

A többlépéses pályatervezési stratégiák kísérleti vizsgálata egy pontos inkrementális lemezalakításnál

Experimental Investigation of Multi-Step Path Planning Strategies in Single-Point Incremental Sheet Forming

BALOGH Domonkos¹, Dr. JACSÓ Ádám², TANCSA Viktor³

^{1,2,3} Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Abstract

Incremental sheet metal forming is a new type of machining method, where, unlike traditional plastic forming processes, it is not the pressing of the blank into a unique die that determines the geometry, but rather the path of a universal tool (punch) defines the geometry to be produced. One type of this process is single-point incremental sheet metal forming, where the single forming tool is moved along a predefined path, usually by a CNC milling machine or a robotic arm. During the machining process, the rotating tool gradually forms the workpiece by moving along spiral paths. The aim of my work is to investigate the effectiveness of different machining paths in multi-step strategies for expanding the formability limit.

Keywords: Incremental forming, CNC, path planning, forming forces, formability limit

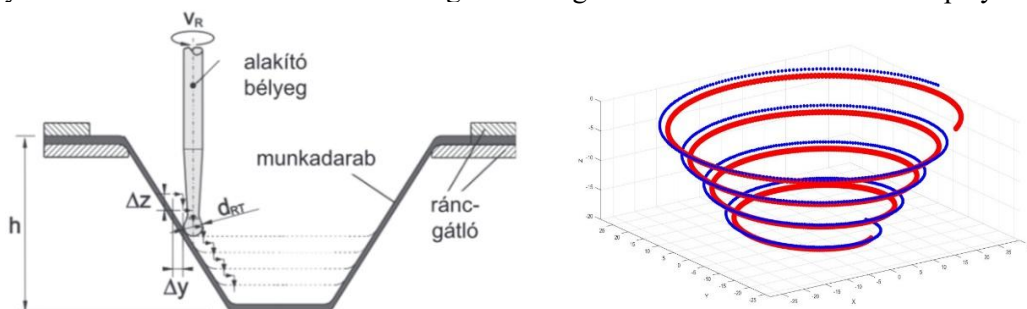
Kivonat

Az inkrementális lemezalakítás egy újfajta megmunkálási módszer, amely során a hagyományos képlékeny alakító eljárásokkal ellentétben nem az előgyártmány egyedi matricára történő préselése, így annak geometriája, hanem egy univerzális szerszám (bélyeg) pályája hozza létre a kialakuló geometriát. Ennek egy fajtája az egy pontos inkrementális lemezalakítás, amely során az egyetlen alakító szerszámot egy előre definiált pályán mozgatja általában egy CNC megmunkáló központ vagy robotkar. A megmunkálás során a forgó szerszámmal spirális pályákon haladva fokozatosan alakítják ki a munkadarabot. A munkám célja, hogy megvizsgáljam a többlépéses stratégiák különböző megmunkálási pályáinak hatékonyságát az alakíthatósági határ kibővítésére vonatkozólag.

Kulcsszavak: Inkrementális alakítás, CNC, pályatervezés, alakító erők, alakíthatósági határ

1. BEVEZETÉS

Az inkrementális lemezalakítás népszerűsége jelentősen megnövekedett az utóbbi néhány évtizedben [1]. Ennek oka, hogy a megmunkálás nem igényel speciális, kizárólagosan egyfajta munkadarabhoz tartozó célszerszámot, így az egyedi gyártásban lényegesen költséghatékonyabbnak bizonyulhat a hagyományos lemezalakító technológiákhoz képest [1] [2]. A különféle munkadarabok megmunkálását az egyedi szerszám-pályák teszik lehetővé. Ebben a technológiának a legfőbb kihívása ezért a szerszám-pályák tervezése.



1. ábra: Az egy pontos inkrementális lemezalakítás vázlatja [1] (balra), Térbeli szerszámkorrekciós pályatervezés (jobbra)

Az egyponyos inkrementális lemezalakításhoz kapcsolódó kutatások elsősorban a geometriai hibákat és az alakíthatósági határokat vizsgálják [3]. A technológia alkalmazásának egyik legfontosabb korlátja ugyanis az, hogy a munkadarab falának elvékonyodása miatt a fal elszakad, ha a célgeometria fala túl meredek [4]. Ezt a jelenséget úgy nevezik, hogy a lemez elérte az alakíthatósági határát [5]. Az alakíthatósági határ jellemzésére a kialakítható alkatrész falának meredekségét használják. Az eddigi kutatások kimutatták, hogy ez a határ megnövelhető, ha nem egy lépésben alakítják ki a célformát, hanem a szerszámot ismételtelen végig mozgatják a már részben elkészült munkadarab felületén [6]. Ezt az eljárást többlépéses inkrementális lemezalakításnak hívják. A munkám célja, hogy megvizsgáljam a többlépéses stratégiák különböző megmunkálási pályáinak hatékonyságát az alakíthatósági határ kibővítésére vonatkozólag.

