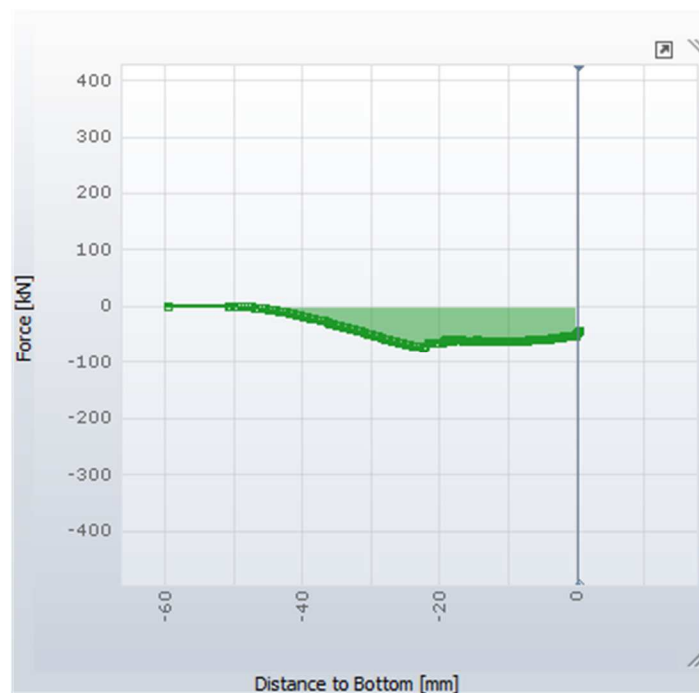
5. Eredmények

5.1. Nakazima vizsgálat eredményei laborkörülmények között

A laborkörülmények között mért adatok célja a szimulációk validálása volt. Ehhez el kellett végezni a Nakazima-féle mélyhúzhatósági tesztet és az alakváltozási értékek meghatározása után összehasonlítottam a kapott eredményeket a szimulációs környezetben kapott eredményekkel.



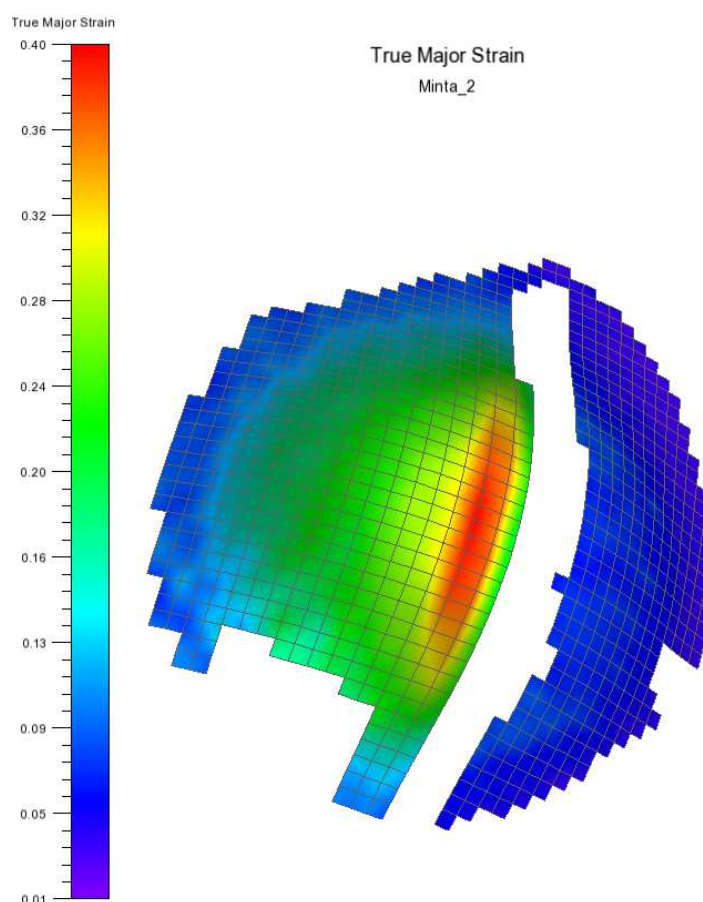
13.ábra DP1000, 200-as hídszélességű próbadarab erő-út diagramja (labor)



