

Egypontos inkrementális lemezalakítás végelelemes szimulációval történő vizsgálata

Investigation of single point incremental sheet forming using finite element simulation

BONCZ Dávid, MSc hallgató, BALÁZS Barnabás Zoltán, PhD, egyetemi adjunktus

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -technológia Tanszék, H-1111, Budapest, Műegyetem rakpart 3., Tel.: +36 1 4632641, E-mail: bonczdavid@edu.bme.hu, balazs.barnabas.zoltan@gpk.bme.hu, Honlap: www.manuf.bme.hu

Abstract

Incremental sheet forming offers a flexible alternative to conventional stamping processes, particularly in the areas of prototyping and custom manufacturing. A fundamental prerequisite for the widespread industrial adoption of this technology is the accurate prediction of processes using finite element simulations, thereby minimizing the number of costly physical trials. The aim of this research is the development and investigation of single-point incremental forming in the Ansys LS-Dyna environment, as well as the validation of the model based on previous experimental results. During the study, the forming of symmetric and asymmetric truncated cone geometries was analysed. The results indicate that by choosing a suitable material model and precisely defining the boundary conditions, the simulation provides a good approximation of the actual forming forces and wall thickness reduction.

Keywords: Incremental Sheet Forming, Finite Element Simulation, Ansys LS-Dyna, Forming Force

Kivonat

Az inkrementális lemezalakítás rugalmas alternatívát kínál a hagyományos sajtolási eljárásokkal szemben, különösen a prototípus és egyedi gyártás területén. A technológia széleskörű ipari elterjedésének egyik alapvető feltétele a folyamatok pontos előrejelzése végelelemes szimulációk segítségével, minimalizálva ezzel a költséges fizikai próbák számát. A kutatás célja az egypontos inkrementális alakítás Ansys LS-Dyna környezetben történő létrehozása és vizsgálata, valamint a modell validálása korábbi kísérleti eredmények alapján. A vizsgálat során szimmetrikus és aszimmetrikus csonkakúp geometriák alakítását elemeztük. Az eredmények azt mutatják, hogy megfelelő anyagmodell választása és a peremfeltételek precíz definiálása esetén a szimuláció jól közelíti a valós alakítási erőket és a falvastagság-csökkenést.

Kulcsszavak: inkrementális lemezalakítás, végelelemes szimuláció, Ansys LS-Dyna, alakítóerő

1. BEVEZETÉS

Napjaink ipari környezetében a kis szériás és egyedi alkatrészek gyártása iránti igény folyamatosan növekszik. Az egypontos inkrementális lemezalakítás (Single Point Incremental Forming – SPIF) egy olyan innovatív képlékenyalakítási eljárás, amely nem igényel költséges, dedikált szerszámokat, mint például a hagyományos mélyhúzásnál a bélyeg és a matrica, csupán egy egyszerű, gömb vagy lekerekített végű alakítószerszámot és egy CNC vezérlésű gépet [1, 2]. Az eljárás során a szerszám egy előre meghatározott pályán mozogva, lokális deformációval hozza létre a kívánt geometriát. Bár a technológia rugalmassága kiemelkedő, a folyamat során fellépő dinamikai hatások, a visszarugózás és a lemez jelentős elvékonyodása kihívást jelent a pontos geometria és a megfelelő minőség elérésében [1, 2].

A modern gyártástervezéshez elengedhetetlen a folyamatok végelelemes (FE) szimulációja, amely lehetőséget ad a hibajelenségek, például szakadás, gyűrődés, nem kívánt vékonyodás és a fellépő alakítási erők előrejelzésére fizikai kísérletek nélkül. A szakirodalom számos megközelítést ismer az inkrementális lemezalakítás modellezésére, azonban a nagy deformációk és a komplex kontaktproblémák miatt az explicit dinamikai megoldók alkalmazása a legcélravezetőbb. Jelen kutatás célja egy olyan megbízható szimulációs

modell felépítése Ansys LS-Dyna környezetben, amely képes megfelelő pontossággal becsülni az alakítási erőket és a falvastagság elvékonyodását. A validáláshoz korábbi, a BME Gyártástudomány és -technológia Tanszékén végzett kísérleti mérési adatokat használtunk fel szimmetrikus és aszimmetrikus geometriák esetén [3].

