

**MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA**



**JÁRMŰIPARI VÉKONYLEMEZEK ALAKÍTHATÓSÁGÁNAK
VIZSGÁLATA**

PhD értekezés tézis füzete

Készítette:

Béres Gábor József

Témavezetők:

Prof. Dr. Tisza Miklós

a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

Dr. Weltsch Zoltán

PhD, egyetemi docens

Miskolc

2020

Bíráló bizottság

Elnök	Prof. Dr. Lukács János CSc, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem
Pótelnök	Dr. Marosné Prof. Dr. habil Berkes Mária PhD, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem
Titkár	Dr. Gáspár Marcell PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem
Tagok	Dr. Kovács Péter Zoltán PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem Prof. Dr. Tóth László DSc, ny. egyetemi tanár, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Dr. Danyi József CSc, ny. főiskolai tanár, Neumann János Egyetem
Póttagok	Dr. Koncsik Zsuzsanna PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem Dr. Lukács Zsolt PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem Prof. Dr. Szabó Péter DSc, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki Egyetem Dr. Mankovits Tamás PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem
Bírálok	Prof. Dr. Czinege Imre CSc, professor emeritus, Széchenyi István Egyetem Dr. Lukács Zsolt PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem
Pótbírálok	Dr. Danyi József CSc, ny. főiskolai tanár, Neumann János Egyetem Dr. Kovács Péter Zoltán PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem

1. A célkitűzés és a kutatómunka rövid leírása

1.1 A kutatási téma rövid bemutatása

Napjainkban, a fejlett országok gazdaságában, a különböző feldolgozó iparágak anyag- és energiafelhasználásának csökkentésére irányuló globális fejlesztési törekvések egyértelműen megfigyelhetők. Bizonyos területeken, például a járműiparban, törvényi szabályozások is születtek a közelmúltban, amelyek a felhasznált anyagok mennyiségének és/vagy tömegének csökkentésén keresztül a járművek teljes tömegének csökkentését, és ezzel a járművek kevesebb üzemanyag fogyasztását, valamint kisebb károsanyag kibocsátását szorgalmazzák. Ez, a teljes járműre vonatkozó tömegcsökkentés, többek között a járművek karosszériájának fejlesztése révén érhető el, a vékonyabb lemezek felhasználásával. Egyrészt tehát, a karosszériaanyagok szakadatlan fejlesztése és az új, korszerű, nagyszilárdságú lemezanyagok megjelenése sarkalja a lemezalakítás szakterületét ma is a folyamatos megújulásra. Másrészt, mivel a járművek vázszerkezetét felépítő alkatrészek (karosszériaelemek, alváz, tartó oszlopok, futóműkeret, stb.) az esetek legnagyobb többségében lemezalakítás révén nyerik el végső alakjukat, tulajdonságaikat, így az alakadási műveleteknek, mint az alakító szerszámok terheléséből származó reakcióknak és egyben az anyagok alakváltozási jellemzőinek pontos ismerete, minden kétséget kizáróan, önmagában is szükséges a lemezalakítás tudományának, iparának műveléséhez.

Munkám során kísérleti vizsgálatokat végeztem az alakíthatóság minél széleskörűbb tanulmányozására és elméleti módszerekkel is tanulmányoztam három, korszerű, nagyszilárdságú (DP600, DP800 és DP1000) és egy hidegen hengerelt lemezanyag alakítástechnológiai viselkedését. Az eredményeket több esetben numerikus szimulációkkal is kiegészítettem. Megfigyeléseim elsősorban a vékonylemezek mechanikai tulajdonságaira, folyásgörbéire illetve különböző tönkremeneteli eseteire (lokális befűződésükre, ráncosodásukra), pontosabban azok előre becslési eljárásaira vonatkoztak, de a geometriai nem-megfelelőségnek számító visszaruhozás terén is bővebb elemzéseket folytattam. A következő bekezdésekben, ezeknek a jelenségeknek a tömör bemutatására törekedtem.

A szerkezeti anyagok fejlődése a járműiparban az anyagtudományi kutatások előre haladtával vált jelentőssé. A tömegcsökkentési törekvések új, fejlett nagy- és ultranagy szilárdságú acélok megjelenését hívták életre. Korábbi [1] és naprakész kutatási eredmények [2] azt mutatják, hogy ezekkel az acélokkal a kisebb falvastagság és azáltal a járműszerkezetek tömegének csökkentése elérhető a korábbival megegyező, sőt, sokszor még nagyobb szerkezeti merevség és utasbiztonság megtartása mellett is. Mi több, jelentős üzemanyag fogyasztás és károsanyag kibocsátás csökkenés is kíséri az alkalmazásukat. Az ún. kettős fázisú (dual phase - DP) acélok a fejlett nagyszilárdságú acélok családjának, jellemző kétfázisú (kettős szövetelemű) tagjai. Elterjedten használatosak a járműiparban a nagy szilárdságuk és az ahhoz tartozó meglehetősen jó alakíthatóságuk miatt. Ezen acélok felhasználása a karosszéria építésben meghaladta az 50%-ot egy az ULSAB-

AVC (ultra light steel auto body – advanced vehicle concept) konzorcium 2011-es adatai szerint [3]. Ezáltal, ezeknek az anyagoknak a képlékenységi kutatásai ma is aktuális témának számítanak a képlékenyalakító közösségben.

Egy anyag képlékenységi (alakíthatósági) viselkedése elsősorban annak hidegalakítási keményedési jellemzésével illetve anyagtvörvényével írható le, a tönkremeneteli kritériumokkal kiegészítve. A keményedési törvényt a folyásgörbe fejezi ki, amely tehát egy fontos jellemzője az alakváltozáson átéső anyagoknak. Napjaink véges elemes (finite element - FE) programjai is kiemelet szerepet szánanak a folyásgörbének, amelyek leírása különböző közelítési módszerekkel lehetséges. A disszertációban elsődlegesen felhasznált mechanikai modellek a Nádai [4], a Ludwik [5], a Swift [5], a Voce [6], és a Hockett-Sherby [7] egyenletek voltak. A különböző egyenletek sokszínűsége a fémek képlékeny alakváltozásának összetett mivoltával magyarázható és pontosan ez a komplexitás az oka annak, hogy a képlékeny alakváltozás során lejátszódó mikroszerkezeti folyamatok még mélyebb megértése és azok mechanikai modellekhez történő csatolása, napjainkban is kiemelet kutatási terület.

A tönkremeneteli kritériumok terén, bár a présüzemi gyártás során számos anyagi és geometriai jellegű hiba keletkezhet, a legfontosabb tönkremeneteli módokat a (i) lemezanyag lokális elvékonyodása, esetleg szakadása, továbbá (ii) ráncosodása, vagy (iii) visszarugózása [8] jelenti.

