

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLLEMEZEK ALAKÍTÁSI HATÁRÁLLAPOTÁNAK KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

Tézisfüzet

KÉSZÍTETTE:

Gál Viktor

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY, GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY ÉS MECHANIKAI TECHNOLÓGIÁK

Doktori Iskola vezető

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

Témacsoport vezető

Prof. Dr. Lukács János Elemér
CsC, PhD, egyetemi tanár

Tudományos vezetők

Dr. Lukács Zsolt
egyetemi docens

Dr. Kovács Péter Zoltán
egyetemi docens

Miskolc
2022

1. BEVEZETÉS

1.1 ELŐZMÉNYEK

Az elmúlt évtizedekben az autóipar fejlődése elsősorban a szigorított környezetvédelmi, illetve biztonsági előírások betartására fókuszáló kutatásoknak köszönhető. A folyamatosan növekvő darabszám mellett magától értetődő, hogy a környezet megóvása érdekében csökkenteni kell a károsanyag-kibocsátását. A környezeti terhelés csökkentésének több módja ismert úgy, mint start-stop motorok, vagy elektromos meghajtású autók alkalmazása, de az utakon jelenleg futó gépkocsik jelentős hányada még hagyományos robbanómotorral szerelt. Tömeggyártás szempontjából a károsanyag-kibocsátás csökkentésének az egyik leghatékonyabb módszere, az autóépítésnél felhasznált alkatrészek, így a járművek össztömegének csökkentése. Az eredetileg acél, illetve egyéb fém alkatrészek egy részénél a tömegcsökkentést más anyagcsoportok alkalmazásával (polimerek vagy kerámiák) érték el. A karosszéria elemeknél az azokat érő mechanikai igénybevételek mértéke és összetettsége miatt ezek az anyagok nem jöhettek szóba, más megoldásra volt szükség.

A karosszéria elemek esetében, ha pusztán a felhasznált anyagok mennyiségét csökkentjük, akkor csökken ezen alkatrészek biztonsági előírásban megfogalmazott peremfeltételeknek történő megfelelése is. A tömeg csökkentése tehát csak úgy kompenzálható, hogy a felhasznált lemezek szilárdságát növeljük. Ennek köszönhető, hogy bár az autógyártás kezdetétől évtizedeken keresztül a hagyományos hidegen hengerelt acéllemezek adták annak alapját, az elmúlt 20-30 évben dinamikus fejlődés zajlott le az anyagfejlesztések területén [1]. Ezen fejlesztések eredményeként mára a megnövelt szilárdságú lemezek széles palettája áll rendelkezésre az autóipar számára.

A növelt szilárdságú lemezek alkalmazásával elérhető előnyök mellett említést kell tenni azok korlátairól is. A nagyszilárdságú acélok és alumíniumok legnagyobb hátrányát, a szilárdság és az alakíthatóság közötti fordított arányosság jelenti. Az alakíthatósági korlátok leküzdésére többlépcsős, jellemzően melegalakítási technológiákat fejlesztettek, ám ezek alkalmazása a hagyományos eljárásokhoz képest jelentős költségtöbblettel jár.

A költséghatékonyság elérése így újabb fejlesztéseket indukált, melynek eredményeként napjainkra a legkülönbözőbb programrendszerek állnak rendelkezésre, amelyek segítik a mérnököket az adott alkatrész geometriai tervezésétől a gyárthatósági elemzéseken keresztül, annak üzemi körülmények közötti vizsgálatáig. A lemezek képlékeny alakításának területén leginkább elterjedt szoftverek a vége-selemes modellező szoftverek. Bár szoftverek között vannak eltérések, a szimulációk felépítésének alapját minden esetben az anyag viselkedésének pontos leírása adja. Az említett lemezanyagok a növekvő terhelés hatására először rugalmasan, majd képlékenyen viselkednek, ennek definiálásához tehát a rugalmas, illetve a képlékeny alakváltozás tartományának leírására van szükség. Az anyag viselkedésének jellemzése az

alakváltozás ezen két szakaszában nem jelent problémát, mivel mind a két tartományban a szükséges vizsgálatokat pontosan leíró szabványok állnak rendelkezésre.

