

Végeselemes modellezési kihívások egy új nyíró próbatest fejlesztése során

Finite element modelling challenges during the development of a new shear specimen

GÁL Viktor¹, BÉZI Zoltán²,

¹ Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., Anyagvizsgáló Osztály, H-3519 Miskolc, Iglói út 2.,

² Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., Szerkezet Integritási Osztály, H-3519 Miskolc, Iglói út 2.,
e-mail: viktor.gal2@bayzoltan.hu, zoltan.bezi@bayzoltan.hu.

Abstract

In the production of automotive sheet metal parts, the typical damage of the small radius, straight-walled deep-drawn parts is cracking due to shear strain. Nowadays, a number of specimens are available to test the shear fracture strain, but manufacturing them is a costly and time-consuming process. In this paper, the development of a new – simple and cost-effective – shear test specimen has been described. An optimal specimen geometry has been determined by finite element modelling, but the physical measurements performed showed different results from the simulation. In this paper, these deviations are investigated and resolved in order to construct the optimal geometry.

Keywords: Shear fracture strain, FEM, New shear specimen, Specimen development

Kivonat

Autóipari lemezalkatrészek gyártása során a kisméretű, egyenes falú mélyhúzott alkatrészek jellemző károsodása a nyíró alakváltozás hatására keletkező repedés. A nyíró igénybevétel hatására létrejövő, törésig elviselt alakváltozás vizsgálatára napjainkban számos próbatest áll rendelkezésre, ezek gyártása azonban költség- és időigényes folyamat. Jelen publikációban egy új – egyszerűen és költséghatékonyan gyártható – nyíró próbatest fejlesztését ismertetjük. Ennek során végeselemes modellezéssel meghatározásra került egy optimális próbatest geometria, ám az elvégzett fizikai mérések a szimulációtól eltérő eredményt adtak. Jelen cikkben ezeket az eltéréseket vizsgáljuk és oldjuk fel a megfelelő geometria létrehozása érdekében.

Kulcsszavak: Nyíró törési alakváltozás, Végeselemes modellezés, Új nyíró próbatest, Próbatest fejlesztés

1. Bevezetés

Napjainkra az autóipari lemezalkatrészek geometriai- és gyártástervezése összefonódott a végeselemes modellezés alkalmazásával. Az egyre bonyolultabb alkatrészek geometriájának – és gyártásának – virtuális megtervezéséhez azonban szükség van az alapanyag viselkedésének pontos leírására. A hagyományos, nagy alakváltozó képességű lemezalapanyagok esetén a végeselemes modellezéshez lényegében elegendő volt az alapanyagok rugalmas és képlékeny viselkedésének meghatározása. Az elmúlt évtizedekben azonban az egyre szigorodó környezetvédelmi és biztonsági előírások hatására kifejlesztésre került új, nagyszilárdságú alapanyagok az elődeiknél kisebb alakváltozó képességgel rendelkeznek, így az alakváltozás határállapotának pontos definiálása előtérbe került. A legelterjedtebb módszer lemezalkatrészek gyártásánál a szakadás (vagy a kritikus elvékonyodás) előrejelzésére a Keeler [1] és Goodwin [2] által bevezetett alakítási határdiagram, pontosabban az alakítási határgörbe (FLC) alkalmazása. Elterjedését egyszerűsége és a végeselemes modellező szoftverekbe történő könnyű importálhatósága magyarázza, ugyanis a károsodási határ definiálására az alakváltozások elemzésére használt főalakváltozások koordináta-rendszerét használja. Az alakítási határgörbe alkalmazása során figyelembe kell venni annak korlátait is. Az FLC pozíciója a főalakváltozások koordináta-rendszerében függ a lemezvastagságtól és a súrlódástól is, de legnagyobb hátránya, hogy csak az egytengelyű és a kéttengelyű húzó igénybevétel közötti tartományt fedi le. A bonyolódó geometriájú alkatrészek miatt egyre inkább előtérbe kerülnek azonban olyan esetek, amikor az alakváltozások az egytengelyű húzás