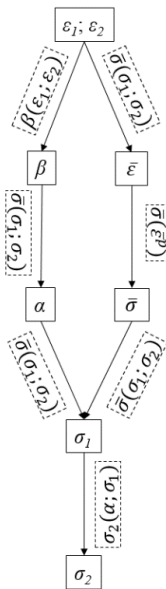
A lokális elvékonyodás (vagy befűződés vagy nyakképződés), mint leggyakoribb hibaok kutatása az 1950-es évekig nyúlik vissza. Nem sokkal később Keeler fektette le az az alakítási határdiagramok (forming limit diagram - FLD) alapját a '60-as években [9], a lemezek felületére felvitt mérőháló torzulásának megfigyelésével; ennek segítségével egy határalakváltozási görbét ábrázolt síkbeli húzó feszültségi állapotban, azaz az ($\varepsilon_2=0$) határértéktől a tisztán kéttengelyű nyúlás tartományáig ($\varepsilon_2=\varepsilon_1$). A negatív ténegyedre való kiterjesztést Goodwin tette meg 1968-ban [10]. A lokális nyakképződést jelentő határalakváltozások fizikai tanulmányozásával bár sok kutatás foglalkozott az elmúlt évtizedekben, csak kevés eredmény található ezen határállapotnak a feszültség-alapokon történő megadására. Stoughton és Zhu [11] publikálta a feszültség-alapú határdiagram alapegyenleteit, de például Levy és Tyne [12] már egy ettől eltérő elméleti megközelítést dolgozott ki, a szakítóvizsgálatok eredményeiből történő feszültség-alapú határgörbe felvételére.

A ráncosodás szempontjából az alkatrész pereme a legkritikusabb rész a préselés vagy a mélyhúzás során. Itt ébred a legnagyobb tangenciális nyomófeszültség ($-\sigma_2$) a bélyegről a terítékre átadódó radiális húzás (σ_1) következtében. Ebben, a sokszor bonyolult feszültségi állapotban képes a ráncosodás kialakulni a terítékre ható feszültségek nagyságának és a geometriai jellemzőknek a függvényében. Általában kétféle módszert különböztetünk meg a ráncképződés leírására: az energia-alapú megközelítést [13], amely nyomójellegű instabilitásként kezeli a ráncosodást; és az úgynevezett 'bifurcation' módszert [14] (elterjedt magyar megfelelője még nem alakult ki), amely a differenciálegyenletek egyik családját alkalmazva közelíti a ráncosodási kritériumot. Közös jellemzőjük, hogy egyik módszer analitikus

megoldásából nyerhető eredmények sem teremtenek közvetlen kapcsolatot a ráncosodás és a ráncgátló szerszám visszatartó energiája között. Wang és Cao [15] elmélete hidalja át ezt a problémát, amelyben a hivatkozott kutatók a kihajlást elszenvedő lemez és a tisztán a síkjában deformálódó lemez alakváltozási energiáinak összevetéséből jutottak eredményre.

A visszarugózás megközelítésekor abból érdemes kiindulni, hogy egy sík lemez egyenes vonal mentén történő meghajlítása bár hétköznapi alakító műveletnek tűnik, de az alakváltozási állapot mind időben, mind térben folyamatosan változik még a legegyszerűbb esetekben is. Néhány, lemezalakítással foglalkozó hangsúlyos irodalom (mint pl. Marciniak, Duncan és Hu [16], Kurt Lange [17], Altan és Tekkaya [18]) a folyáshatárt, a rugalmassági modulus, a hajlítási sugarat és a lemez vastagságát, illetve a hajlítási szöveget nevezik meg a visszarugózásra ható legfőbb befolyásoló tényezőkként. Ezeken túlmenően további elméletekkel is találkozhatunk, mint például a Vorkov és szerzőtársai [19] által javasolt módszer, amely ismert egyenletek paramétereinek regressziós illesztését alkalmazza, vagy a Gedeon [20] által javasolt elmélet, amely egy polinom regressziós illesztésével hajtja végre a visszarugózás számítását.

1.2 Célkitűzések



A disszertációban szereplő fejlett, nagyszilárdságú acélok mikroszerkezete és mechanikai, képlékenységi tulajdonságai közötti kapcsolatok feltárása napjaink egyik vezető kutatási témája. Az anyag minél pontosabb ‘karakterizálása’ a komplex anyagok és bonyolult terhelési esetek modellezésében kulcs szerepet tölt be, ezért én is fontos célként kezeltem ennek a területnek a tanulmányozását. Mindemellett, a DP acélokra vonatkozóan sokszor különböző, sőt akár egymásnak ellentmondó eredmények is találhatóak a szakirodalomban, amely szintén az ez irányú kutatások fontosságát mutatja.

Ennek az anyagjellemzésnek az egyik (igen fontos) állomása a folyásgörbe és az azt leíró mechanikai modellparaméterek meghatározása. A ma használatos mechanikai modellek valamelyest kötődnek az anyag mikroszerkezetében lejárló változásokhoz, így a különböző folyásgörbe paramétereknek a mikroszerkezettel történő szembeállítását is korunk kutatási igényeihez igazodó célnak tekinttem. Azt vizsgáltam, hogy a folyásgörbe paraméterek megváltozása milyen kapcsolatban áll a mikroszerkezeti jellemzők megváltozásával.

1. ábra: az alakváltozás
– feszültség transz-
formáció sematikus
ábrázolása

Ezen túlmenően, az elvékonyodási kritérium egy másik kiemelt anyagjellemző a lemezalakításban. Ezeknek az acéloknak (de más anyagoknak is) a viselkedése kevésbé ismert az olyan újszerű elméletekben való alkalmazásban, mint pl. a feszültség-alapú alakítási határdiagramok jelentette környezetben. Ebben a megközelítésben az ismert (mért vagy számolt) határalakváltozásokat a határfeszültségek koordináta rendszerébe transzformáljuk, ezzel kiküszöbölve a klasszikus FLD-k ismert hátrányait. Ebből következően a transzformáció eredménye explicit függvénye kell, hogy legyen a folyási feltételnek és a keményedési törvénynek (1. ábra), illetve a transzformáció módjának is egyaránt.

Az általános alakváltozás-feszültség transzformáció [11] folyási feltétel és keményedési görbe függése ma már többé-kevésbé ismert, viszont ez nem mondható el az újabban kifejlesztett módszerekről. Levy és Tyne [12] például csak a Nádai-féle folyásgörbe összefüggés és a Hill48 folyási feltétel alkalmazásával definiálták új elméletüket, amelyben a határfeszültségek a lemezvastagság (t) mellett egy anyagfüggő paraméter, a Z paraméter függvényében számolhatók. Elméletükben

$$FLC_0(\sigma) = a_0 + a_1 Z + a_2 t, \quad (1)$$

ahol a_0 , a_1 és a_2 anyagfüggő állandók.