Az alakváltozás határát az anyag adott szempont szerinti tönkremenetele jelenti, ez a szempont azonban az alkatrész alkalmazását figyelembe véve eltérhet.

Hagyományos értelmezés szerint tönkremenetel alatt az alkatrész törését értjük. A törés előrejelzésének, vagyis az alakváltozási határállapotnak a kutatása jelentős múltra tekint vissza [2]. A cél az volt a kezdetekben, hogy a törési határt olyan mechanikai-matematikai modellekkel írják le, amelyek az egyes alakítások során fellépő feszültségállapotokhoz tartozóan definiálják a határ alakváltozásokat. A teljes feszültségteret leíró modellek – melyek összetett alakváltozások esetén is alkalmazhatóak – pontos definiálásához, különböző próbatesteket és módszereket magába foglaló vizsgálatsorozatokot fejlesztettek ki. Az ilyen módon meghatározott modellek – mivel az egyes feszültségállapotok vizsgálatára jellemzően térfogatalakítási vizsgálatokat is felhasználtak –, azonban nem voltak feltétel nélkül alkalmazhatóak lemezalkatrészek esetében [3], valamint megkérdőjelezhető volt az ipari szoftverekben történő importálhatóságuk is.

Autóipari lemezalkatrészek esetén nem csak a tönkremenetel, de általában már a 30%-os elvékonyodás sem megengedett. Szükség volt tehát egy olyan módszerre, amely a károsodás előrejelzése mellett az alakítás teljes folyamata során megfelelően szemlélteti az alakváltozási állapotokat. Az alakváltozás pillanatnyi leírásának leginkább elterjedtebb módja így az alakítási határdiagram (Forming Limit Diagram- FLD) alkalmazása lett, amely a főalakváltozások függvényében adja meg az egyes alakváltozási határállapotokat. Legfőbb alkotója az alakítási határgörbe (Forming Limit Curve- FLC) amely a kontrakció kezdetéhez tartozó főalakváltozásokat írja le. Az FLD, illetve az FLC elterjedését, szabvány [4] alapján történő egyszerű meghatározhatósága és ipari szoftverekben való alkalmazhatósága magyarázza.

Az alakítás határgörbét tehát az alakváltozás során szerkezeti instabilitás hatására létrejövő lokális elvékonyodás jelöli ki. Ez az instabilitás azonban eltérhet [3] globális – nagy anyagterfogatra kiterjedő (pl.: nyújtva húzás) –, illetve lokális – kis térfogatot érintő (pl.: peremezés) – alakítás esetén. Bár az előbbit az alakítási határgörbe megfelelően közelíti, napjainkban egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a lokális alakváltozást létrehozó műveletek, amelyeknél a törés – például a húzott oldalon létrejövő felületi repedés miatt [5] –, a határgörbe alatti tartományban is megjelenhet. Ez magyarázza, hogy az ipari alkalmazásokban is egyre inkább előtérbe kerül az alakítás valódi határának, tehát a törés megjelenésének a figyelembevétele is, amelyet a főalakváltozások összefüggésében a törési határgörbe (Fracture Forming Limit Curve- FFLC) jellemez [6].

Lemezek képlékeny alakváltozásánál fontos megkülönböztetni a húzó-, illetve a nyíró igénybevétel hatására létrejövő alakváltozási tartományt. A húzó igénybevételi tartományban történő alakítást lehatárolja az FLC és az FFLC. Autóipari alkalmazásokban azonban egyre gyakoribbak azok az esetek, amikor a törést nem, vagy csak kis mértékben előzi meg az elvékonyodás. Ez olyan alkatrészeknél jellemző (kisrádiuszú, egyenes falú mélyhúzott darabok),

ahol az alakváltozás kívül esik az FLC-vel határolt térrészen. Ezekben az esetekben, kontrakció hiányában sem az alakítási sem a törési határgörbe nem határolja az alakváltozást.