14.ábra DP1000, 200-as hídszélességű próbadarab erő-út diagramja (szimuláció)

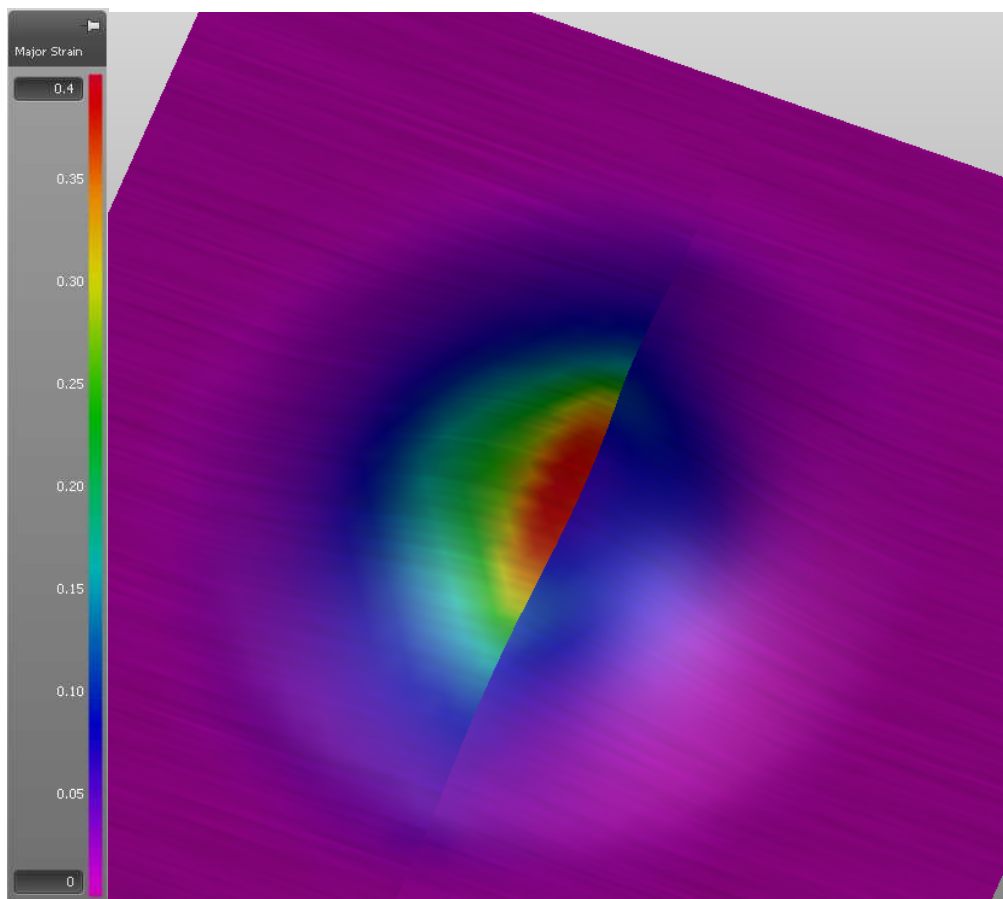
A labor (13.ábra) és a szimulációs (14.ábra) környezetben mért erő-út diagramokból jól látható, hogy közel azonosak. Az diagramon a maximum erő elérése után a további eredményeket nem veszem figyelembe ugyanis ezután következik be a tönkremenetel. A tönkremenetel után felvett adatok nem tekinthetők valós eredményeknek. Az erő maximum értékei mindkét esetben közel azonosak, 70-75kN nagyságúak.

Az erő-út diagramok összehasonlítása után az alakváltozási tartományt hasonlítom össze. A képeken látható próbadarabok mindkét esetben a tönkremenetel előtti pillanatot mutatják be. A 15. ábra a laborkörülmények között alakított próbadarab alakváltozását mutatja be.



15.ábra DP1000 anyagminőségű 200-as hídszélességű próbadarab alakváltozási tartománya (laborkörülmények között alakított)

A szimulációs környezetben vizsgált próbadarab alakváltozási tartományát a 16.ábra mutatja be.