Az ilyen, általános transzformációtól eltérő elméletek paraméter hatáselemzése vagy az általános módszerrel történő összehasonlításuk nem jelent még meg a tudományos szakirodalomban, ezért tekintetem kutatási feladatommak a határfeszültségek előállítási módjának vizsgálatát, a feszültség-alapú környezetben.

A feszültség-alapú szemléletben történő gondolkodás jelentette az alapját a ráncosodási vizsgálataimnak is. Az ismert ugyanis, hogy a mélyhúzott lemez pereme jelentős alakváltozásokon megy keresztül, amely következtében a ráncosodás kritériumának a megadása pusztán az alakváltozások nagyságának és jellegének függvényében kérdéses lehet. A ráncosodás kialakulása a lemezre ható normális irányú nyomás függvénye is egyben, amelynek a munkadarabra történő közvetlen kivetülése a határfeszültségeken keresztül fejezhető ki szemléletesen. Érdeemes viszont megjegyezni, hogy ehhez hasonló, azaz akár a ráncosodási határalakváltozásoknak akár a ráncosodási határfeszültségeknek a normál irányú nyomás függvényében történő illusztrálására nem találtam példát a kutatásaim során. Munkám egyik célja ennél fogva, egy ilyen átfogó, a határértékeket a ráncgátló nyomás függvényében kifejező határdiagram megalkotása volt. Ehhez hosszas irodalomkutatás után Wang és Cao [15] elméletét használtam fel, amely a ráncosodási kritériumot a tisztán a síkjában alakváltozó (J_{0n}) és a kihajlást elszenvedő lemez (J_{bn}) alakváltozási energiájának különbségéből állapítja meg:

$$W_n = J_{0n} - J_{bn}. \quad (2)$$

A PhD kutatómunkám utolsó szakaszában egy szintén igen gyakori, de geometriai hibának, a visszarusogásnak a vizsgálata volt a célom. A rugalmas visszahatás megfigyeléshez egy különleges terítéktípust, a lézersugaras hegesztéssel különböző szilárdságú alaplemezekből összeállított lemezeket (tailor welded blank - TWB-eket) és a hajlítási geometriát tettem vizsgálataim elsődleges tárgyává.

2. A vizsgálati módszerek bemutatása

2.1 Mikroszkópi vizsgálatok

A szövetszerkezeti jellemzők megfigyelésére használt mikroszkópi vizsgálatokat csiszolt, polírozott majd 2%-os nitalban maratott kismintákon végeztem el. A DP acélok szövetelem-arányának elemzését az alkalmazott Zeiss Imager M2m optikai mikroszkóp beépített területelemző varázslójában hajtottam végre, minimum öt különböző keresztmetszetben.

2.2 Folyásgörbefelvétele és a képlékenységi anizotrópia meghatározása

A folyásgörbék kiindulási alapját képező mérnöki feszültség vs. mérnöki alakváltozás görbéket egy Instron 4482 univerzális anyagvizsgáló berendezéssel vettem fel, az MSZ EN ISO 6892-1:2010 szabvány szerint, 30 mm/perc keresztfej elmozdulási sebességgel, szobahőmérsékleten. A mérésekhez szabványos A80-as, 1 mm vastag lemez próbatesteket alkalmaztam a hengerlési iránnyal párhuzamosan, arra merőlegesen és azzal 45°os szöget bezáróan kimunkálva. A szakítóvizsgálatokat próbatest típusonként (anyag és hengerlési irány) ötszörös ismétlési gyakorisággal végeztem. Az alakváltozás mérésekhez Instron 2663 AVE típusú érintésmentes nyúlásmérőt alkalmaztam hossz- és keresztirányban egyaránt. Az r-értékeket ezekből a nyúlásokból az ISO 10113:2006 szabvány alapján vettem fel.

A folyásgörbe egyenletek illesztését a legkisebb négyzetek módszerével hajtottam végre. Ez, a nem-lineáris regressziós illesztési módszer a becült (\check{y}_i) és a mért értékek (y_i) különbségéből képezett négyzetösszegek (χ^2) minimalizálásán alapszik:

$$\chi^2 = \sum(\check{y}_i - y_i)^2 . \quad (3)$$

A közelítés jóságát a négyzetes hibafüggvény (R^2) jellemzi, amely a legnagyobb értékét a legkisebb különbségeknél veszi fel. Az egyes lépések közötti iterációkat egy matematikai megoldó programban oldottam meg.

$$R^2 = \frac{SST - \chi^2}{SST} , \quad (4)$$

amelyben

$$SST = \sum(y_i - \bar{y})^2 . \quad (5)$$

2.3 A lokális elvékonyodás meghatározására alkalmazott vizsgálatok

A lokális elvékonyodás vizsgálatát Nakazima-féle mélyítő vizsgálatokkal végeztem. Öt különböző geometriájú próbatest alkalmazását láttam szükségesnek, hogy az FLD minél nagyobb tartományát le tudjam fedni az elméleti tiszta nyírástól a tisztán kéttengelyű húzásig. A nagyobb (ϵ_1) és kisebb (ϵ_2) főalakváltozások mérése érdekében négyzetes mérőhálót vittem fel a lemezek felületére, elektrokémiai maratással. A háló torzulását Vialux Autogrid® optikai alakváltozás mérő rendszerrel vizsgáltam az ISO 12004-2:2008 szabvánnyal összhangban. A lemezek terhelést egy Erichsen 142 típusú elektrohidraulikus, univerzális lemezvizsgáló berendezés biztosította. A bélyeg elmozdulási sebességét 30 mm/perc-ben

állapítottam meg, amely mozgás a terhelő erő leesésekor (avagy szakadáskor) automatikusan leállt. Az érintkező szerszámelemek és a próbatestek közé vékony olajréteget vittem fel.

2.4 A ráncosodás elemzésére alkalmazott vizsgálatok

A ráncgátló alatti területrészek ráncosodásának elemzése céljából szabványos Swift-teszteket [21] hajtottam végre, lapos végződésű bélyeggel. A terhelést az előző pontban is megemlített Erichsen 142 típusú vizsgáló berendezés biztosította. A bélyeg mozgását most is állandó 30 mm/perc sebességben állapítottam meg és a ráncgátló nyomások értékén változtattam a különböző méréseknél. A szerszám-munkadarab határfelületeket $\sim 0.01 \text{ g/cm}^2$ BWS olaj és 0,05 mm vastag polietilén fólia alkalmazásával (ún. szendvicskenés) választottam el egymástól a ráncgátló oldalon, míg a bélyeg oldalt kenőanyaggal nem kezeltem (Altan és Tekkaya [18] ajánlása szerint). A ráncképződés számszerűsítését Mitutoyo RA-1500 típusú koralakmérővel oldottam meg. Az alkalmazott harmonikus analízis a 15 és az 1500 μm közötti tartományban definiálta a ráncok megjelenését.