A leírtak eredménye, hogy a jelenleg is folyó kutatások a törési határ teljes alakítási térre vonatkozó egyre pontosabb meghatározására irányulnak. Az alakítási határdiagrammal kapcsolatos kutatásoknak köszönhetően a húzó igénybevétellel jellemezhető tartományban a törési határ egyszerűen meghatározható a hagyományos, szabványos vizsgálatok alapján, azonban a nyíró igénybevételi tartományban a törés határa és maga a károsodási folyamat is jelentősen eltér.

A törésig elviselt tiszta nyíró alakváltozás vizsgálata meghatározó része napjaink kutatásainak. Új vizsgálati módszerek kerültek kidolgozásra – például a kísérleti csészehúzó vizsgálat [7] alapú meghatározás –, illetve lettek továbbfejlesztve – például a síkbeli csavaró vizsgálat [8] –. A legelterjedtebb azonban továbbra is a húzó igénybevétellel terhelt próbatestek alkalmazása. Ezeknek a próbatesteknek újabb és újabb változatai kerülnek kidolgozásra. A vizsgálati módszerek, illetve a próbatest tervezés és gyártás témakörének komplexitását támasztja alá, hogy egyes irodalmak esetében a törésig elviselt nyíró alakváltozás értéke –adott anyagra vonatkozóan – jelentős eltérést mutathat [9].

1.2 CÉLKITŰZÉSEK

Egy adott anyag alakíthatóságának a tényleges határát tehát annak törésig elviselt alakváltozása határozza meg. Napjaink kutatásai ennek megfelelően a törési határdiagram, tehát az FFLC meghatározására, illetve alkalmazási lehetőségeinek vizsgálatára irányulnak. Hangsúlyozza a kutatásom érvényességét, hogy a – disszertációmban vizsgálni kívánt – DP (Dual Phase) acélok, a globális – tehát a teljes anyagra –, és a lokális – tehát a kis anyagrészre kiterjedő – törésig elviselt alakváltozása között jelentős különbségek vannak. Bár az FFLC megfelelően jellemzi egy adott lemezanyag törésig elviselt alakváltozását, meghatározására napjainkban még nincs szabványosított módszer.

Az alkatrészek gyártási előkészítéséhez mára elengedhetlenné vált végeeselemes szoftverekben a károsodási határalakváltozás megfelelő definiálása. Ehhez az adott alakváltozási (vagy feszültségi) állapotnak megfelelő törési határ alakváltozásának a meghatározása szükséges, melyet szabványok nélkül eltérő kialakítású próbatestekkel, változó megfontolások mellett értelmeznek [10]. A mérések közötti különbségek azonban eltérő eredményekhez vezethetnek, valamint az egyes anyagok összehasonlíthatósága is megkérdőjelezhetővé válik.

Disszertációm célja, hogy meghatározzam a törésig elviselt alakváltozást, az autóiipari lemezalkatrészek számára releváns alakváltozási tartományban. Kutatásaim tárgyát az autóiiparban elterjedten alkalmazott nagyszilárdságú, DP acélok képzik. Az 1 mm vastagságú DP600, DP800 és DP1000 lemezek elvégzendő vizsgálataim két nagy részre oszthatók a főalakváltozások terében, ennek megfelelően két célt definiáltam.

Az egyik célom, hogy meghatározzam a törési alakváltozást az egy, illetve kéttengelyű húzás közötti tartományban. Az alakítási határdiagram feletti tartományban a törési viselkedés meghatározásának lemezalkatrészekre vonatkozóan létezik egy általánosan alkalmazott, bár nem

szabványosított módszere. A törési határdiagram egy-, illetve kéttengelyű húzás közötti tartományban történő meghatározásához tehát a hagyományos Nakazima vizsgálatot fogom elvégezni az említett DP acélokon, majd a próbatestek törési lemezvastagsága alapján származtatom a törési alakváltozás pontjait.