tartománya mellett, a nyírással terhelt tartományban mennek végbe. Ilyen alakváltozások jellemzően az egyenesfalú, kismélységi, mélyhúzott alkatrészeknél jelennek meg, így ezen alkatrészek károsodását a nyíró igénybevétel hatására létrejövő szakadást [3] az FLC már nem képes előre jelezni. A nyíró igénybevétel hatására végbemenő, törésig elviselt alakváltozásának meghatározására nyíró próbatesteket alkalmaznak. Bár az egytengelyű húzással terhelt nyíró próbatest vizsgálatok kivitelezésére szabvány [4] áll rendelkezésre, az abban definiált próbatest geometria nem alkalmas arra, hogy a tiszta nyírást a teljes alakváltozási tartományban fenntartsa [5]. A probléma kiküszöbölésére napjainkban is folynak a kutatások, így újabb és újabb próbatest geometriák illetve vizsgálati módszerek kerülnek kifejlesztésre. Ezek közös jellemzője, hogy bonyolult próbatest geometriát alkalmaznak, így gyártásuk költség és időigényes folyamat. Korábbi kutatásaink során [6] [7] kifejlesztésre került egy olyan próbatest, mely egyszerűen megmunkálható geometriai elemeket tartalmaz – tehát gyártása költség és időhatékony – és a korszerű próbatesteknek megfelelő eredményeket ad. Jelen publikációban a már említett nyíró igénybevételi próbatest végeeselemes modellezésével történő fejlesztése során fellépő problémákat, és azok kiküszöbölésének módját ismertetjük. A vizsgálatokat, és a próbatest geometriai optimalizálását nagyszilárdságú 1 mm lemezvastagságú DP800 alapanyagban végeztük.

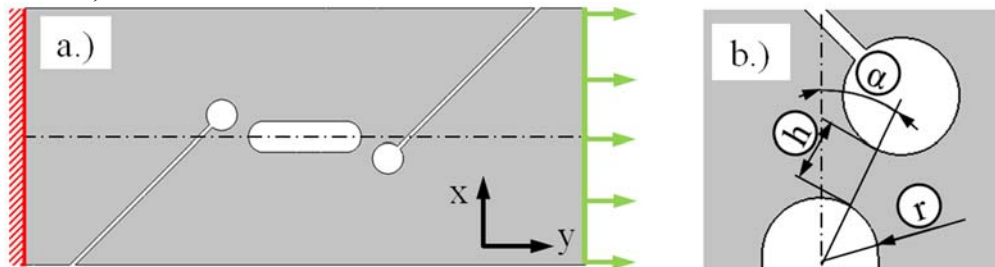
2. Próbatest fejlesztése végeeselemes modellezéssel

A szabványos próbatest rádiuszos kontúrú nyíró zónával rendelkezik, azonban ahogy ezt korábban is említettük ez a próbatest nem alkalmas a tiszta nyíró igénybevétel fenntartására a teljes alakváltozás során. Ennek oka, hogy a terhelés során fellépő oldal irányú erők a nyíró zóna tengelyét a terhelés tengelyéhez képest elfordítják [5]. A jelenség kiküszöbölésére a korszerű próbatest két nyíró zónával rendelkezik [8]. Az új nyíró próbatest geometriájának meghatározásához tehát első lépésben létrehoztunk egy olyan geometriát, amely a szabványosnak megfelelő köríves kontúr mellett két nyíró zónával rendelkezik. A célunk az volt, hogy megismerjük az új próbatest egyes geometriai elemeinek változtatásának a próbatest viselkedésére gyakorolt hatását, majd ezek alapján létrehoztunk egy olyan nyíró próbatestet, amely a teljes alakváltozási tartományban a lehető legjobban fenntartja a tiszta nyírás alakváltozási állapotát. A szimulációkat az Marc Mentat 2018 végeeselemes modellező szoftverben állítottuk össze, és futtattuk le.

A végeeselemes modellezés kritikus része az anyag rugalmas és képlékeny alakváltozási tulajdonságainak leírása. A rugalmas tulajdonságokat a rugalmassági modulus és a Poisson tényezővel adtuk meg. A képlékeny viselkedésének a leírásához a DP800 alapanyagból kimunkált lapos szakító próbatesteken végeztünk szabványos szakítóvizsgálatokat, majd felvettük a folyásgörbét. A szakítóvizsgálattal meghatározott értékeket a Swift és Hockett-Sherby modellek összekapcsolásával létrehozott, úgynevezett Swift-Hockett-Sherby approximációs összefüggés segítségével (1) extrapoláltuk.