2. KÍSÉRLETI ÉS SZIMULÁCIÓS KÖRÜLMÉNYEK

2.1. Referencia kísérletek

A szimulációs modell validálásához szimmetrikus és aszimmetrikus csonkakúp geometriájú referencia kísérleteket használtunk fel. A folyamat mindkét esetben egy KONDIA 640B típusú, 3 tengelyes CNC megmunkálóközponton történt. A munkadarab anyaga 0,22 mm vastagságú AlMn1Mg1 alumíniumötvözet volt, amely kiváló alakíthatósága miatt gyakori alapanyag a lemezalakítási kísérleteknek. A folyamat során egy 8 mm átmérőjű, félgömb végződésű acél szerszám került felhasználásra. A kísérletek során alkalmazott technológiai paramétereket az 1. táblázat foglalja össze.

A kísérletek és a szimuláció technológiai paraméterei

1. táblázat

Paraméter	Érték
Előtolási sebesség (v_f)	1500 (mm/perc)
Főorsó fordulatszáma (n)	2000 (1/min)
Fordulatonkénti süllyedés (d_z)	0,1 (mm)
Falferdeségi szög (α)	45°
Geometria mélysége (H)	20 (mm)
Alapkör sugara (R_{top})	30 (mm)

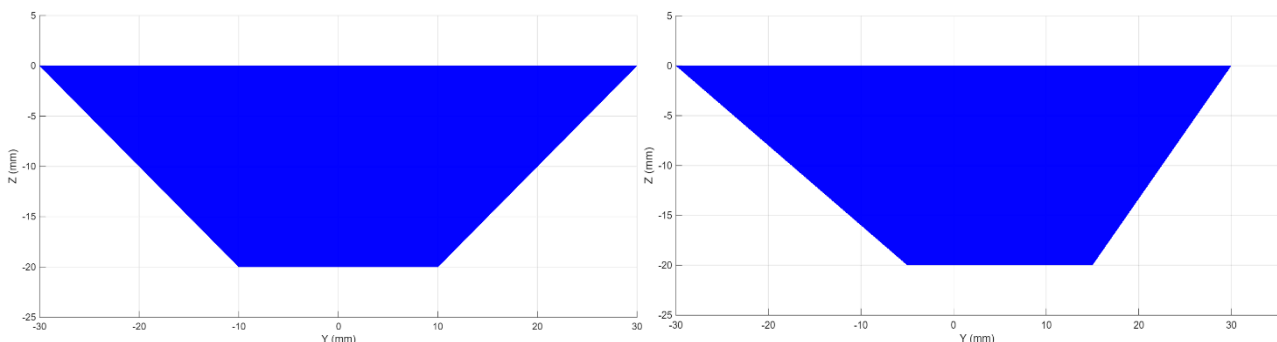
A kísérleti elrendezés során az erőmérést egy Kistler 9257B típusú piezoelektromos erőmérő berendezéssel történt. A szenzor analóg jeleinek erősítését egy Kistler 5070A típusú berendezés végezte. Az adatgyűjtésről pedig egy NI USB-4431 dinamikus jelgyűjtő modul gondoskodott. Ez a mérési lánc lehetővé tette a három erőkomponens (F_x , F_y , F_z) nagy pontosságú rögzítését, amely elengedhetetlen a szimulációs eredmények validálásához [3].

2.2. A szimulációs modell felépítése

A numerikus vizsgálatokat az Ansys Workbench LS-Dyna moduljában végeztük. Az LS-Dyna egy explicit időintegrálási sémát alkalmazó megoldó, amely kiválóan alkalmas a rövid idejű, nagy deformációval, nemlinearitással és komplex kontaktokkal járó folyamatok, így az SPIF vizsgálatára is [4].