A másik célom, hogy a tiszta nyírásra vonatkozóan, illetve a nyírás és az egytengelyű húzás közötti tartományban meghatározzam a törési alakváltozásokat. Nyíró igénybevétel esetére a törésig elviselt alakváltozásnak meghatározására számos próbatest és vizsgálati módszer került kidolgozásra. A próbatesteket és vizsgálati módszereket tanulmányozva problémaként merült fel, hogy az egyszerűen gyártható próbatestek alkalmassága megkérdőjelezhető, a bonyolult geometriával rendelkező próbatestek gyártása pedig jelentős költségtöbbletet von maga után. A szakirodalom feldolgozása alapján tehát célom egy olyan próbatest létrehozása lett, amely általánosan elérhető berendezésekkel, költséghatékonyan gyártható, mégis megfelel a legújabb fejlesztésű próbatestekkel szemben támasztott követelményeknek. Az új nyíró lemez-próbatest geometriájának felhasználásával további próbatesteket fejleszték a törési határ kiterjesztésére a nyíró-szakító tartományba.

Disszertációm végén a két tartományban (nyíró- illetve egytengelyű húzó-, valamint egytengelyű húzó- és kéttengelyű húzó igénybevételek közötti tartományokban) meghatározott törési pontok kombinációjával veszem fel a törési határdiagramot az autóiipari lemezek szempontjából releváns alakváltozási tartományban. Az alakváltozási térben meghatározott törési határpontok transzformációjával a törési pontokat a feszültségtérben vizsgálva meghatározom a vizsgált DP acélokra vonatkozó törési határalakváltozás és feszültség háromtengelyűség közötti matematikai függvénykapcsolatot.

Összefoglalva a következő célokat tűztem ki a kutatási tevékenységem során:

- Megvizsgálom, hogy van-e lehetőség a tiszta nyíró alakváltozási útvonalat követő próbatestek gyártására jellemzően alkalmazott technológia (szikraforgácsolás) kiváltására egy gazdaságosabb, könnyebben megvalósítható technológiával.
- A napjainkban alkalmazott nyíró igénybevételi próbatestek kontúr geometriája összetett. Célom, hogy létrehozzak a tiszta nyíró alakváltozási útvonalat követő próbatestet egyszerű geometriai elemek alkalmazásával.
- A jelenleg alkalmazott próbatestek kontúrjainak különböző anyagminőségekre történő optimalizálása – azok összetett geometriája miatt – hosszadalmas folyamat. Az új egyszerű geometriájú próbatestre vonatkozóan célom megvizsgálni a szilárdság és a geometria kapcsolatát, ezzel lehetővé téve az egyszerű optimalizálást.
- Célom továbbá, hogy az új, nyíró alakváltozási útvonalat követő próbatest geometriáját felhasználva nyíró-szakító alakváltozási útvonalakat követő próbatesteket hozzak létre, hogy a geometria egyszerű módosításával lefedhető legyen az egytengelyű húzó és tiszta nyíró alakváltozási útvonalak közötti tartomány.

- A Nakazima vizsgálattal, valamint az új próbatestek felhasználásával meghatározott törési határalakváltozási pontokra matematikai közelítő görbéket illeszttek.

2. A FELADATOK MEGOLDÁSÁNAK MÓDSZERE

A vonatkozó szakirodalom ismertetése után, a célkitűzésekben megfogalmazottaknak megfelelően napjaink korszerű nyíró igénybevételi próbatesteivel fizikai méréseket végeztem. A vizsgálatok eredményei alátámasztották a szakirodalomban leírtakat, miszerint a próbatest nyíródó zóna kontúr geometriájának megváltoztatása eltérést eredményez az alakváltozási útvonalban, valamint a törésig elviselt alakváltozásokban [12]. A különböző megmunkálási eljárások hatásának vizsgálata rámutatott, hogy az egyes technológiák alkalmazása hatással van a törésig elviselt alakváltozás értelmezésére. A három választott eljárással (szikraforgácsolás, lézervágás, marás) készült próbatesteken végrehajtott vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a gyártástechnológia erősen befolyásolja a húzó igénybevétellel terhelt nyíró próbatestek esetében a törésig elviselt alakváltozás értelmezését. Az egyes kontúrok csiszolatainak szövetszerkezeti képei, illetve a mért keménységeloszlások arra engedtek következtetni, hogy minél nagyobb a kontúr közelében az anyag szövetszerkezetének változása (felkeményedése), annál kevésbé viseli el az ott fellépő húzó igénybevételt, és a kontúrról induló repedések a törési alakváltozás alulbecsléséhez vezetnek.