$$\sigma = (1 - \alpha') \left\{ C (\varepsilon_p + \varepsilon_0)^m \right\} + \alpha' \left\{ \sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_i) e^{\alpha \varepsilon_p^p} \right\} \quad (1)$$

Ebben C a keményedési együttható, m a keményedési kitevő, ε_0 a képlékeny alakváltozás megindulásához tartozó érték, ε_p a képlékeny alakváltozás értéke, σ_{sat} az úgynevezett szaturációs feszültség, σ_i pedig a kezdeti folyáshatár. Mivel elsősorban a célunk a próbatestek alakváltozási tulajdonságainak meghatározása volt, károsodási modellektől ezekben a szimulációknál nem alkalmaztunk.

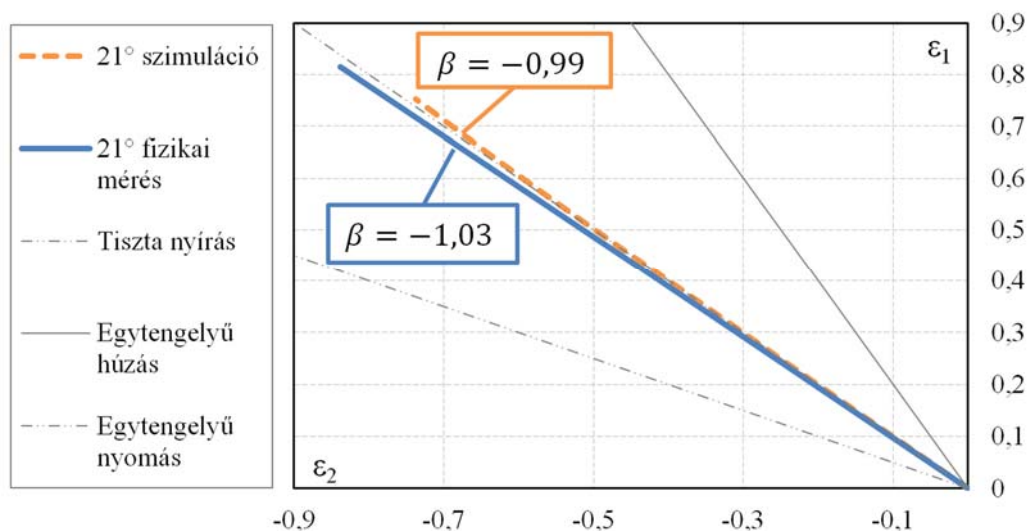


1. ábra a.) A szoftverbe importált geometria; b.) a vizsgált geometriai elemek

A szimuláció összeállítását az anyagmodell definiálása után az 1. ábra a.) részén szemléltetett próbatest geometria importálásával folytattuk. A kezdeti, szimulációk azt mutatták, hogy síkalakváltozást feltételezve a vastagság irányú feszültségkomponens hiányában a modellek nem reprezentálják megfelelően a tiszta nyírás alakváltozási állapotától való eltérést. Ennek megfelelően a valóságot tükröző, 1 mm vastagságú 3D próbatest modell került felépítésre a kontúrgeometria alapján. A próbatest hálózására nyolcsomópontú (téglatest) hálóelemet alkalmaztunk. Mivel az alakváltozás várhatóan csak a nyíró zónákra korlátozódik a lemez

síkjában, ezekben a tartományokban finomabb hálót alkalmaztunk, 0,08 mm élhosszúságú hálóelemekkel. A vastagság irányában – mivel jelentős alakváltozásra nem számítottunk – 8 hálóelemet alkalmaztunk. A próbatest egytengelyű húzó igénybevétellel történő terhelését – az ilyen jellegű vizsgálatok modellezésénél megszokott módon – a próbatest szélső csomópontjain definiált elmozdulás függvényekkel adtuk meg. A próbatest 1. ábra a.) részén pirossal jelölt oldalán a csomópontok elmozdulását 'x' illetve 'y' tengely irányában gátoltuk. A próbatest zölddel jelölt oldalán a csomópontok 'x' irányú elmozdulását gátoltuk, 'y' tengely irányában pedig 3 mm elmozdulást definiáltunk 300 lépésben.