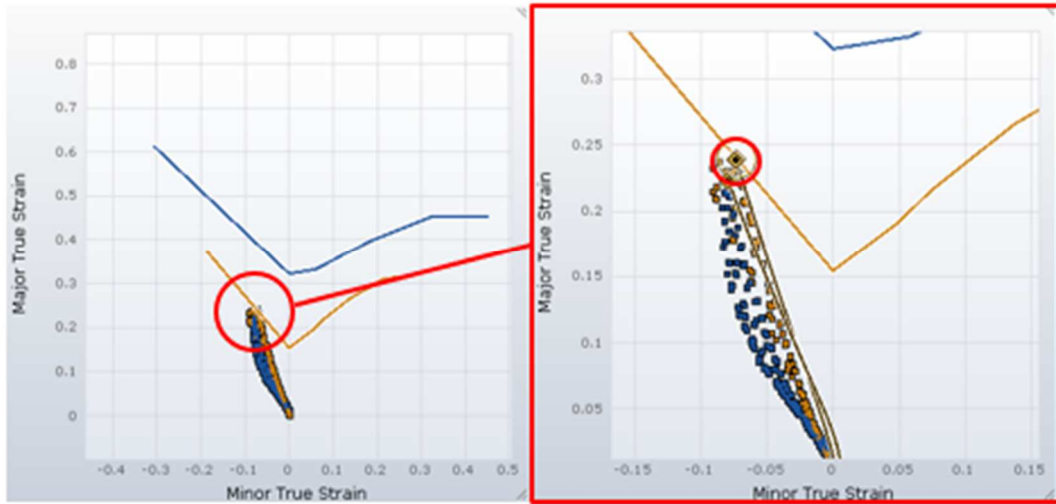
16.ábra DP1000 anyagminőségű 200-as hídszélességű próbadarab alakváltozási tartománya (szimulációs környezetben alakított)

A kapott eredmények összehasonlítása után megállapítható, hogy közel azonosak, ugyanis az alakváltozási mező értéke mindkét esetben 0-tól 0.4-ig terjed. Amely arra enged következtetni, hogy a labor és szimulációs környezetben végzett vizsgálatok további eredményei megfeleltethetők egymásnak.

5.2. Nakazima vizsgálat eredményei szimulációs környezetben.

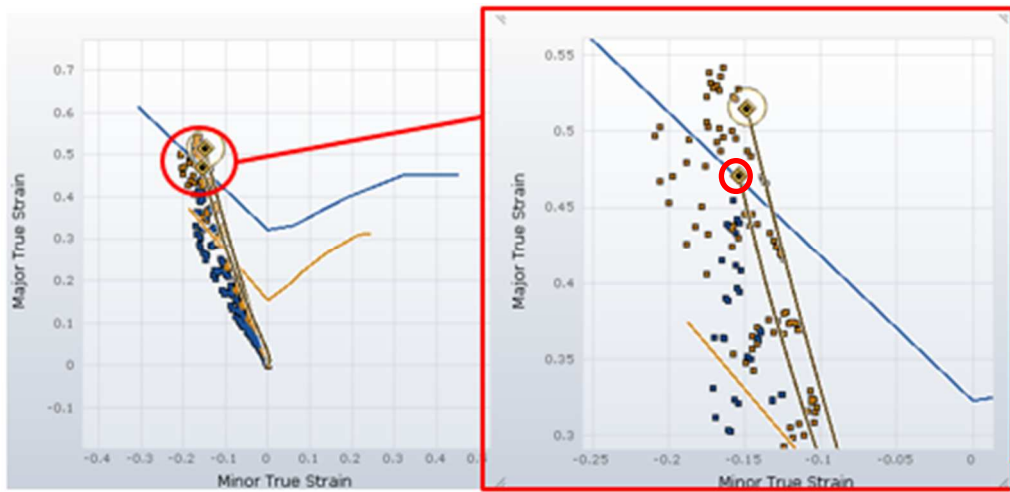
Az eredmények kiértékelése során a különböző anyagpárosítások alakítási határdiagramját vizsgáltam. Az összefüggések keresése során a különböző anyagpárosítások egymásra ható viselkedését vizsgáltam abból a szempontból, hogy a szilárdságkülönbségek miképpen befolyásolják az anyagok alakítási határdiagramját.