Kutatásom egyik célja egy olyan új próbatest – végeselemes vizsgálatokra alapozott – létrehozása volt, amely általánosan elérhető eljárásokkal legyártható, egyszerű geometriájú, emellett megfelel a legkorszerűbb próbatesteknek. A geometria tervezését és optimalizálását az MSC Marc Mentat 2018 végeselemes modellező szoftverben végeztem. Az új próbatesttel kapcsolatban három fő elvárást határoztam meg, miszerint az alakváltozás eloszlása a nyíródó zónában egy lokális maximummal rendelkezzen, az alakváltozási útvonal (a lokális maximumban) feleljen meg a tiszta nyírásnak, valamint azt, hogy a feszültségállapot jellemzésére bevezetett mérőszámok értékei az alakváltozás során szintén feleljenek meg a tiszta nyírás feszültségi állapotának.

Végeselemes modellezés segítségével a jelenlegi szabványnak megfelelő próbatest módosításával létrehoztam egy egyszerű geometriai elemekkel rendelkező, forgácsolással is elkészíthető próbatestet. Az új nyíró próbatest nyíródó zónájának geometriai változtatásával vizsgáltam a kapcsolatot a geometria és az alakváltozási-, illetve feszültségállapotok között. Az új kialakítású próbatestet a disszertációmban vizsgált három anyagminőségre a nyíródó zóna terhelés tengelyéhez képesti elforgatásával optimalizáltam. Ahhoz, hogy létrehozzak próbatesteket a tiszta nyírás illetve az egytengelyű húzás alakváltozási útvonalai közötti tartományban a törési alakváltozás meghatározására, szintén a nyíródó zóna terhelés tengelyével bezárt szögét módosítottam. Összefoglalva tehát, numerikus modellezéssel létrehoztam egy olyan egyszerűen gyártható geometriai elemekből felépített próbatest-geometriát, mely egyetlen paraméterének változtatásával alkalmas a három vizsgált anyagminőség tiszta nyíró, illetve nyíró-szakító igénybevétele esetén a törési alakváltozás meghatározására.

Célként fogalmaztam meg, hogy fizikai mérésekkel határozzam meg a törésig elviselt alakváltozást az autóiipari lemezalkatrészek számára releváns alakváltozási tartományban a három vizsgált DP acélra. A törési határgörbe felvételét két lépésben hajtottam végre. Először a

Nakazima vizsgálatot végeztem el a vizsgált anyagminőségeken, majd az elszakított próbatestekből kimunkáltam a törési tartományát, majd egy külön erre a célra fejlesztett mintaelőkészítő segítségével csiszolatokat készítettem és mértem a törési lemezvastagságot. Az egy-, illetve kéttengelyű húzó igénybevétel közötti alakváltozási útvonal tartományban a törési alakváltozás határa a DIC-vel (Digital Image Correlation- digitális képkorrelációs eljárás) rögzített utolsó képen látható legnagyobb főalakváltozások, valamint a törési lemezvastagság felhasználásával kerültek meghatározásra. Ezt követően a létrehozott kéthidas próbatesttel a törési határgörbét kiterjesztettem az egytengelyű húzásnak, illetve a tiszta nyírásnak megfelelő alakváltozási útvonalak közötti tartományra. A nyíró-szakító próbatestek esetén a töréshez tartozó pontokat a – Nakazima vizsgálatához hasonlóan – a törési lemezvastagság felhasználásával határoztam meg. A próbatesteket egytengelyű húzó igénybevétellel szakadásig terheltem, miközben az alakváltozásokat DIC- technológiával mértem. A szakadás előtti utolsó képen mérhető legnagyobb alakváltozás, illetve a töretfelületen ehhez tartozó lemezvastagság felhasználásával a törési határt kiterjesztettem a nyíró-szakító tartományra.