A geometriai vizsgálatok lényegét az 1. ábra b.) része foglalja össze. Az egyes geometriai elemek módosításának a vizsgálatával elsősorban az alakváltozási tulajdonságokra gyakorolt hatásuk meghatározása volt a célunk. Ahhoz, hogy az egyes összefüggéseket a lehető legjobban megértsük egyszerre csak egy geometriai méretet változtattunk, a többit állandó értéken hagytuk. Az egyes változatok összevetését az alakváltozási útvonal (adott inkrementhez tartozó nagyobbik főalakváltozás értékének a kisebbik főalakváltozás függvényében történő ábrázolása), valamint a teljes terhelés logaritmikus főalakváltozás arányainak ($\beta = \Delta\varepsilon_2/\Delta\varepsilon_1$) az összevetésével végeztük. Első lépésben a furatátmérő változtatásának a hatását vizsgáltuk $r = 1,25 \dots 1,75$ mm tartományban. Az alakváltozási útvonalak és a főalakváltozások aránya azt mutatta, hogy a kisebb furatátmérő alkalmazása optimálisabb, mivel azzal a próbatest tovább tudja fenntartani a tiszta nyírást megközelítő alakváltozási állapotot. Figyelembe véve a későbbi gyártási lehetőségeket, a $r = 1,5$ mm-t választottunk a további vizsgálatokhoz. Második lépésben a nyíró zóna magasságát vizsgáltuk $h = 1,5 \dots 3$ mm tartományban. A furatnál tapasztaltakhoz hasonlóan a kisebb nyíró zóna magasság itt is tovább fenntartotta a tiszta nyírást állapotát. Figyelembe véve a későbbi optikai mérés alkalmazhatóságát, a nyíró zóna magasságát $h = 1,5$ mm-ben határoztuk meg. Utolsó lépésként a nyíró zóna terhelés tengelyével bezárt szögének hatását vizsgáltuk. Mind az óramutató járásával ellentétes, mind azzal megegyező irányban elforgatott nyíró zónával végeztünk szimulációkat ($\alpha = \pm 0 \dots 30^\circ$). A szimulációk eredményei azt mutatták, hogy a főalakváltozások arányát, tehát a béta értéket ennek a paraméternek a változtatása befolyásolja leginkább. Az óramutató járásával ellentétes forgatás esetén az alakváltozási útvonalak inkább az egytengelyű húzás, az óramutató járásával megegyező forgatás (túlforgatás) esetén inkább az egytengelyű nyomás irányában tértek el a tiszta nyírástól. A próbatest optimalizálását a továbbiakban ennek az értéknek a változtatásával hajtottuk végre. Az optimalizálás célja a tiszta nyírásnak legmegfelelőbb alakváltozási útvonal, valamint a teljes alakváltozásra vonatkozó $\beta = -1$ érték elérése volt a cél. Az optimalizálás eredményét, a 21° -kal túlforgatott próbatest alakváltozási útvonalát és főalakváltozás értékeinek arányát a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra A szimulációval és a fizikai mérésekkel felvett alakváltozási útvonalak és a főalakváltozások arányai