A meghatározás során első lépésként azt vizsgáltam, hogy melyik anyag ér el tönkremenetelt, azaz mikor éri el saját alakítási határdiagramját. Nevezzük ezt a pontot „A” anyag kritikus pontjának (A_{CP}). Ezt a 17.ábra mutatja be, ahol az ábrán a különböző színekhez különböző anyagok és FLC-k tartoznak.



17.ábra Tönkremenetel elérése és A_{CP} meghatározása

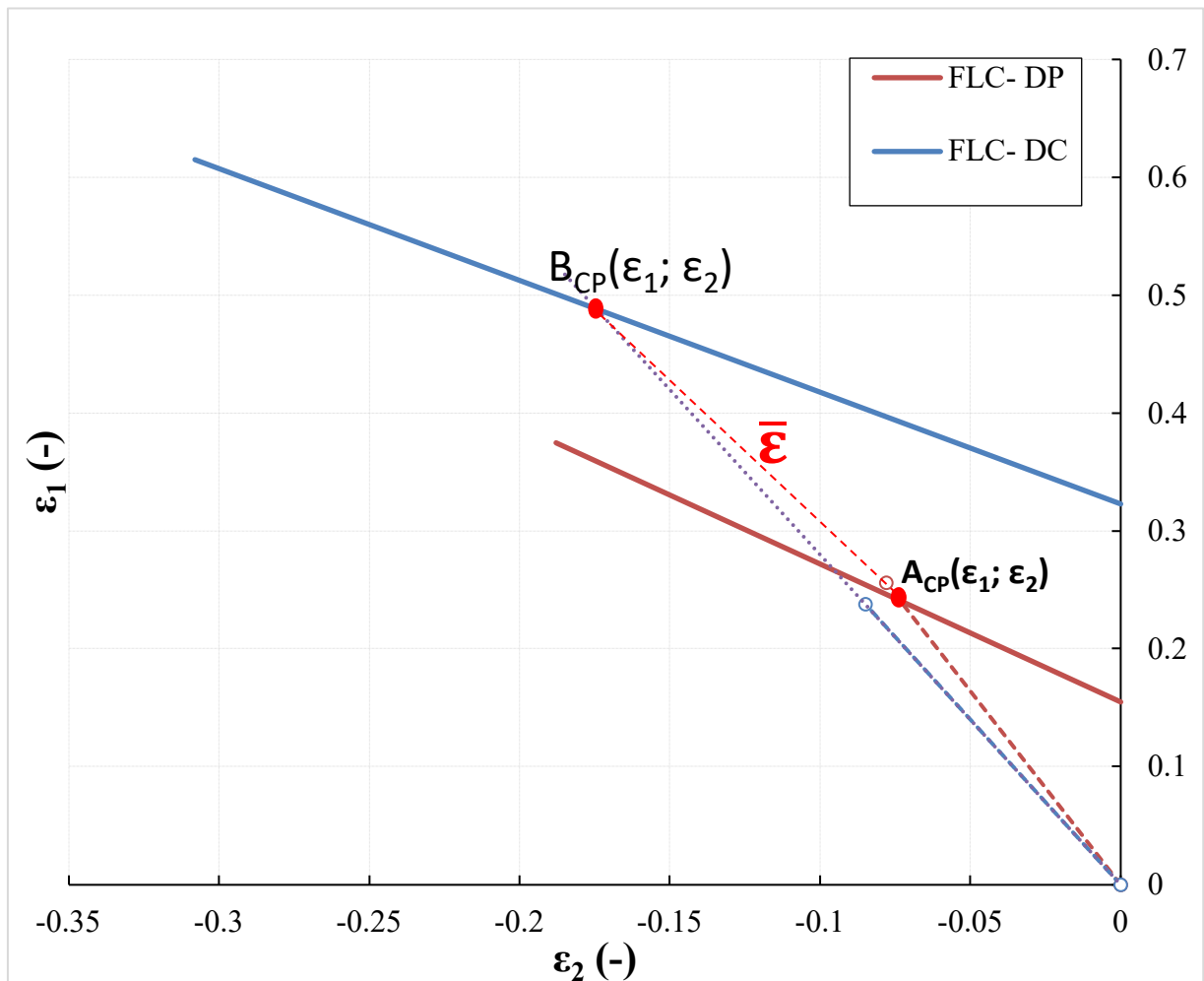
Amint „A” anyag elérte a saját alakítási határdiagramját, meghatároztam „B” anyag addig elért alakváltozásából következtetve az alakváltozási útját. Ezután következtettem arra, hogy „B” anyag hol érne el saját alakítási határdiagramját. (B_{CP}) Ezt mutatja be a 18.ábra.