Bár az autóiipari szoftverek a károsodás definiálására jellemzően a főalakváltozási teret használják, az akadémiai szoftverekbe a károsodást, jellemzően a törésig elviselt összehasonlító alakváltozások feszültségtér alapján meghatározott mechanikai-matematikai modelljével adják meg. Fontosnak tartottam tehát, hogy a töréshez tartozó határalakváltozást az alakváltozási térből a feszültségtérbe történő konvertálásával is megvizsgáljam. Mivel a feszültségtérben felvett összehasonlító alakváltozási pontok vizsgált közelítési összefüggései közül a dupla parabola mutatta a legjobb illeszkedést, a három anyag törési pontjait ezzel az összefüggéssel közelítettem.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK – TÉZISEK

- T1. Nagyszilárdságú DP acéllemezről kimunkált, az anyag törési határ-alakváltozásának meghatározását célzó nyíró próbatestek esetén, azok kimunkálása során előnyben kell részesíteni a hagyományos forgácsoló vagy szikraforgácsoló eljárásokat a lézervágással szemben, mivel lézervágás hatására a vágott kontúr mentén olyan anyagszerkezeti változás megy végbe, mely az anyag tényleges törési határ-alakváltozásának jelentős alulbecslését eredményezi. (1.)
- T2. Nagyszilárdságú DP600, DP800 és DP1000 acélminőségek esetén az új fejlesztésű, a terhelés irányához képest elforgatott nyíródó zónával rendelkező ún. kéthidas próbatestek, amelyek könnyen megmunkálhatók, egyszerű geometriai elemekből felépíthetők, alkalmasak a tiszta nyíró igénybevétel alakváltozási és feszültségállapotának fenntartására. (1.)(2.)
- T3. Nagyszilárdságú DP600, DP800 és DP1000 acélminőségek tekintetében fordított arányosság van az alapanyagok szakítószilárdsága (R_m) és az ún. kéthidas nyíró próbatest húzó igénybevételi terhelés tengelyéhez mért nyíródó zóna azon elforgatási szögei ($\delta^{DP600} = -13^\circ$; $\delta^{DP800} = -11^\circ$; $\delta^{DP1000} = -9^\circ$) között, amelyek a mérés alatt a legtovább a tiszta nyírás alakváltozási- és feszültség állapotában tartják a nyíródó zónát. (2.)
- T4. Fizikai méréseim eredményeire alapozva kijelentem, hogy a Nakazima vizsgálattal átfogható alakváltozási útvonal tartomány az egytengelyű húzástól indulva, az új kéthidas próbatestnek köszönhetően kiterjeszhető egészen a tiszta nyíráshoz tartozó alakváltozási útvonalig. A meghatározott törési pontokat az alakváltozási térből a feszültségterbe konvertálva leírható a vizsgált anyag feszültségfüggő törési viselkedése, melyről a következő megállapításokat teszem (3.):
- A törési határpontok a vizsgált közelítő összefüggések közül a duplaparabolával, azaz két egymás mellett elhelyezkedő, egymást metsző másodfokú polinommal mutatják a legjobb korrelációt.
 - Bár a nagyszilárdságú DP600, DP800 illetve DP1000 acélok törési pontjaira felvett duplaparabolák törési alakváltozás értékei a szilárdsággal fordított arányosságot mutatnak, a parabolák metszéspontjai minden esetben 0,54 feszültség háromtengelyűség értéknél vannak.