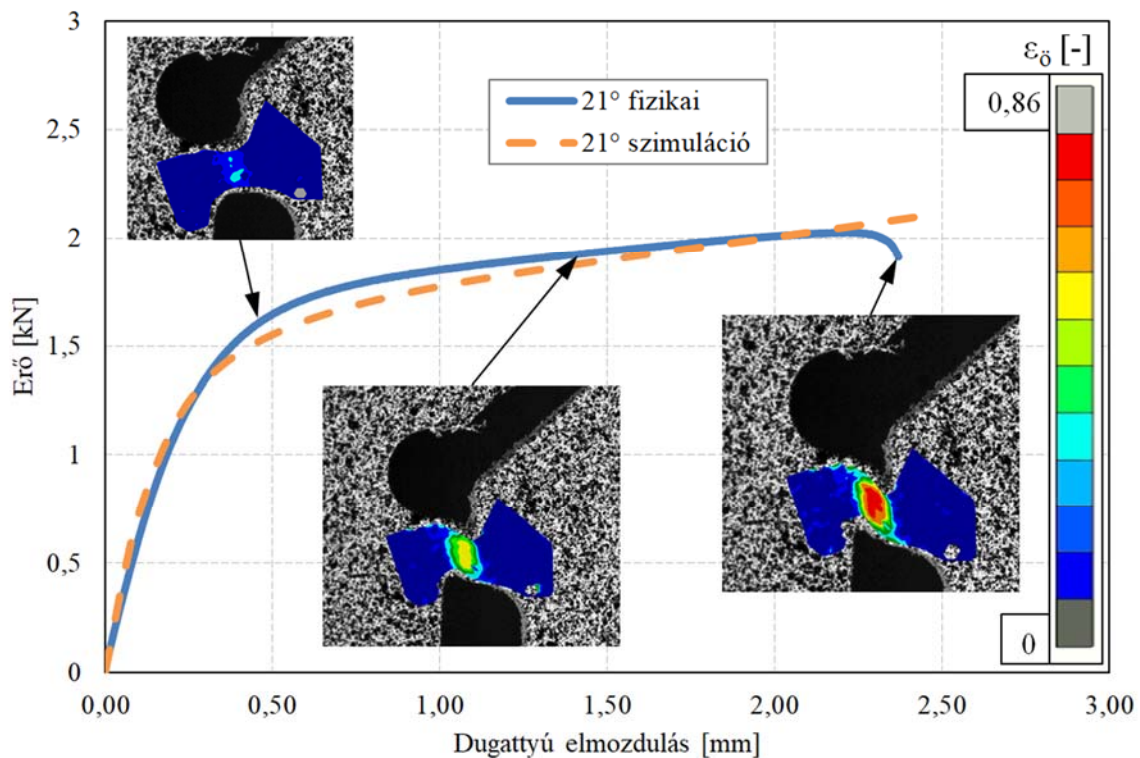
A végeselemes modellezés alapján legyártásra kerültek az új fejlesztésű nyíró igénybevételi próbatestek. A próbatestek egy Instron E10000 biaxiális elektro-dinamikus berendezésben vizsgáltuk, 0,2 mm/min terhelés mellett szakadásig terhelve. Az alakváltozást a megfelelő felületi előkészítés (festékpontok felvitele) után GOM Aramis rendszerrel vizsgáltuk, a terhelés növekményével változó 5-15 FPS képfelvételi sebességgel. A GOM Aramis rendszer a felületre felvitt festék pontjainak elmozdulása alapján automatikusan számítja az alakváltozás értékeit. Az egyes lépésekhez tartozó főalakváltozásokat, összevetve a szimuláció eredményeivel a 2. ábra szemlélteti. Az ábrán látható, hogy a fizikai mérések eredményei és a végeselemes

modellezés eredményei nem fedik teljesen egymást. A fizikai mérések során a főalakváltozások aránya $\beta = -1,03$ volt, amely eltér a célként meghatározott -1 értéktől. A nyírózó zóna terhelés tengelyével bezárt szögének vizsgálata azt mutatta, hogy minél nagyobb a túlforgatás, az alakváltozás annál inkább az egytengelyű nyomó igénybevétel irányába mozdul el. A fizikai mérések alapján a próbatest nyírózó zónájának végeeselemes modellezéssel optimalizált szöge nem megfelelő, a tiszta nyírástól való eltérése irányából kiindulva kisebbnek kellene lennie.

3. A szimuláció módosítása a fizikai mérések alapján

Képlékeny alakváltozás végeeselemes modellezése esetén ahhoz, hogy meghatározzuk a fizikai mérések és a szimulációk közötti különbségeket, először össze kell hasonlítani a mérési eredményeket, és elemezni kell az azok közötti különbséget. Ha ezzel a módszerrel nem lehet meghatározni egyértelműen az eltérés okát, a teljes terheléstörténet összehasonlítása szükséges további szempontok szerint.