18.ábra Alakváltozási út és B_{CP} meghatározása

Majd kiszámoltam A_{CP} és B_{CP} főalakváltozásainak (ϵ_1, ϵ_2) különbségeit és ebből meghatároztam az egyenértékű alakváltozást. (Eq.7) Ezt mutatja be a 19.ábra.

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} * (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)} \quad (7)$$



19.ábra „A” és „B” anyag párosítása következtében maradó alakváltozási tartalék

Ezt az egyenértékű alakváltozást tekintem az „A” -„B” anyagpárosításban a „B” anyagban maradó alakváltozási tartaléknak, amely alatt azt a tartalékot értem, amely alakváltozásra megközelítőleg a „B” anyag még képes lenne.

Miután meghatároztam a vizsgálati módszert elvégeztem, a szimulációt az összes anyagpárosítás-geometria párosra és kiértékeltem az eredményeket. Ezeket az eredményeket a 3.táblázat foglalja össze:

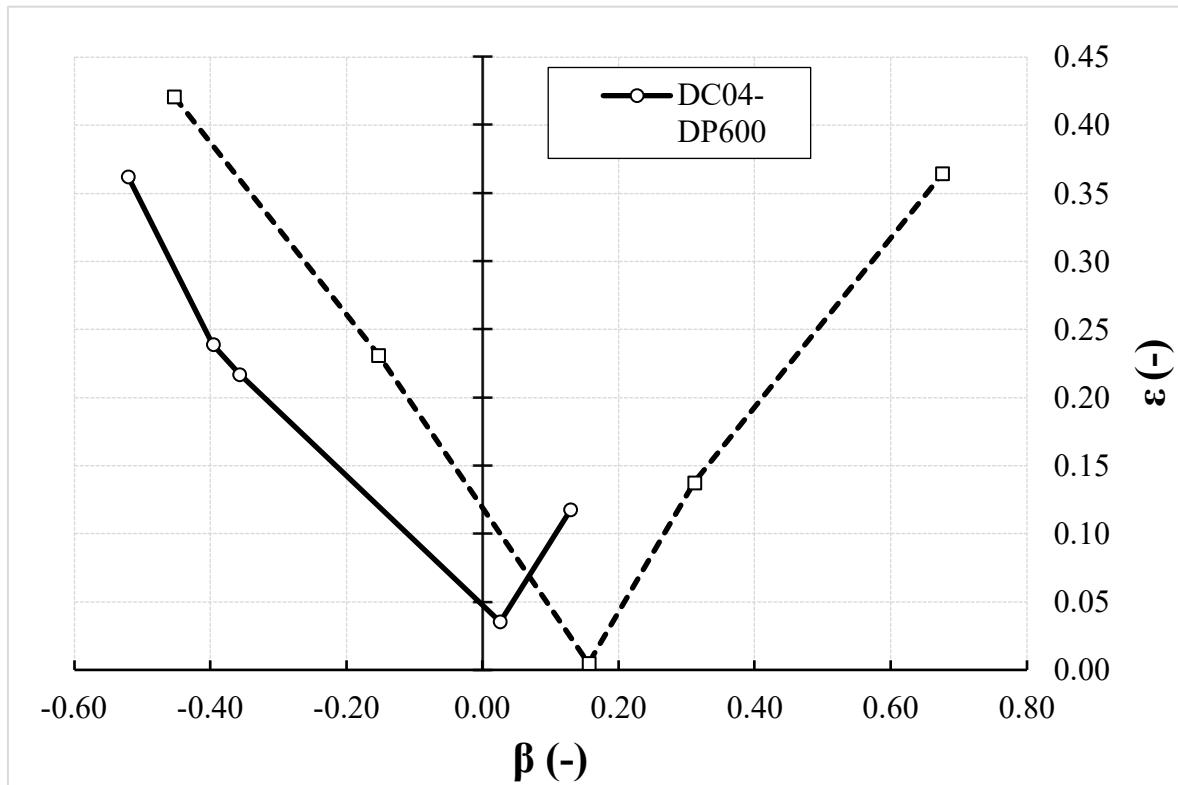
Alakváltozási tartalék ($\bar{\epsilon}$)					
	Hídszélesség (mm)				
Anyagpárosítás	20	40	80	125	200
DC04-DP600	0,362	0,217	0,118	0,239	0,035*
DC04-DP1000	0,421	0,231	0,364	0,138	0,005