Szerszám pálya generálása

Az inkrementális lemezalakítás során a szerszám mozgáspályája alapvetően határozza meg a létrejövő geometriát. A végeleemes szimulációhoz a szerszám pozíciójának pontos időbeli megadására volt szükség. Mind a szimmetrikus, mind az aszimmetrikus geometriához a szerszám pályát a MATLAB program segítségével generáltuk le. Az aszimmetrikus esetben a csonkakúp alsó körét az 1. ábrán látható módon, az Y tengely szerint 5 mm-el toltuk el. A program a technológiai paraméterek alapján diszkrét pontokban, közvetlenül az idő függvényében számította ki a szerszám térbeli (X, Y és Z) koordinátáit. A legenerált adathalmazt a megfelelő formátumú táblázatos formában mentettük ki, ezáltal közvetlenül beilleszthető volt az Ansys környezetbe.



1. ábra. Szimmetrikus és aszimmetrikus geometriák

Anyagmodell

Az anyagmodell helyes megválasztása a szimuláció pontosságának egyik legfontosabb tényezője. A szimulációk során a *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY* modellt alkalmaztuk, amely lehetővé teszi a képlékeny viselkedés pontos leírását tetszőleges feszültség-alakváltozás görbe megadásával. Mivel a kísérletben használt *AlMn1Mg1* ötvözethez nem állt rendelkezésre közvetlen adat, ezért az anyagmodell felállításakor kettő forrásra támaszkodtunk. Az első a szakirodalomban fellelhető, anyagvizsgálatok során mért jellemzők, a másik pedig a Holomon-elv alkalmazása volt. Ezáltal a szakirodalomban fellelhető anyagok közül az *Al-3Mg*, míg a Holomon elv alkalmazásával az *AlMn1* és *AlMg3* anyagokat használtuk fel. A szimulációk során így nem csak a kísérleti, hanem a különböző anyagokkal kapott eredményeket is össze tudtuk hasonlítani [5].

Peremfeltételek és Kontakt

A lemez széleit *Fixed Support* peremfeltétellel rögzítettük, a deformálódó zóna határán pedig *Displacement* kényszert alkalmaztunk, amellyel gátoltuk a Z irányú elmozdulást és engedve a lemez síkjában történő deformálódást, anyagáramlást. A szerszámot merev testként kezeltük, amelynek mozgását a Matlab-ban generált spirálpálya koordinátái vezérelték a *Remote Displacement* peremfeltétel segítségével.

A szerszám és a lemez közötti kapcsolatot *Frictional* (súrlódásos) kontaktként definiáltuk. A súrlódás csökkentése érdekében az alakítás megkezdése előtt a lemez be lett olajozva, ezáltal a szakirodalom alapján a statikus súrlódási együtthatót $\mu_s = 0,08$ (-), a dinamikust $\mu_d = 0,05$ (-) értékre állítottuk. A kontakt algoritmusát *Augmented Lagrange* típusúra állítottuk a penetráció elkerülése és a stabilabb megoldás érdekében [4].

Geometria és háló

A szerszámot és az előgyártmányt, azaz az alumíniumötvözet lemezt, felületmodellként definiáltuk az Ansys SpaceClaim moduljában. A 80 x 80 mm-es lemezmodell közepső, 70 mm átmérőjű kör alakú tartománya képezte a deformációs zónát. A lemezt *Fully Integrated Shell Element* (teljesen integrált héjelem) típussal modelleztük, amely a vastagság mentén 7 integrációs ponttal rendelkezik. Ez a beállítás kritikus a hajlítási és visszarugózási jelenségek, valamint a falvékonyodás pontos követéséhez. A végeelemes háló négyszög elemekből épült fel, *MultiZone* hálózási módszerrel. A számítási igény és a pontosság kompromisszumaként egy közepes sűrűségű hálót alkalmaztunk (kb. 3700 elem, 3835 csomópont), amely a validációs tesztek alapján megfelelőnek bizonyult az erők becsléséhez. A szerszámot 0,5 mm-es hálómérettel láttuk el [4, 5].