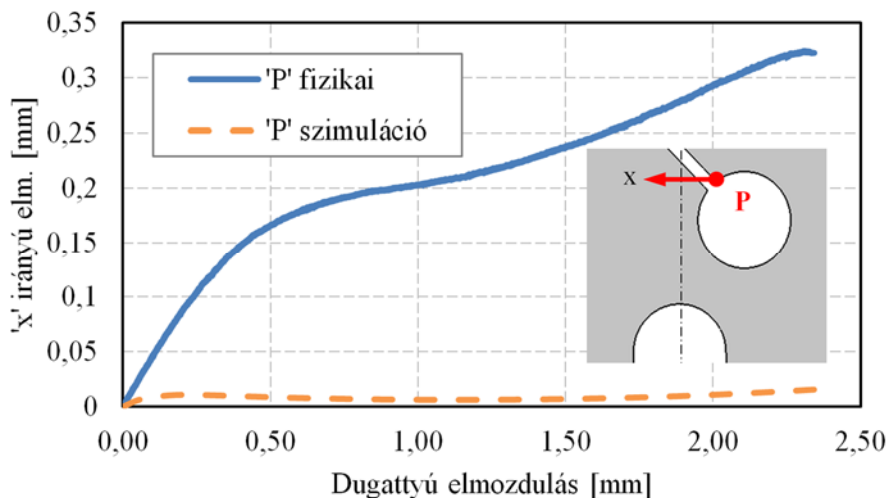
A szimulációk valóságnak való megfeleltetésére elterjedten alkalmazzák az erő- elmozdulás diagramok összevetését. A 3. ábrán egy a fizikai mérések során felvett jellemző erő-elmozdulás diagramot hasonlítunk össze a szimulációval meghatározott diagrammal. Az ábrán látható, hogy a fizikai és szimulációs erő-elmozdulás összefüggések jellegre megegyeznek. Jelentősebb eltérés a rugalmas tartomány végén, a képlékeny alakváltozás kezdetén figyelhető meg. Az alakváltozási útvonal és a nyírózó zóna terhelés tengelyével bezárt szöge között, ahogy arra már korábban rámutattunk egyértelmű kapcsolat van. A 3. ábrán szemléltettük a nyírózó zónák alakváltozásának eloszlását is az alakítás egyes stádiumaiban. Az alakváltozások mértékét az ábra jobb oldalán látható színskála jelöli a $0 \dots 0,86$ összehasonlító alakváltozási tartományban. A felvételek azt mutatják, hogy a rugalmas alakváltozás tartományában a nyírózó zóna terhelés tengelyével bezárt szöge változik, ennek megfelelően a tény, hogy pont ebben a tartományban van jelentősebb eltérés az erő-elmozdulás értékek között, alátámasztja az alakváltozási útvonalak különbségét.



3. ábra A fizikai és végeeselemes modellezés során kapott erő- dugattyúelmozdulás értékek

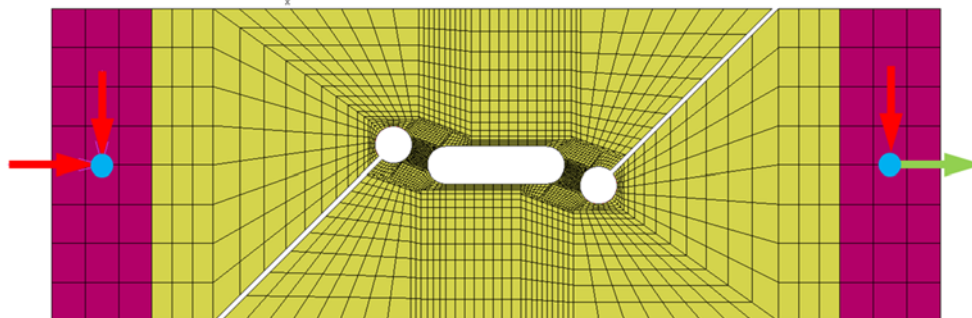
Bár az egyes erőértékek összehasonlítása alátámasztotta az alakváltozási útvonalnál megfigyelt eltérést, annak okát nem magyarázta, ezért a hiba okának meghatározását az alakváltozási folyamat teljes tartományának összehasonlításával folytattuk. Először megvizsgáltuk az alakváltozások eloszlásának változását a teljes folyamat során, de karakteres eltérést nem figyeltünk meg, ezért továbbhaladva elemeztük a próbatest viselkedését a vizsgálat során, azaz az egyes kitüntetett pontjainak elmozdulását. A fizikai mérések során feltűnő volt, hogy a próbatest egyes részei oldal irányban is elmozdulnak. Az oldal irányú elmozdulások számszerű meghatározásához a növekvő elmozdulás értékek összefüggésében a próbatesten kialakított furat egy definiált pontjának (4. ábra pirossal jelölt pont) pozíciójának változását vizsgáltuk a terhelés során. A 4.