3.táblázat alakváltozási tartalék értéke

Miután meghatároztam az egyes geometriákhoz tartozó alakváltozási tartalékokat célszerűnek láttam, ha az egyes geometriákat a feszültségállapotukat jellemző, alakváltozások arányával írom le. (Eq.8)

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (8)$$

A kapott eredményeket a β értéktől függően növekvő sorrendbe diagramba rendeztem a hozzájuk tartozó alakváltozási értékkel. Ezek értékeit a 3.táblázat és a 20.ábra szemlélteti.



20.ábra alakváltozási tartalék a β függvényében

A diagramon jól látható, hogy a két anyagpárosításhoz tartozó görbe jellege hasonló és a mért értékek is közel azonosak.

6. Konklúzió

A kapott eredmények alapján tehát megállapítható, hogy az alakváltozási tartalék mérése során az FLC-hez hasonló görbéket kaptam. A görbe jól mutatja, hogy az alakváltozási tartalék sík alakváltozási állapotban a legkisebb, amely egyben azt is jelenti, hogy a két anyag alakváltozási képességének kihasználása közel maximális. A síkalakváltozási állapottól távolodva, pozitív és negatív irányban is az látszódik, hogy az alakváltozási tartalék mértéke jelentős mértékben növekszik. Ez azt jelenti, hogy amikor az egyik anyag eléri az alakváltozási képességének a maximumát, azaz az FLC görbét, az anyagpárosítás következtében a másik anyagban jelentős alakváltozási képesség marad kihasználatlanul. Ez optimális lehet, ha növelni akarjuk a biztonsági tényezőt, azonban rontja az anyagfelhasználás hatékonyságát, ha az alkatrész célját olcsóbb/kisebb szilárdságú anyaggal is el tudnánk érni.

A mért eredmények arra engednek következtetni, hogy a különböző anyagpárosítások hatással vannak az anyagban maradó alakváltozási képességre. Ezt befolyásolhatja az anyagok közötti szilárdságkülönbség, illetve az anyagok geometriája is. A kutatásom jelenlegi állapotában nem tekintem befejezettnek, a kapott eredményeket és összefüggéseket tovább javíthatja, ha a meghatározott vizsgálati módszer alapján további anyagpárosításokat vizsgálok. Ezek alapján következő lépésnek a két növeltszilárdságú anyag szilárdsága alapján egy közöttük elhelyezkedő anyagot szeretnék vizsgálni. Később az újonnan elvégzett tesztekől levont következtetések meghatározhatnak egyéb irányokat is a vizsgálati metódus terén.

Kutatásom folytatásának céljaként az anyagpárosítások optimumra való törekvését jelölöm ki a megfelelő anyagkihasználás szempontjából.

Összefoglalás

A dolgozat megírása során a legfőbb szándékom az volt, hogy alaposan megismerjem a járműkarosszéria építéséhez használt acéllemezeket, és ne csak a könyvekből és szakfolyóiratokból származó információkra támaszkodjak, hanem saját kísérleteimet is felhasználva testközelből tapasztaljam meg ezeket a tulajdonságokat.