4. HASZNOSÍTÁS ÉS A TOVÁBBFEJLESZTÉS LEHETŐSÉGEI

A kutatásom eredményeként meghatározott határalakváltozási mérőszámok felhasználásával lehetőség adódik a lemezalakítás területére fókuszáló numerikus modellező szoftverekben alkalmazott tönkremeneteli határ (FLC) olyan tartományokba történő – tiszta nyíró és egytengelyű húzó alakváltozási útvonalak közötti – kiterjesztésére, amelyek határalakváltozási értékei – a vizsgált anyagminőségek tekintetében – nem voltak meghatározva. Ezzel kezelhetővé válik a disszertációm bevezetésében leírt modellezési problémák (kis rádiusszal húzott, hengeres fazék) fizikai- és numerikus elemzésében megfogalmazott eltérések feloldása.

A határalakváltozási mérőszámok főalakváltozási téréből feszültség térbe történő átkonvertálása lehetőséget biztosíthat az általános végeselemes szoftverekben elterjedt törési elméletek anyagparamétereinek meghatározására, a kiterjesztett vizsgálati eredményekre alapozva. A mérési pontoknak dupla parabolával történő matematikai közelítése lehetőséget biztosít viszonylag széles feszültség háromtengelyűség tartományban a határalakváltozás meghatározására.

A kidolgozott numerikus vizsgálatra alapozott próbatest fejlesztési eljárás, az alapvető geometriai elemek módosításával előre vetíti további alapanyag minőségek vizsgálatát ezáltal azok határalakváltozási mérőszámainak fizikai mérésre alapozott meghatározását. A vizsgált anyagminőségek dupla parabolával történő határalakváltozás – feszültség háromtengelyűség diagramjainak összevetése alapul szolgálhat általánosabb határ alakváltozással összefüggő kijelentések megfogalmazására.

5. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

- (1.) V. Gál, Zs. Lukács; A new specimen for investigating shear fracture strain; International Deep-Drawing Research Group Conference (IDDRG 2021), 21st June- 2nd July 2021; IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1157 012060; Stuttgart, Germany; doi:10.1088/1757-899X/1157/1/012060
- (2.) Gál V., Lukács Zs., Béres L., Kovács P. Z.: Nagyszilárdságú acélok törésig elviselt nyíró alakváltozásának vizsgálata; XXX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia- OGÉT (2022); Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) p.:41-44
- (3.) Gál V., Lukács Zs., Kovács P. Z.; Nagyszilárdságú acéllemezek törési határ alakváltozásának vizsgálati módszerei; Anyagvizsgálók Lapja (2022), 2022/II. lapszám.
- (4.) Gál V.; Nagyszilárdságú alumíniumok alakíthatóságának elemzése; Jelenkori Társadalmi És Gazdasági Folyamatok (2017), Vol. 12: 4, p.: 27-34., 8 p.)
- (5.) Gál V., Lukács Zs.; Numerical modelling of forming high strength aluminium; Iop Conference Series: Materials Science and Engineering (2018), 448 p. 012025; doi:10.1088/1757-899X/448/1/012025
- (6.) Gál V., Lukács Zs.; Modellezési kihívások lemezek melegalakítási folyamatainál; XVI. Képlékenyalakító Konferencia (2018) pp. 1-8. ; Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Kar
- (7.) Gál V., Kovács. P. Z. ; Nagyszilárdságú autóiipari anyagok alakíthatósági vizsgálatainak numerikus modellezése; Doktoranduszok Fóruma 2017: Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa (2018), pp. 32-37., 6 p.; Miskolc, Magyarország: Miskolci Egyetem Tudományos és Nemzetközi Rektorhelyettesi Titkárság,
- (8.) Gál V., Lukács Zs.; Eltérő hálóelemek összehasonlítása lemezek képlékenyalakításának vége-selemes modellezése során; XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019, 632 p. pp. 141-144., 4 p; Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) Nagyvárad, Románia
- (9.) Gál G., Gál V., Kovács P. Z., Kuzsella L., Lukács Zs., Tisza M.; A LoCoMaTech H-2020 projekt alakítástechnológiai vonatkozásai és eredményei; Multidiszciplináris Tudományok A Miskolci Egyetem Közleménye (2019), 9: 4 p.: 91-104., 14 p.; <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.7>
- (10.) V. Gál; Finite Element Analysis of Size Effect for Forming-Limit Curves; ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA (2020), 3:2, p.: 65-69., 5p;