ábra összehasonlítja a fizikai mérések során vizsgált próbatetest és a szimulációval vizsgált próbatestet az ábrán jelölt kitüntetett pontjának az elmozdulását a dugattyúelmozdulás összefüggésében. Az ábrán egyértelműen látható, hogy amíg a fizikai méréseknél alkalmazott próbatestet meghatározott pontja a terhelés növekedésével egyre inkább elmozdul a kezdeti állapotától, addig a végelesemes modellezéssel vizsgált próbatestet azonos pontja lényegében tartja a pozícióját.



4. ábra A próbatestet egy meghatározott pontjának elmozdulása a terhelés során

A fizikai mérések során tehát az oldal irányú erők hatására oldal irányú elmozdulások jönnek létre a próbatestet kontúrján. Mivel a próbatesten (a nyíró zónán kívüli tartományban) sem meghatározó rugalmas, sem képlékeny alakváltozást nem lehetett megfigyelni a terhelés során, arra következtettünk, hogy a próbatestet megfelelően merev marad, és a befogópofák fordulnak el a lemez síkjára merőleges tengely körül.



5. ábra Az új szimuláció módosított terheléssel

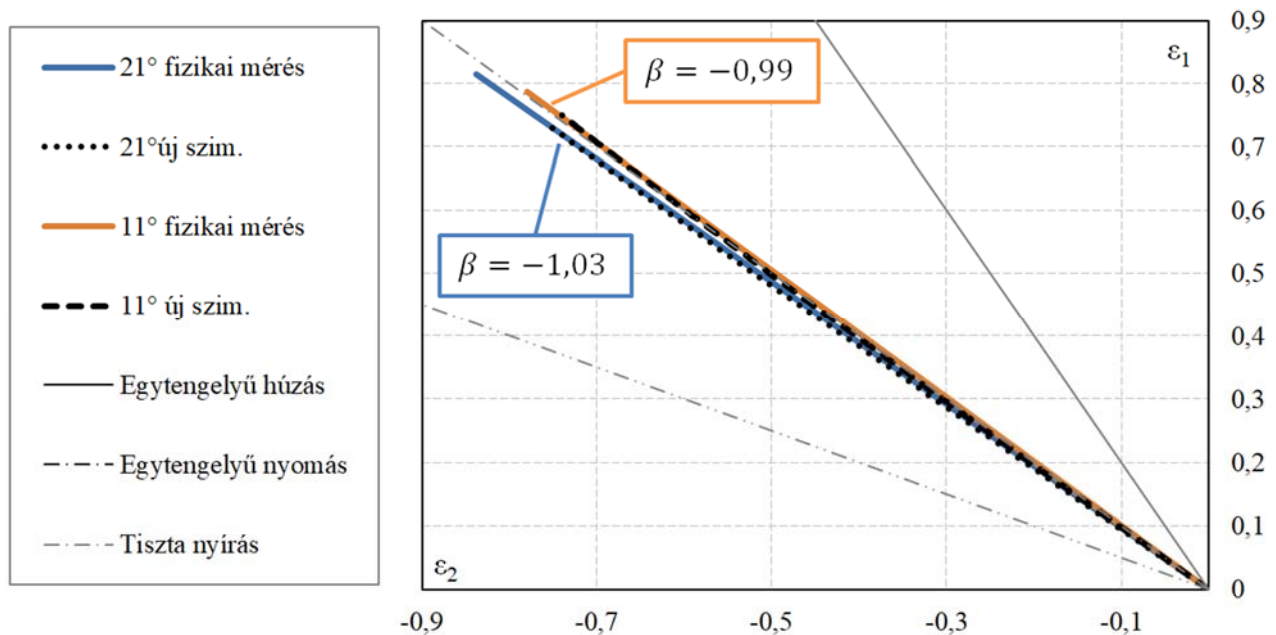
Összefoglalva, a fizikai mérések és a szimulációk közötti különbségeket tehát az eltérő terhelésmód okozta. Az eredeti szimulációt tehát úgy kellett módosítani, hogy az megfelelően vissza tudja adni a befogópofák esetleges elfordulását. Ennek egy megoldását szemlélteti az 5. ábra melyen látható, hogy az eredeti összeállítást kiegészítettük két olyan síkkal modellezett befogópofával, amelyek képesek a síkjukra merőleges tengely körüli elfordulásra középpontjuk (az ábrán kékekkel jelölt pontok) körül. A terhelés definiálása az adott forgatási középpontban az ábrán látható módon történt (piros nyíllal jelöltük azokat az irányokat, amelyekben az elmozdulás gátolva volt, és zölddel azt az irányt, amelyben az elmozdulást definiáltuk).