Irodalomkutatást végeztem a hagyományos és nagyszilárdságú acéllemezek témakörében, amelyeket a járműiparban előszeretettel alkalmaznak. Ezt a tudást a jövőben az említett anyagok és kutatási irányok még részletesebb megismerésére szeretném felhasználni.

Bemutattam a lemezalakítás gyakorlatában gyakran előforduló anyagvizsgálati és alakíthatósági vizsgálatokat, amelyek egy részét később a gyakorlatban alkalmaztam is és a kutatásom egy szakaszán fel is használtam a belőlük származó mérési eredményeket.

Az előzetesen meghatározott kutatási irányhoz szükségem volt egy hatékony módszerre, amely lehetővé tette, hogy a különböző anyagpárosítások és geometriákból adódó kombinációk eredményeit vizsgáljam. Ezért a vizsgálatokat egy részét végelelemes szoftverben végeztem el. Bemutattam az általam használt végelelemes szoftver legalapvetőbb funkciót és ismertettem a használatából származó előnyöket.

A szimulációk validálásához, gyakorlatban elvégzett tesztekre volt szükségem. Ennek következtében bemutattam az általam használt berendezést és annak alapvető működési módszerét és az ehhez szükséges előkészületeket.

Az eredmények prezentálása során levezettem az általam meghatározott vizsgálati módszerét és elvégeztem azt az összes anyagpárosítás-geometria esetében. Ezeket az eredményeket végül egy általam meghatározott keretrendszerbe foglalva levontam a következtetéseket.

A kutatásom konklúziója, hogy a meghatározott vizsgálati módszer alkalmas arra, hogy az anyagpárokból maradó alakváltozási tartalékot egy módon meghatározzam, azonban ahhoz, hogy egy árnyaltabb képet kapjak az eredményeim helyességéről és további következtetéseket tudjak levonni ki kell bővítenem az általam használt anyagpárosítások számát és folytatnom kell a kutatást.

Ábrajegyzék

1.ábrar-n vizsgálatához használt próbatest geometria méretei és elhelyezése a lemezen [4]..	9
2.ábra Erichsen-féle mélyítővizsgálat elrendezése [7].....	10
3.ábra Csészehúzó vizsgálat elvi vázlata [9]	11
5. ábra Lemezalakításra érvényes alakíthatósági határdiagram [12]	13
5.ábra Tailor lemezek csoportosítása [13]	14
6.ábra FLD és jellegzetes területei az AutoForm szoftverben	18
7.ábra Lágú és növeltszilárdságú acélok százalékos eloszlása az autókarosszériában [19] ..	19
8.ábra Nakazima vizsgálatához használt próbatest geometriák [5].....	21
9.ábra Erichsen univerzális lemezvizsgáló berendezés	22
10.ábra alakítószerszámok elrendezése az Autoform szoftverben	23
11.ábra Húzógyűrű helyzete.....	24
12.Hengerlési irány a hegesztési varrathoz képest a különböző próbadarabokon	25
13.ábra DP1000, 200-as hídszélességű próbadarab erő-út diagramja (labor).....	26
14.ábra DP1000, 200-as hídszélességű próbadarab erő-út diagramja (szimuláció).....	26
15.ábra DP1000 anyagminőségű 200-as hídszélességű próbadarab alakváltozási tartománya (laborkörülmények között alakított)	27
16.ábra DP1000 anyagminőségű 200-as hídszélességű próbadarab alakváltozási tartománya (szimulációs környezetben alakított)	28
17.ábra Tönkremenetel elérése és A_{CP} meghatározása	29
18.ábra Alakváltozási út és B_{CP} meghatározása	29
19.ábra „A” és „B” anyag párosítása következtében maradó alakváltozási tartalék.....	30
20.ábra alakváltozási tartalék a β függvényében	31