2.5 A visszarugózás meghatározására alkalmazott vizsgálatok

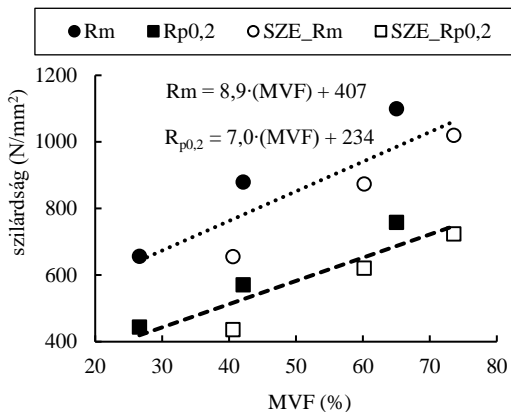
A visszarugózás megfigyeléséhez 90° -os V-alakú hajlítási kísérleteket hajtottam végre állandó matrica geometriával de változó (az alaplemezek esetében 3, 5, 8 és 15 mm-es, a hegesztett terítékek esetében 3 és 5mm-es) bélyeg lekerekítési sugárral. Az alaplemezek hajlítása az Instron 4482 univerzális anyagvizsgáló gépen történt, míg a hegesztett lemezek terhelését egy Amada típusú CNC vezérlésű élhajlítógép biztosította, mindkét esetben állandó 20 mm/perc bélyeg-elmozdulási sebességgel. Az alaplemezek hajlításakor egységesen 10 kN vasalást is alkalmaztam. A terhelés megszűnését követő szögtorzulás mérését egy műhely szögmérővel mértem $\pm 0,5^\circ$ szórási tartományban. A kiinduló 1-1 mm vastagságú alaplemezekből álló hegesztett terítékek lézersugaras hegesztését a BAY Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-nél oldottam meg. Az alkalmazott hegesztési technológia paraméterei és a hegesztett kötések jellemzése a [XVI] közleményben olvasható.

3. A disszertáció eredményeinek összefoglalása

A disszertáció mind a négy vizsgált anyag eredményeit részletesen tárgyalja, így a következő al-fejezetekben olvasható jellemzések csak egy-egy anyag eredményeinek szemléltetésére korlátozódnak.

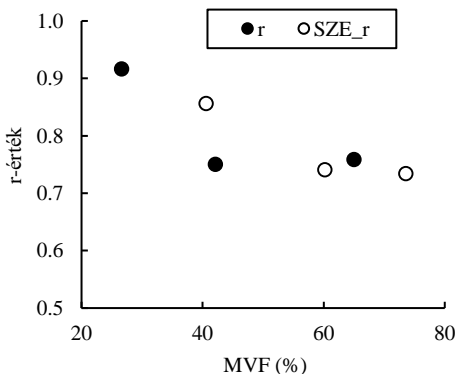
3.1 Az alapvető anyagtulajdonságok jellemzése

A kutatásaim ezen szakaszában a kísérletileg meghatározható alapvető (egytengelyű feszültségi állapotban mért) mechanikai tulajdonságok és a mikroszerkezeti jellemzők összevetését végeztem el. Ezek az eredmények képezték a további kutatások alapját és mivel az egytengelyű húzóvizsgálatok eredményei egyébként széleskörűen (jóval szélesebb körben, mint a mikroszkópi vizsgálatok)



2. ábra: az átlagos szilárdsági paraméterek MVF szerinti megváltozása

Vizsgálataim eredményeként lineáris összefüggést állapítottam meg a DP acélok MVF értéke és a folyáshatár illetve a szakítószilárdság között (2. ábra). Habár ez nem magától értetődő ismerve a terület szakirodalmát (főként 50% MVF felett látni példát nem-lineáris összefüggésekre is), de mindenben egybevág a győri Széchenyi István Egyetem által korábban vizsgált minták jellemzőivel. Az ábra szerkesztésekor már a SZE mintáit is figyelembe vettem, így összesen hat pontot tudtam feltüntetni a három vizsgált anyagra (DP600, DP800 és DP1000).



3. ábra: az átlagos r-értékek MVF szerinti megváltozása

használatosak, az eredményül kapott összefüggések alapján a vizsgált anyagok mikroszerkezetére is legalább részben vissza lehet következtetni. Mindemellett, eltérő eredmények találhatóak a szakirodalomban a DP acélok átlagos martenzit tartalmának (martensite volume fraction – MVF-nek) és mechanikai tulajdonságainak kapcsolatára, amely tovább erősítette számomra e terület kutatásának létjogosultságát.

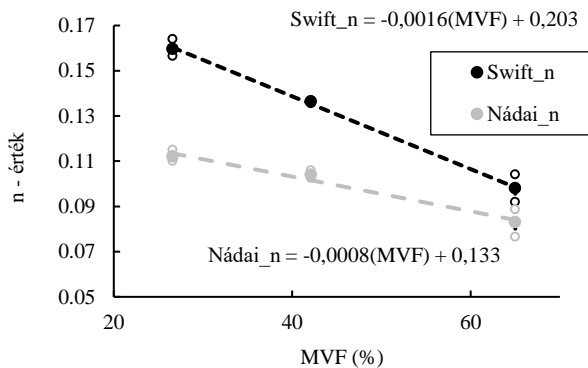
A teljes és egyeneses nyúlás megváltozása konszenzusban van a szilárdsági mérőszámok megváltozási karakterisztikájával, viszont az egyenesek, felfutásukat tekintve azzal ellentétes irányúak. Fontos azonban megjegyezni, hogy a nyúlások tekintetében a saját méréseim alapján is kérdésesnek látszik a lineáris kapcsolat a kisebb (~10% alatti) MVF tartományban. Erre az eredmények 0% MVF értékhez történő extrapolálásából lehet következtetni.

Az átlagos anizotrópia mérőszám MVF szerinti megváltozásában ugyanakkor nincs az előzőkhez hasonló arányosság. Az r -érték 40-60% MVF-ig csökken, majd ezt követően konstans értéket vesz fel (3. ábra). Ez, a ferrit és martenzit fázisok együttes, komplex deformációs jelenségével magyarázható, amely különbözőképpen zajlik le az anyagban az MVF függvényében. Nagyobb MVF-nél már nem csupán a ferrit alakváltozik és így az össz-alakváltozás mintegy homogenizálódik a mikroszrekezetben.