Megoldó beállításai

Az SPIF folyamatok valós ideje (percek) túl hosszú az explicit szimulációk számára, amelyek jellemzően milliszekundumos tartományban hatékonyak. Ezért a számítási idő csökkentése érdekében időskálázást (*Time Scaling*) alkalmaztunk, valamint tömegskálázást (*Mass Scaling*) is bevetettünk. Előbbi esetén a folyamat valós idejét a 48-ad részére csökkentettük, utóbbit alapbeállításon hagytuk. Ezen technikák alkalmazásánál kiemelt figyelmet fordítottunk arra, hogy a dinamikus hatások ne torzítsák el az eredményeket [5].

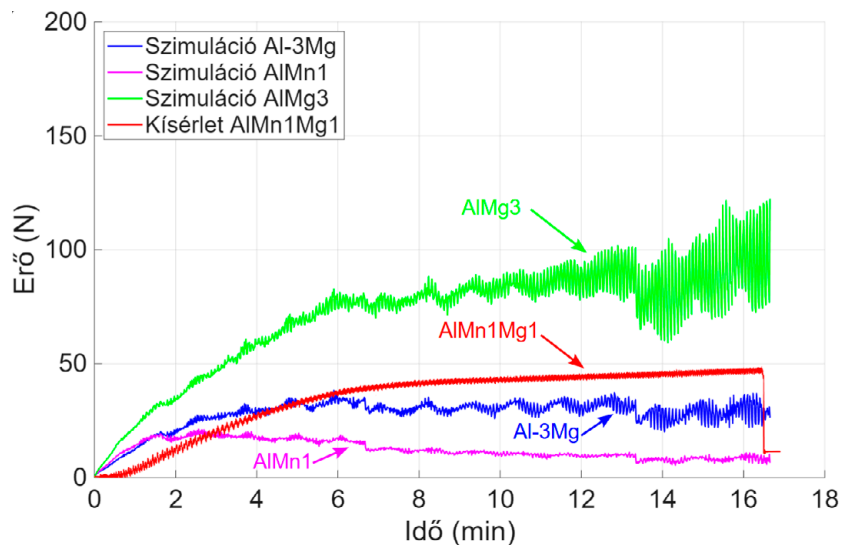
3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

A szimuláció futtatásához egy 4 magos számítógépet használtunk, így a számítási idő nagyjából 3 napot vett igénybe. A kiértékelésnél a diagrammok elkészítéséhez a Matlab, míg a szimulációs modell vizsgálatához az Ansys LS-PrePost programot használtuk.

3.1. Alakítóerők vizsgálata

A szimmetrikus geometria esetén a tengelyirányú (F_z) erők összehasonlítását az 2. ábra mutatja. Látható, hogy az *Al-3Mg* anyagmodell közelíti meg legjobban a kísérleti értékeket, melyek a folyamat végén majdnem elérték az 50 N erőt. Az anyagjellemzőket figyelembevéve a várt eredménykét kaptuk, hiszen az *AlMg3* esetében kaptuk a legmagasabb, míg az *AlMn1* esetében a legalacsonyabb erőket. A szimulációs eredmények lefutása alapvetően hasonló, de az amplitúdók az anyagoktól függően eltérő nagyságúak. A tengelyirányú erők (F_z) időbeli lefutásában megfigyelhető egy eltérés. A szimulált görbék a folyamat elején progresszívebb,