4. Eredmények és összefoglalás

A 21°-os próbatesten a szimulációkat az előző fejezetben ismertetett módszerrel (az elfordulásában nem gátolt befogópofákkal történő terheléssel) újrafuttattuk. Az eredményeket a 6. ábra szemlélteti. Ahogy az várható volt, az új szimulációk a 21°-os próbatesten megfelelő korrelációt mutatnak a valósággal, a főalakváltozások aránya mind a két esetben $\beta = -1,03$ volt.

Mivel a célunk egy új, megfelelő nyíró igénybevételi próbatestet megtervezése volt, így a 2. fejezetben ismertetett vizsgálatsorozatot ismételt elvégeztük. Első lépésben megvizsgáltuk, hogy az egyes geometriai paraméterek változtatása során megfigyelt – a nyíró zóna magasságára, szélességére, illetve terhelés

tengelyével bezárt szögére vonatkozó – összefüggéseket hogyan befolyásolja az új szimulációs technika. Azt az eredményt kaptuk, hogy bár az alakváltozási útvonalak (és a főalakváltozások aránya) eltér a szimuláció megváltoztatásával, a levont következtetések (a kisebb zónamagasság és szélesség tovább fenntartja a tiszta nyírás alakváltozási állapotát és a nyírózó zóna terhelés tengelyével bezárt szöge befolyásolja leginkább a főalakváltozások arányát) ebben az esetben is helytállóak. Ezen tulajdonságok ismeretében újra optimalizáltuk a próbatestet, ismételten a nyírózó zóna terhelés tengelyével bezárt szögének változtatásával.



6. ábra Alakváltozási útvonalak és a főalakváltozások aránya a 21° és a 11° próbatestek szimulációja és fizikai mérése esetén

Az új szimulációval végzett optimalizálás eredményeként kapott 11°-os próbatest alakváltozási útvonalát a 6. ábra szemlélteti. Az új szimuláció eredményeire alapozva legyártásra kerültek az új optimalizált próbatestek, majd a vizsgálatukat az előzőekben leírtaknak megfelelően hajtottuk végre. Az új próbatest esetében már nem volt az előzőekben megfigyelhető eltérés a fizikai mérések és a végeelemes modellezések eredményei között.

Összefoglalva tehát azt a következtetést lehet levonni, hogy végeelemes modellezéssel tervezett és optimalizált nyíró igénybevételi próbatestek esetén figyelembe kell venni a fizikai mérés sajátosságait, ugyanis minimális eltérés (ebben az esetben a befogópofák 0,5°-nál kisebb, lemez síkjára merőleges elfordulása) is jelentős különbségeket eredményezhet.

Irodalmi hivatkozások

- [1] Keeler, S.P., 1961. *Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches* (Ph.D. thesis). Massachusetts Institute of Technology, Boston.
- [2] Goodwin, G.M., 1968. *Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop*. Soc. Autom. Eng. (680093), 380–387. <https://doi.org/10.4271/680093>
- [3] M. Gorji, B. Berisha, N. Manopolo, P. Hora; *Effect of through thickness strain distribution on shear fracture hazard and its mitigation by using multilayer aluminium sheets*; Journal of Materials Processing Technology 232 (2016) 19–33; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.014>
- [4] ASTM Standard B 831-05 *Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products*. ASTM International, West Conshohocken, PA, doi:10.1520/B0831-05, www.astm.org.
- [5] A. Brosius, Q.Yin, A. Güner, and A.E. Tekkaya *A new shear test for sheet metal characterization*, steel research int. 82 (2011) No.4 DOI: 10.1002/srin.201000163
- [6] V. Gál, Zs. Lukács: *A new specimen for investigating shear fracture strain*; 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1157 012060 DOI 10.1088/1757-899X/1157/1/012060
- [7] Gál V., Lukács Zs., Béres L., Kovács P. Z.; *Nagyszilárdságú acélok törésig elviselt nyíró alakváltozásának vizsgálata*; XXX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia- OGÉT 2022;
- [8] Till, E., Hackl, B., 2013. Calibration of plasticity and failure models for AHSS sheets. In: Proceedings of the International Deep Drawing Research Conference IDDRG 2013