3.2 Folyásgörbék elemzése

A mikroszrekezet és a képlékenységi tulajdonságok tovább-gondolásával jutottam el az MVF és a folyásgörbe közelítő egyenletek kapcsolatának vizsgálatához. Kutatásaim során azt figyeltem, hogy a mechanikai-modell alapú összefüggések fizikai tartalommal is rendelkező változói mutatnak-e bármilyen összefüggést a mikroszrekezetrel, avagy nem. Az egyes folyásgörbe paramétereket a 2.2 fejezetben bemutatott legkiseb négyzetek módszerével határoztam meg.

Eredményeimből az látható, hogy az alkalmazott folyásgörbe egyenletek természete, a modell-paramétereknek a mikroszrekezet függvényében történő



megváltozásában is nyomon követhető. Erre mutat egy példát a 4. ábra, amelyen az látható, hogy a Nádai és Swift egyenletben szereplő keményedési kitevők a nyúlásoknál megfigyelt lineáris megváltozási jelleggel összhangban vannak az MVF függvényében.

4. ábra: a Swift és a Nádai egyenletekben szereplő keményedési kitevőknek az MVF szerinti megváltozása

Ilyenformán, az alakváltozások szorzóiként szereplő paraméterek exponenciális megváltozása tapasztalható az egyébként exponenciális jellegű függvényekben, és a hatványos megváltozás jellemzi a szilárdsági szorzóiként szereplő paramétereket az egyébként hatványos jellegű egyenletekben.

3.3 Tönkremeneteli kritériumok

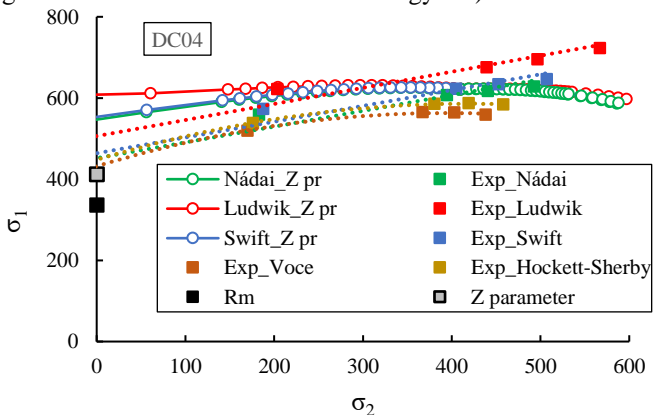
3.3.1 A lokális elvékonyodási határállapot feszültség-alapú kifejezése

A feszültség-alapú határdiagram elméletek jól használhatók azokban az esetekben, amikor a klasszikus FLD már nem képes a tönkremenetelt kifejezni. Tipikusan ilyen az elő-alakváltozáson átesett próbatestek esete, de a szakadási vagy

a nyírási repedési határállapot előre becslése is nagyobb pontossággal elvégezhető a feszültség-alapú környezetben.

Kutatásaim során én az alakváltozás-feszültség transzformációk folyásgörbe modell érzékenységét vizsgáltam, mind az általános transzformációs elvre [11] mind pedig a Levy és Tyne [12] által javasolt anyagfüggő paraméteres közelítésre vonatkozóan. Ez utóbbi elmélet pusztán szakítóvizsgálati adatokból rajzolja meg a teljes alakítási határdiagramot, amelyhez ugyan alapos elemzés olvasható a szerzők által bevezetett új eredményváltozóról (Z paraméter az 5. ábrán), de a képlékenységi anyagmodell vizsgálatát vagy az eredményeknek az általános transzformációval történő összehasonlítását nem tartalmazzák az irodalmak.

Az általános transzformáció elengedhetetlen bemeneti paramétereit jelentő határalakváltozásokat, Nakazima tesztekkel mértem ki (2.3-as fejezet), míg az anyagfüggő paraméteres közelítéshez a korábbi szakítóvizsgálati eredményeket vettem alapul. A képlékeny anyagviselkedést kifejező folyási feltételt és folyásgörbéket tekintve, előbbi függvény számítására egységesen a Hill48 modellt alkalmaztam, míg az utóbbi jellemzőt több különböző modellel is kifejeztem. Így a Levy-Tyne elméletnek a megadotton túli, egyéb folyásgörbe modellekkel történő kiterjesztésével, majd az általános transzformációval kapott összehasonlításából az látható, hogy ez utóbbi módszer nagyobb folyásgörbe érzékenységgel rendelkezik, mint az anyagfüggő paraméteres közelítés. Ezt példázza DC04 anyagra az 5. ábra, amelyen látható, hogy a Z paraméter felhasználásával kapott eredmények - főként a sík alakváltozási állapottól jobbra - szinte teljes fedésbe kerülnek. Érdeemes ugyanakkor megjegyezni, hogy a Z paraméter nem számolható és ezáltal ez a módszer nem alkalmazható exponenciális folyásgörbe függvényekkel, mivel ilyenkor a Z paraméter valótlannul nagy értéket vesz fel a nagyobb (a szakítóvizsgálatnál elérhető alakváltozásoknál nagyobb) alakváltozásoknál.



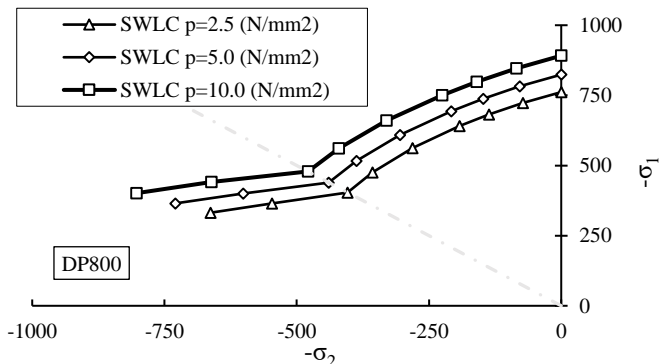
5. ábra: DC4 lemezanyag különböző elméletekkel és különböző folyásgörbe modellekkel számolt feszültség-alapú befűződési határgörbék

3.3.2 Ráncosodási kritérium feszültség-alapú megadása

A mélyhúzott lemezek peremén uralkodó feszültségállapot egyenes következménye, hogy a feszültség-alapú szemléletmód hasznos a ráncosodási jelenség definiálására is. Bár régi elméletek ismertek az optimális ráncgátló nyomás közelítő meghatározására, mi több a ráncok kialakulását illetően találni elméleti leírásokat a kontinuummechanikában is, de igazán elterjedt, gyakorlati felhasználású ráncosodási kritérium, főként összeszorított felületekre nem ismert a képlékenyalakító közösségben.