- (11.) Gál V.; A mérethatás végeselemes vizsgálata az alakítási határgörbék felvételénél ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA (HU) (2020) 3:2, p.: 65-69., 5 p.; <https://doi.org/10.33923/amt-2020-02-02>
- (12.) Gál V., Lukács Zs.; Numerical modelling of the thinning behaviour of sheet metal parts; IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING (2020) Vol. 903, p. 012055, 7 p.; doi:10.1088/1757-899X/903/1/012055
- (13.) V. Gál, Zs. Lukács; Effect of Cooling Channels to the Press Hardening Tools Temperature; LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING (2021) Vol. 22, p.: 312-320. 9 p.; https://doi.org/10.1007/978-981-15-9529-5_28
- (14.) Gál G., Gál V., Kovács P. Z., Kuzsella L., Lukács Zs., Tisza M.; Alakítástechnológiai kutatások a Locomatech H-2020 projektben; GÉP 71 : 5-6 pp. 51-58., 8 p. (2020)
- (15.) Gál V., Gáspár M., Kovács J., Lukács Zs., Raghawendra S.; Anyagtechnológiai kutatások az Innovatív Anyagtechnológiák Tudományos Műhelyben; Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye 11:2 pp. 80-86., 7p. (2021) <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.2.11>

6. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALMAK

- [1] Tisza M., Czinege I.; Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts; *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* (2018) p.: 229-238; <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.09.001>
- [2] F. A. McClintock; A criterion for ductile fracture by the growth of holes; *Journal of Applied Mechanics* (1968) 35, p.: 363-371; <https://doi.org/10.1115/1.3601265>
- [3] P. Hora, B. Berisha, D. Hirsiger, T. Komischke, R. Schober; Critical aspects of the experimental and theoretical crack prediction in sheet and bulk metal forming; *Forming Technology Forum* (2018) p.: 1-14
- [4] ISO/DIS 12004; *Metallic Materials- Sheet and strip- Determination of forming limit curves*
- [5] P. Hora, B. Berisha, M. Gorji, N. Manopulo; A generalized approach for the prediction of necking and rupture phenomena in the sheet metal forming; *IDDRG 2012, Mumbai, India*, p.: 79-93
- [6] A. G. Atkins; Fracture in forming; *Journal of Materials Processing Technology* (1996) 56, p.: 609-618; SSD10924-0136 (95) 01875-F
- [7] M. Gorji, B. Berisha, N. Manopulo, P. Hora; Experimental based crack failure criterion and its application in deep drawing operations; *IDDRG 2015, Shanghai, China*
- [8] Z. Marciniak; Influence of the Sign Change of the Load on the Strain Hardening Curve of a Copper Test Subject to Torsion; *Archiwum Mechaniki Stosowanj*, (1961)13, p.: 743-751
- [9] N. Manopulo, B. Carleer; On the way towards a comprehensive failure modelling for industrial sheet metal stamping processes; *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 651 (2019) 012004 IOP Publishing; doi:10.1088/1757-899X/651/1/012004
- [10] Y. Bao, T. Wierzbicki; On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space; *International Journal of Mechanical Sciences* (2004) Vol. 46, p.:81-98; doi:10.1016/j.ijmecsci.2004.02.006
- [11] D. Mohr, S. J. Marcadet; Micromechanically motivated phenomenological Hosford-Coulomb model for predicting ductile fracture initiation at low stress triaxialities; *Internal Journal of solids and structures* (2015) 67-68, p.:40-55; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.02.024>
- [12] C. C. Roth, D. Mohr; Ductile fracture experiments with locally proportional loading histories; *International Journal of Plasticity* (2016), Vol 79, p.:328-354; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2015.08.004>