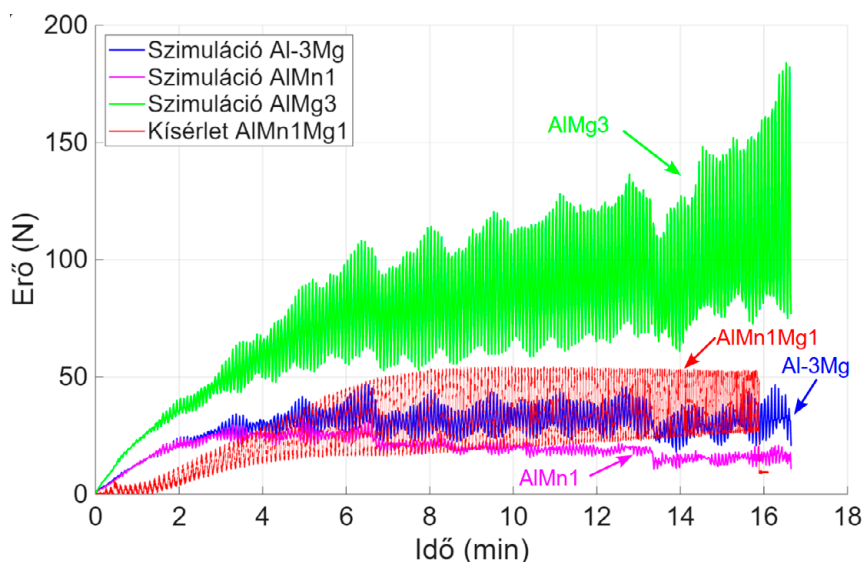
meredekebb növekedést mutatnak, mint a valós mérés. Ennek lehetséges oka a szimulációban alkalmazott időskálázás lehet, amely a kezdeti transziens szakaszt befolyásolja.



2. ábra. Tengelyirányú (F_z) erők összehasonlítása szimmetrikus geometria esetén

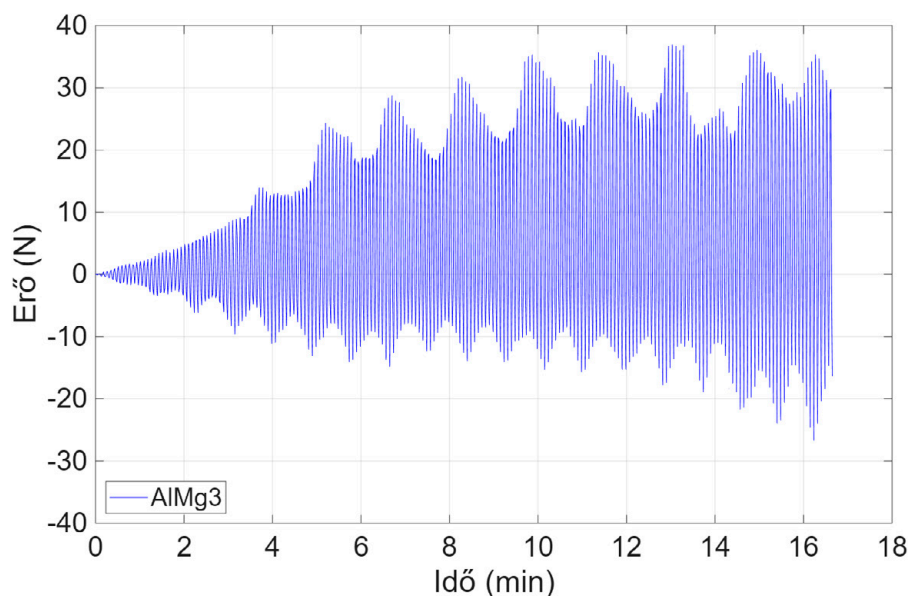
A síkbeli erők (F_x , F_y) esetében a szimuláció jól követte a kísérleti adatok periodikus jellegét, nagyságrendileg 15–25 N közötti értékeket adva. Hasonlóan a Z-irányú erőkhöz az alakítási folyamat vége felé a görbék kis mértékű csökkenést mutatnak.

A 3. ábrán az aszimmetrikus geometria tengelyirányú erőinek összehasonlítása látható. Az erők amplitúdója a vártak megfelelően megnövekedett. A szimuláció helyesen jelezte előre, hogy a geometria meredekebb oldalán, ahol a falferdeségi szög a tengelyeltolás miatt lokálisan nagyobb, nagyobb alakítóerők ébrednek, mint a lankásabb oldalon. Ennek következtében az alakítási erők is nőttek. Az aszimmetrikus esetben is az *Al-3Mg* anyaggal futtatott szimulációval kaptuk a legközelebbi eredményeket. A szimulációval kapott eredmények kisebb amplitúdójúak, de szinte végig a kísérleti eredményekkel együtt fut és hasonlóan nagyjából 10%-ot növelt a nagyságukat. Az *AlMg3* esetében jóval nagyobb amplitúdót és erő növekedést tapasztaltunk, amit az elérő anyagjellemzőkre lehet visszavezetni.