A ráncgátló által kifejtett normál irányú nyomás hatását, a legtöbbször síkbelinek feltételezett, vagy erre egyszerűsített feszültségi állapotra, Wang és Cao [15] elméletét felhasználva fejeztem ki. Ennek eredményeként a ráncosodási kritérium egy újszerű megadási módját dolgoztam ki, amelyben a ráncosodást kifejező határgörbék - a korábbi reprezentálási módoktól eltérően - a normál irányú (összeszorító) feszültség függvényében jelennek meg. A 6. ábra például, a DP800 anyagra jellemző határgörbéket szemlélteti három, különböző ráncgátló nyomás esetére. Ahogyan az várható, a nagyobb ráncgátló nyomásokhoz nagyobb ráncosodási határfeszültségek tartoznak. A határgörbéket egységesen a Hill48 képlékenységi feltétellel és a Swift-féle folyásgörbe modellel számoltam.

Az így kapott eredmények további felhasználásaként, a ráncosodást létrehozó síkbeli feszültségeknek és az azt megakadályozni képes normál irányú nyomásnak a számítására alkalmas összefüggéseket felhasználói eredményváltóként definiáltam az AutoForm® FE szoftverben. A program ún. közlekedési lámpa koncepció (traffic light concept) moduljában, a ráncosodás feltételét közvetlenül a munkadarabra vetítve is ki tudtam fejezni, a kísérleti eredményekkel összhangban.



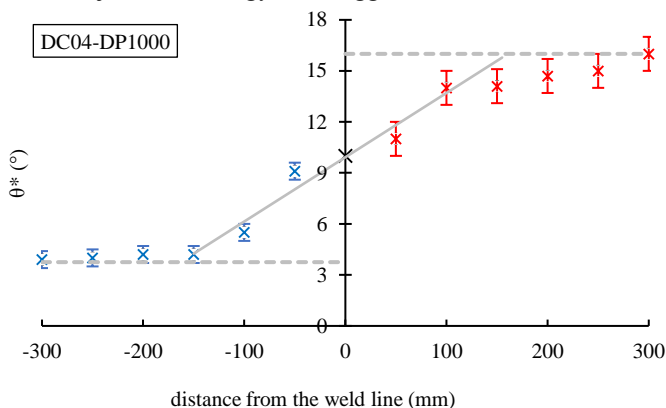
6. ábra: az újszerű feszültség-alapú ráncosodási határgörbék a ráncgátló nyomás függvényében (DP800)

3.4 Visszarugózás

A disszertáció utolsó szakasza a geometriai nem-megfelelőségnek számító, hajlítás utáni visszarugózást taglalja. Első körben vizsgálatokat végeztem a felhasznált lemezanyagok visszarugózására, majd ezt egészítettem ki az ezekből a

lemezekből, lézersugaras eljárással hegesztett terítékek (TWB-k) szögtorzulásának elemzésével. A TWB-ket alkotó alapanyagok visszarugózását összevettem a szögváltozás becslésére ma használatos elméleti módszerekkel és javaslatot tettem két különböző típusú egyenletnek is a fejlettebb anyagjellemzési módszerekkel elérhető pontosítására. Ebben a munkában, az ismert egyenletekben állandóként szereplő rugalmassági modulus, lemezvastagság és folyáshatár változóként történő definiálására helyeztem fő hangsúlyt. Ez kézenfekvő a tekintetben, hogy pl. a rugalmassági modulus változóként történő kezelése jól ismert a kinematikus keményedési modellekben, de a visszarugózás becslésének analitikus módszereiben nem szerepelt még a felhasználása ebben a minőségében.

A DP-DC anyagpárosítású komponensekből, 1-1 mm-es vastagságban elkészült TWB-k visszarugózását a hegesztési vonalra merőlegesen, a hajlítás tengely mentén mértem és a varrattól való távolság függvényében ábrázoltam (7. ábra). Az eredményekből az látható, hogy visszarugózás a hegesztési varrat környezetében lineárisan változik, míg az el nem éri az alaplemezekre önmagukban jellemző visszarugózás értékeket. Eszerint, a varrat környezetében egy átmeneti zóna alakul ki, amelyben a visszarugózás az alkotó lemezek mechanikai tulajdonságaitól és a hajlítás geometriai jellemzőitől egyaránt függ.



7. ábra: DC04-DP1000 TWB kísérleti úton meghatározott visszarugózási szögértékei, 5 mm-es bélyeg lekerekítési sugárral történő V alakú hajlításkor

4. Tézisek, új tudományos eredmények

- T.1.** DP600, DP800 és DP1000 lemezanyagokra vonatkozóan, az egytengelyű feszültségi állapotban (szabványos lemez próbatesteken) mérhető anyagjellemzők (szakítószilárdság, folyáshatár és egyenletes, illetve teljes nyúlás) és az átlagos martenzit térfogatszázalék közötti kapcsolat lineáris függvényekkel jellemezhető, a következő egyenletek szerint:

$$\begin{aligned}R_m &= 8,9 \cdot (\text{MVF}_{V/V\%}) + 407 ; \\R_{p0,2} &= 7,0 \cdot (\text{MVF}_{V/V\%}) + 234 ; \\A_g &= -0,15 \cdot (\text{MVF}_{V/V\%}) + 17,7 ; \\A_{80} &= -0,23 \cdot (\text{MVF}_{V/V\%}) + 26,5 .\end{aligned}$$

Az r -értékkel kifejezhető képlékenységi anizotrópia mérőszám, ezektől eltérően nem mutat hasonló összefüggést a mikroszerkezettel [I], [II], [III], [IV], [V], [VI].

- T.2.** DP600, DP800 és DP1000 acélok egytengelyű húzóvizsgálatával és a legkisebb négyzetek módszerének felhasználásával megállapított Nádai, Ludwik, Swift, Johnson-Cook, Voce és Hockett-Sherby hidegalakítási-keményedési törvények modell-paraméterei, az átlagos martenzit térfogatszázalék függvényében a következő módon változnak: az alakváltozások szorzóiként szereplő tényezők (rendre K paraméter a Nádai, a Ludwik a Johnson-Cook és a Swift, b paraméter a Voce és N paraméter a Hockett-Sherby egyenletekben) a hatványos egyenletekben ugyancsak hatványos, míg az exponenciális egyenletekben ugyancsak exponenciális függvény szerint változnak. Eszerint, a martenzit tartalom függvényében is teljesül a Voce és Hockett-Sherby egyenletek 'telítettségi' törvényszerűsége [VII], [VIII].

- T.3.** A Nádai, a Ludwik, a Swift, a Voce és a Hockett-Sherby folyásgörbe egyenletekkel továbbá a Hill48 képlékenységi feltétellel számolt, sík feszültségi állapotra érvényes feszültség-alapú lokális elvékonyodási határgörbék az alkalmazott folyásgörbe modell függvényében változtatják helyzetüket. Ez azonosan jellemző mind az általános alakváltozás-feszültség transzformáció alkalmazásával, mind pedig a Levy-Tyne-féle anyagfüggő paraméteres közelítéssel számolt görbékre, de utóbbi módszer esetén a határgörbék kisebb folyásgörbe modell érzékenységgel rendelkeznek, amely főként a sík alakváltozáshoz tartozó feszültségi állapottól jobbra, a tisztán kéttengelyű húzások tartományában szembevetülő [IX], [X].