Irodalomjegyzék

- [1] Tisza M., Kovács P. Z.: Új próbatestkiakítás alakítási határgörbe (FLC)
- [2] meghatározásához, GÉP, LXIII. évfolyam, 2012, 11. szám.
- [3] R. Pearce: 4000 years of sheet metal forming, Formability of Metallic Materials – 2000 A.D., ASTM Special Technical Publication 753, (1982.) pp. 3-18
- [4] Tisza Miklós: Anyagvizsgálat, Miskolci Egyetemi Kiadó (2010)
- [5] Tisza M., Gál I., Baán M., Biró Gy., Lukács J., Merkes M., Nagy Gy.: Anyagvizsgálat, Miskolci Egyetemi Kiadó, 2001, p. 130-276. ISBN 963661 452 0
- [6] Béres G., Hareancz F., Weltsch Z.: Korszerű lemezanyagok mechanikai vizsgálata, Gradus Vol 4, No 2, ISSN 2064-8014, 2017
- [7] Zorkóczy B.: Metallográfia és anyagvizsgálat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1971, p. 443.
- [8] A. Kocańda, C. Jasiński: Extended evaluation of Erichsen cupping test results by means of laser speckle, Warsaw University of Technology, Faculty of Production Engineering, Department of Metal Forming and Foundry, 2015
- [9] dr. Horváth L.: Mélyhúzás lemezanyagai és minősítési módszereik, Oktatási segédlet, Óbudai Egyetem, 2009
- [10] Bertók Á., Gonda V., Széll K.: Mélyhúzás végeselemes modellezésének technológiai és elméleti felhasználása, XXIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, 2018. Kolozsvár, 51-54
- [11] Kovács Péter Zoltán: Alakítási határdiagramok elméleti és kísérleti elemzése, Ph.D. értekezés, Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola, Miskolc 2012
- [12] Tisza Miklós, Gál Gaszton, Kiss Antal, Kovács Péter Zoltán, Lukács Zsolt: Nagyszilárdságú lemezanyagok alakíthatósága, Tanulmány, készül a TÁMOP-4.2.2.A-11/1 KONV-2012-0029 Járműipari anyagfejlesztések project keretében, Miskolc 2013
- [13] Surajit Kumar Paul, Controlling factors of forming limit curve: A review, Advances in Industrial and Manufacturing Engineering Volume 2, May 2021, 100033
- [14] M. Merklein, M. Johannes, M. Lechner, A. Kuppert: A review on tailored blanks – Production, applications and evaluation, Journal of Material Processing Technology (2014) pp. 151-164
- [15] M. A. Ahmetoglu, D. Brouwres, L. Shulkin, L. Taupin, G. L. Kinzel, T. Altan: Deep drawing of round cups from tailor-welded blanks, Journal of Material Processing Technology (1995) pp. 684-696
- [16] M. Abbasi, S. R. Hamzeloo, M. Ketabchi, M. A. Shafaat, B. Bagheri: Analytical method for prediction of weld line movement during stretch forming of tailor-welded blanks. International Journal of Advanced
- [17] E. Ahmed, O. Mokrov, M. Schleser, U. Reisgen: Shielding gas influences on laser weldability of tailored blanks of advanced automotive steels, Applied Surface Science (2010) 1401-1406

- [18] K. Chung, W. Lee, D. Kim, J. Kim, K-H Chung, C. Kim, K. Okamoto, R. H. Wagoner: Macro-performance evaluation of friction stir welded automotive tailor-welded blank sheets: Part I – Material properties, *International Journal of Solids and Structures* (2010) pp. 1048-1062
- [19] Sreenath D K., Dr. J. J.V Jeyasingh, Amjith T.R: Development of Nakazima Test Simulation Tool for Forming Limit Diagram Generation of Aluminium Alloys, *IJESTA*, ISSN No. 2395-0900, 2015
- [20] <https://www.dierk-raabe.com/dual-phase-steels/> Megtekintve. 2023.11.10
- [21] Golovanenko Sz. A., Fonstein N. M.:Dvuhfáznie ferritno-martenszítznüe sztali, *Metallovedenie i termiceszkaja obrabotka metallov* (1984) 11. 25-28 (GTT 1986/3 XXVI 33-42 old.)
- [22] Z.K. Teng, X.M.Chen: Edge cracking mechanism in two dual-phase advanced high strength steels, *Materials Science&Engineering A* 618 (2014) pp. 645–653
- [23] Z.Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu: *Mechanics of sheet metal forming*, Elsevier Science Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, ISBB 0 7506 5300 0