3. ábra. Tengelyirányú (F_z) erők összehasonlítása aszimmetrikus geometria esetén

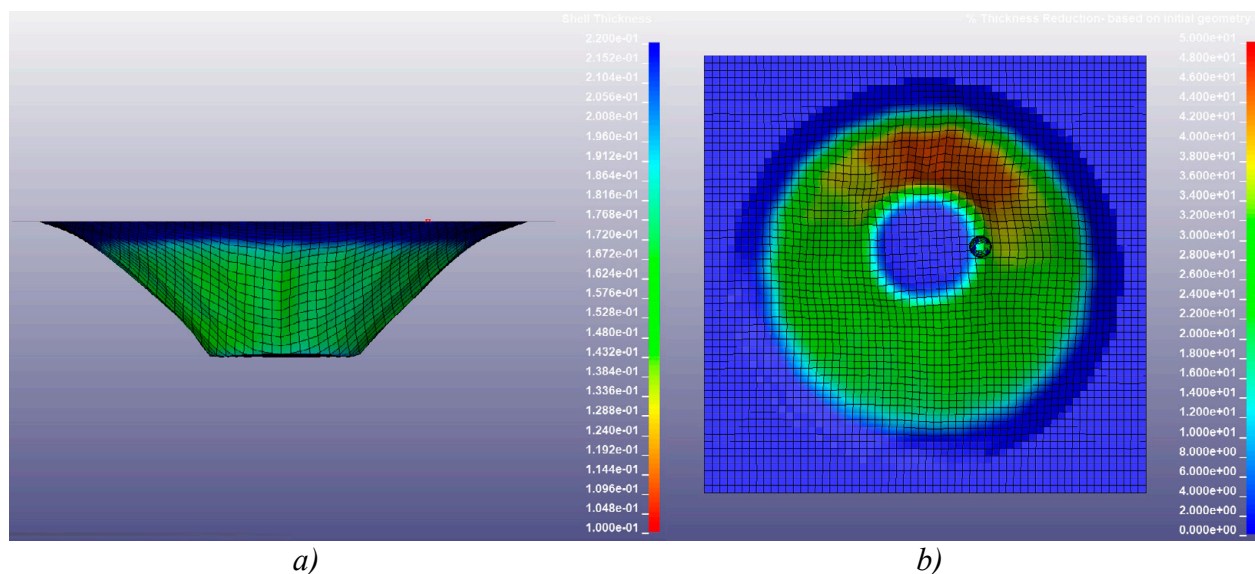
A síkbeli erők (F_x , F_y) az aszimmetrikus esetben kissé eltérnek egymástól. Az X-irányú erők jó közelítéssel megegyeznek a szimmetrikus geometriával kapottakkal, de az Y-irányú erők a geometria sajátossága miatt aszimmetrikus jelleget mutatnak. A periodikus görbe így az egyik irányba nagyobb amplitúdójú, mint a másokban. A minél jobb szemléltetés érdekében a 4. ábrán az *AlMg3* Y-irányú szimulációs eredményei láthatóak.



4. ábra. Aszimmetrikus geometriával kapott Y-irányú erők AlMg3 anyagmodellel

3.2. Falvastagság-eloszlás elemzése

Az SPIF eljárás egyik kritikus korlátja a lemez jelentős elvékonyodása, amely szakadáshoz vezethet. A szimulációs eredmények lehetőséget adtak ennek részletes vizsgálatára. A szimmetrikus kúp esetén a kezdeti 0,22 mm-es vastagság a falakon kb. 0,14–0,15 mm-re csökkent, ami 30–35%-os vékonyodást jelent (5/a. ábra).