- T.4.** Wang és Cao elméletének, a Hill48 folyási feltétellel és a Swift keményedési törvénnyel történő felhasználásával, a ráncosodási jelenség feszültség-alapú kritériuma egy új megközelítésben, a ráncosodási határfeszültséget jelentő

görbékkel a ráncgátló nyomás függvényében kerültek megadásra, a főfeszültségek koordináta rendszerében. Az így felvett határgörbék a mélyhúzási, kísérleti eredményekkel és a numerikus szimulációkkal egyaránt összhangot mutatnak [XI], [XII], [XIII].

- T.5.** 1-1 mm-es lemezvastagságú, DC04 – DP600, DC04 – DP800 és DC04 – DP1000 alapanyagpárokból lézersugaras hegesztéssel előállított terítékeknek a - hegesztési varratra merőlegesen 3 mm és 5 mm sugáron történő V-alakú, 90°-os hajítás utáni - visszarugózása, a hegesztési varrat környezetében, egy átmeneti zónában eltér az alaplemezekre jellemző (ugyanilyen körülmények között mutatott) visszarugózás értékektől. Az átmeneti zónában mért visszarugózási szögek, a hegesztési varrattól mért távolság függvényében lineáris összefüggések szerint változnak. Ezekre az összefüggésekre az jellemző, hogy az egyenesek meredeksége (i) az alkotók közötti szilárdságkülönbség hatására növekszik, tehát ebben az esetben az átmeneti zóna a vízszintes tengely mentén záródik; míg (ii) a hajlítási sugár-kiinduló lemezvastagság viszonyszám növekedése mellett csökken, tehát ilyenkor az átmeneti zóna a vízszintes tengely mentén terjeszkedik. A hegesztett terítéket alkotó lemezanyagok együttes, átlagos alakítási szilárdságának és egyben a hajlítási sugár-kiinduló lemezvastagság viszonyszámának a növekedésével az átmeneti zónát definiáló egyenesek a függőleges tengely mentén felfelé, azaz a nagyobb visszarugózás értékek felé tolódnak [XIV], [XV].

5. Az eredmények hasznosításának és tovább fejlesztésének lehetőségei

Kutatásaim során vizsgáltam a járműipari, vékony lemezanyagok mikroszerkezeti jellemzőit és azok mechanikai terhelésre adott reakcióit, tönkremenetelüknek kritériumait, illetve az ezeket a feltételeket leíró elméleti modelleket. A lemezalakításban fő tönkremeneteli módnak számító túlzott mértékű elvékonyodás és ráncosodás, továbbá a minőségi problémának számító visszarugózás témakörében is végeztem irodalomkutatáson alapuló kísérleti-, és a ráncosodás területén numerikus modell-vizsgálatokat is.

A DP acélok esetén vizsgáltam, hogy a mikroszerkezet és a mechanikai tulajdonságok közötti kapcsolat milyen módon terjeszthető ki a képlékenységi szempontból meghatározó, szakítóvizsgálatokból származtatható jellemzőkre. A szakítóvizsgálati adatsorokból a legkisebb négyzetek módszerével több különböző folyásgörbe közelítő modell egyenletét is meghatároztam, amelyek paramétereit a DP acélok átlagos martenzit tartalmának függvényében is megadtam. Megfigyeléseim szerint ezen a téren is megfigyelhető a kapcsolat a mechanikai modell fizikai tartalma és a mikroszerkezeti jellemzők között.

A folyásgörbe modellek felhasználásával két különböző elven számoltam a lemezalakítás mai gyakorlatában még kevésbé elterjedt feszültség-alapú alakítási határgörbéket. Eredményeimből az látható, hogy az alakváltozások feszültségekké történő átszámolása különbözőképpen hat a határfeszültségi értékek alakulására.

Munkám során a nyomó feszültség jelenlétét is igénylő ráncosodás jelenségére is kiterjesztettem az eredendően pozitív főfeszültségeket vizsgáló szemléletmódot és meghatároztam a kritikus, ráncosodást jelentő tangenciális nyomó-, és kritikus, ráncosodást megakadályozni képes normál irányú nyomó feszültséget Wang és Cao energia-típusú elméletének felhasználásával. Az elmélet alkalmazásával egy új ráncosodási határdiagram koncepciót alkottam, amely működőképességét véges-elemes szimulációkkal és kísérleti mélyhúzásokkal ellenőriztem.

A visszarugózás vizsgálatokat V-alakú, 90°-os hajlítópórbákkal, különböző szerszámozási körülmények között hajtottam végre a négy vizsgált lemezanyagon, így a visszarugózásra ható anyagi- és geometriai tényezőket is (de legalábbis egy részüket) figyelemmel tudtam kísérni. Megfigyeltem, hogy a lézersugárral hegesztett terítékek a szerszámnyitást követően a hegesztési varrat környezetében sajátos viselkedést mutatnak. Egy átmeneti régióban, a terítéket alkotó szegmensek egyike sem produkálja az önmagában, ugyanilyen körülmények között rá jellemző visszarugózást, hanem a szögtorzulás egy lineáris függvénnyel leírható módon változik a hegesztési varrattól mért távolság függvényében.

Ezekből az eredményekből szemléletesen látható (pl. a DP lemezanyagok anizotróp keményedésből vagy az r -értékük nem szokványos viselkedéséből), hogy a fejlett anyagok képlékenységi jellemzése még sok lehetőséget tartogat magában. Mind folyási feltétel, mind pedig az (azzal akár összetartozó, akár nem-összetartozó) folyási törvények vizsgálata komoly tudományos potenciált rejtenek, amely téren

újabb eredmények kinyerése, meglátásom szerint magasabb szintű 'anyagkarakterizálással' lehetséges. A jövőbeni terveim között szerepelnek is új vizsgálati eljárások kifejlesztése és végrehajtása, a képlékenységi paraméterek minél magasabb szintű kalibrálására és azoknak a tönkremenetelei kritériumokba történő beépítése, továbbfejlesztése érdekében.

6. Hivatkozások

- [1] Yuxuan Li, Zhongqin Lin, Aiqin Jiang, Guanlong Chen: Use of high strength steel sheet for lightweight and crashworthy car body, *Materials and Design* 24 (2003) 177–182.
- [2] Xintao Cui, Hongwei Zhang, Shuxin Wang, Lianhong Zhang, Jeonghan Ko: Design of lightweight multi-material automotive bodies using new material performance indices of thin-walled beams for the material selection with crashworthiness consideration, *Materials and Design* 32 (2011) 815–821.
- [3] V. Uthaisangsuk, U. Prahil, W. Bleck: Modelling of damage and failure in multiphase high strength DP and TRIP steels, *Engineering Fracture Mechanics* 78 (2011) 469–486.
- [4] Nádai A L 1937 *J. Appl. Phys.* **8** pp 205–213.
- [5] Kim S, Lee J, Barlat F, Lee M-G 2013 *Journal of Materials Processing Technology* **213** pp 1929–1942
- [6] Voce E J. *Inst. Metals* **74** pp 537
- [7] Hockett J E, Sherby O D 1975 *J. Mech. Phys. Solids* **23** pp 87-98
- [8] Banabic, D., Bunge, H.J., Pöhlant, K., Tekkaya, A.E., 2000. Formability of Metallic Materials, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 173-178.
- [9] Keeler S P 1965. *Society of Automotive Engineers* No. 650535
- [10] Goodwin G M 1968. *Society of Automotive Engineers* No. 680093, pp 380-387
- [11] Stoughton, T.B., Zhu, X., 2004. Review of theoretical models of strain-based FLD and their relevance to stress-based FLD. *International Journal of Plasticity* 20 1463-1486.
- [12] Levy B S, Van Tyne C J 2015. *Proc. IDDRG Shanghai*, pp 262-269
- [13] T. X. Yu and W. Johnson, *Int. J. Mech. Sci.* **24**, No. 3, 175-188 (1982).
- [14] J. W. Hutchinson and K. W. Neale, *Proceedings of Int. Symp. on Plastic Instability*, Paris, France, 1841–1914 (1985).
- [15] X. Wang and J. Cao, *J. Manufact. Processes* **2**, No. 2 (2000)
- [16] Marciniak Z, Duncan JL, Hu SJ. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002; pp. 82-107.
- [17] Lange K. *Handbook of Metal Forming*. SME, Dearborn, Michigan 48121 USA, 1985. pp. 737-763.
- [18] Taylan Altan and A. Erman Tekkaya: *Sheet Metal Forming Fundamentals*, ASM International, USA (2012)
- [19] Vorkov V, Aereus R, Vandepitte D, Duflou JR. Two regression approaches for prediction of large radius air bending. *Int. J. of Material Forming*, 2019. 12:379-390.
- [20] Gedeon M. *Elastic springback*. Technical Tidbits, Issue No. 11. 2009.
- [21] Swift, H.W., 1939. Drawing tests for sheet metal. *Proceedings Institution of Automobile Engineers*, Vol. 34: 361.
-
- [I] Gábor Béres, Miklós Tisza: The effect of tensile strength on the formability parameters of dual phase steels. In: Jármai, Károly; Bolló, Betti (szerk.) *Vehicle and Automotive Engineering : Proceedings of the JK2016*, Miskolc, Hungary Cham (Svájc), Svájc : Springer International Publishing, (2017) pp. 197-204. , 8 p.
- [II] Gábor Béres ; Zoltán, Weltsch: Effect of the martensite volume fraction and indentation load on hardness profiles of automotive dual phase steels. In: Vehovszky, B; Takács, J; Bán, K (szerk.) *34th International Colloquium on Advanced Manufacturing and Repairing Technologies in Vehicle Industry*
- [III] Gábor Béres, Zoltán Weltsch: Estimation of Strength Properties from Microhardness Results in Dual Phase Steels with Different Martensite Volume Fraction. *Periodica Polytechnica-Transportation Engineering* **46**, 1-7. (2018)

- [IV] Béres Gábor: Lágycél és nemesített alumínium lemezanyagok alapvető mechanikai tulajdonságjellemzőinek vizsgálata. In: OGÉT 2017: XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia : 25th International Conference on Mechanical Engineering (2017)
- [V] Hareancz Ferenc, Béres Gábor: Acél és alumínium karosszérialemezek komplex kísérleti vizsgálata. In: Rajnai, Zoltán; Fregán, Beatrix; Marosné, Kuna Zsuzsanna (szerk.) Tanulmánykötet a 7. BKK előadásából Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, (2016)
- [VI] Béres Gábor, Hareancz Ferenc, Weltsch Zoltán: Korszerű lemezanyagok mechanikai vizsgálatai. GRADUS 4:2, 329-335. (2017)
- [VII] Gábor Béres, Zoltán Weltsch, Attila Szabó: Parameter fitting of mechanical based constitutive laws for iron based alloys used in the automotive industry. In: Ferdynand, Romankiewicz; Remigiusz, Romankiewicz; Robert, Ulewicz (szerk.) Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry : Monograph 35th international colloquium
- [VIII] Béres Gábor, Tisza Miklós: Investigation of constitutive equation parameters on dual phase steel sheets. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **448** Paper: 012059. (2018)
- [IX] Béres Gábor, Weltsch Zoltán, Tisza Miklós: Comparative study on theoretical and experimental evaluation of forming limit diagrams. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **426** Paper: 012005. (2018)
- [X] Gábor Béres, Zoltán Weltsch, Zsolt Lukács, Miklós Tisza: Prediction of stress- and strain-based forming limits of automotive thin sheets by numerical, theoretical and experimental methods. AIP Conference Proceedings **1960** Paper: 160002. (2018)
- [XI] Gábor Béres: Difficulties and challenges in wrinkling modelling by finite element simulation. Parners Contacts 2:**19**, 49-57. (2019)
- [XII] Béres Gábor, Lukács Zsolt, Tisza Miklós: Study on the wrinkling behavior of cylindrical deep-drawn cups. AIP Conference Proceedings **2113** Paper: 170003. (2019)
- [XIII] Béres Gábor, Tisza Miklós: A hengeres csészék mélyhúzásakor fellépő ráncosodás becslésének elméleti módszerei. GRADUS 6:**1**, 98-109. (2019)
- [XIV] Gábor Béres, Zsolt Lukács and Miklós Tisza: Springback Evaluation of Tailor Welded Blanks at V-die Bending made of DP Steels. Procedia Manufacturing **47**, 1366–1373. (2020)
- [XV] Béres Gábor, Danyi József, Végvári Ferenc: Nagyszilárdságú autóiipari lemezek hajlítása, visszarugózási problémaköre. In: Bitay, Enikő (szerk.) A XX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészak előadásai: Proceedings of the XX-th International Scientific Conference of Young Engineers Kolozsvár, Románia : Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME), (2015)
- [XVI] Kovács Zsolt Ferenc, Béres Gábor, Weltsch Zoltán: Autóiipari DC és DP acélok lézersugaras hegeszthetőségének vizsgálata. GRADUS 4:2, 311-317. (2017)