5. ábra. Szimulációs eredmények. a) Anyagvastagság változása metszetben szimmetrikus geometria esetén; b) Aszimmetrikus geometria százalékos anyagvastagság-eloszlása

Az aszimmetrikus geometria vizsgálata során (5/b. ábra) a szimuláció kimutatta, hogy az eltolás irányában, ahol a palást meredekebb, a vékonyodás mértéke eléri a 40–45%-ot (kb. 0,12 mm-re vékonyodik), míg a lankásabb oldalon csak 25–30%-os a csökkenés.

Hasonló geometrián végzett vizsgálatoknál a kezdeti 0,6 mm-es vastagsághoz képest a legkritikusabb pontokon megközelítőleg 0,329 mm-re csökkent falvastagság, ami közel 45%-os vékonyodást jelent. A kísérlet során Al 1050 alumínium ötvözetet használtak és hasonló megmunkálási paramétereket, valamint kissé mélyebb geometriát [6]. Az eredmény összhangban van az elméleti várakozásokkal és igazolja a modell geometriai előrejelző képességét. A felületen látható kisebb egyenetlenségek ("ráncosodás") a közepes sűrűségű hálóra vezethetők vissza, finomabb hálózással simább felület lenne elérhető, ám ez drasztikusan növelné a futási időt.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során sikeresen felépítettünk és validáltunk egy végeselemes modellt az egyponthoz inkrementális lemezalakítás vizsgálatára. A munka során elért főbb eredmények:

- Az LS-Dyna explicit megoldója és a felépített modell alkalmasnak bizonyult a nagy deformációval járó SPIF folyamat szimulálására.
- Az anyagmodell kiválasztása kritikus a pontosság szempontjából: az Al-3Mg anyagmodell adta a legközelebbi eredményeket a kísérleti adatokhoz képest, míg a Hollomon-törvénnyel közelített modellek nagyobb eltérést mutattak.
- A szimuláció helyesen jelezte előre az aszimmetrikus geometriáknál fellépő egyenetlen terhelést: az aszimmetrikus geometriánál a meredekebb oldalon mért nagyobb erőket és a lokálisan 40-45%-ot is elérő elvékonyodást.
- A modell alkalmas a technológiai paraméterek optimalizálására, amivel csökkenthető a költséges fizikai kísérletek száma.

A jövőbeni kutatások során az időskálázás csökkentésével vagy elhagyásával és a végeselemes háló további sűrítésével (adaptív hálózás) a geometriai pontosság (pl. ráncosodás, visszarugózás) előrejelzése tovább javítható.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával, a 2020-1.2.3-EUREKA-2022-00026 számú projekt keretében valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Sherwan Mohammed Najm, Imre Paniti, 'Investigation and machine learning-based prediction of parametric effects of single point incremental forming on pillow effect and wall profile of AlMn1Mg1 aluminum alloy sheets', *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14 September 2022, doi.org/10.1007/s10845-022-02026-8
- [2] Tomasz Trzepieci, Sherwan Mohammed Najm, Valentin Oleksik, Delia Vasilca, Imre Paniti and Marcin Szpunar, 'Recent Developments and Future Challenges in Incremental Sheet Forming of Aluminium and Aluminium Alloy Sheets', 9 January 2022, doi.org/10.3390/met12010124
- [3] J. Naranjoa, V. Miguela, A. Martínez-Martínez, L.M. Gómez-López, M.C. Manjabacasa, J. Coelloa, 'Analysis and simulation of Single Point Incremental Forming by ANSYS®', 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.602
- [4] Ansys LS-Dyna manual Vol I-III, 21 March 2025, Elérhetősége: <https://lsdyna.ansys.com/manuals-download>, [Elérés dátuma: 2025.11.09.]
- [5] Javier León, Carmelo J. Luis, Juan P. Fuertes, Ignacio Puertas, Rodrigo Luri and Daniel Salcedo, 'A Proposal of a Constitutive Description for Aluminium Alloys in Both Cold and Hot Working', Article, 17 October 2016, doi:10.3390/met6100244
- [6] Tisza, M., Panity, I., Kovács, P. Z., 'Experimental and Numerical Study of a Milling Machinebased dieless Incremental Sheet Forming', Article, 2010, doi:10.1007/s12289-010-0931-9