Fontos figyelembe venni az alakíthatósági határ vizsgálata során az alakító erőket. Ez nyilvánvaló, hiszen a nagyobb alakító erők nagyobb feszültségeket okoznak a munkadarabban, ami annak szakadásához vezethet. Maaß és társainak kutatása alapján megállapítható, hogy a Δz paraméter növelése az alakítási erőket növeli, miközben a kevesebb körbefordulással rendelkező spirál rövidebb pályát, így rövidebb megmunkálási időt eredményez [8].

Bansal és társainak kutatása szintén a megmunkálás közben fellépő erőket vizsgálta több technológia paraméter függvényében [10]. Az alakítási erő axiális irányú komponensének közelítőleg lineáris növekedését eredményezte a szerszám átmérőjének lineáris növelése. Fontos továbbá az, hogy kísérleteikből levonható az a következtetés, hogy 50° -os oldalfal ferdeség mellett jelentkeztek a legnagyobb axiális erő.

Verbert és társainak. (2008) kísérletei kimutatták, hogy a maximális elérhető oldalfal ferdeség 71° és 76° közötti értékeket vett fel a vizsgált alumínium ötvözetek esetében, egylépcsős alakítást alkalmazva [5]. Az Al 3003-O-hoz és az AA 3103 alumíniumból készült előgyártmány lemezek vastagságai 2 mm és 0,85 mm közötti értékűek voltak.

M. Skjoed és társai kidolgoztak 5 lépésből álló lemezalakítási stratégiákat. Céljuk az alakíthatósági határ kibővítése volt [4]. A célgeometria a kutatásuk során egy félgömb és egy henger volt. A henger kialakításához tartozó szerszám pályákkal való kísérletezés során az első lépés kivételével megvizsgálták a kívülről befelé és a belülről kifelé haladó szerszám pályák hatását. Kutatásuk sikerrel járt, mert sikeresen ki tudták alakítani a hengeres munkadarabot, ami 90° -os oldalfal ferdeséget, azaz alakíthatósági határt jelent. Ez az elérhető maximális alakíthatósági határ a 3 tengelyes CNC megmunkáló központokon.

Az alakíthatósági határ azt a kritikus oldalfal ferdeséget jelenti, amit meghaladva a munkadarab fala az elvékonyodás következtében elszakad [5]. Erre hatással van a szerszám pályáján kívül a szerszám típusa, kenése, átmérője és mozgásának iránya, továbbá az előtolás értéke [9]. A saját kutatásom során kizárólag a szerszám pályáját fogom változtatni a jó összehasonlíthatóság érdekében.

A kritikus oldalfal ferdeség oka a kezdeti vízszintes lemez falvastagságának függőleges vetítése a végső geometriára, így annak elvékonyodása számszerűsíthető az alábbi képlettel [7]:

$$t = t_0 \cdot \cos(\alpha) \quad (1)$$

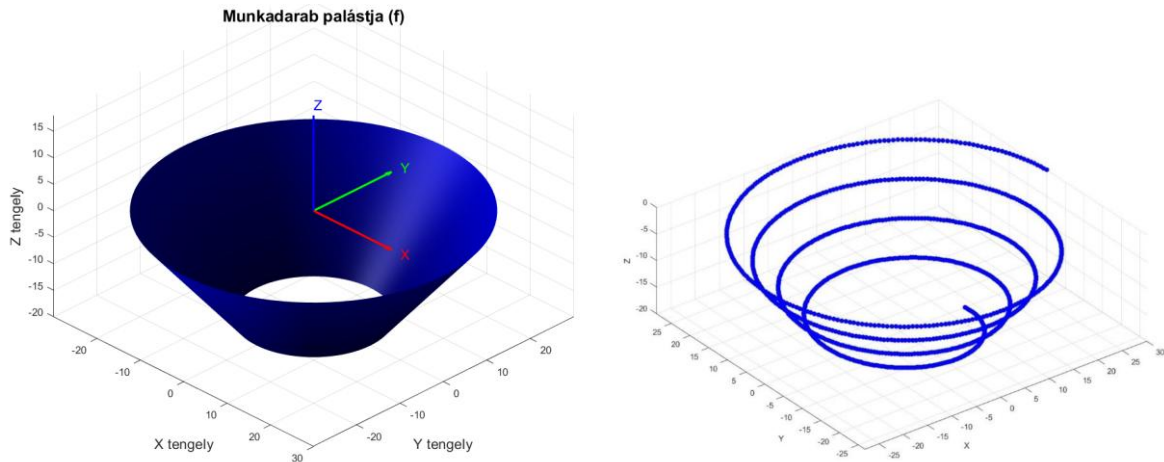
Ahol:

- t : kialakított geometria falvastagsága felületi normális irányban, mm
- t_0 : kezdeti geometria (lemez) falvastagsága, mm
- α : oldalfal ferdesége, $[\circ]$

2. PÁLYATERVEZÉS

A dolgozat kidolgozása közben többféle egy- és többlépéses pályatervezési stratégiát is megvalósítottam. Egylépcsős pályatervezésre és kísérletekre szükség volt, mert csak ezen kísérletek elvégzése után ismerhettem meg azt kritikus α_{krit} oldalfal ferdeséget, ami fölött minden egylépcsős alakítással készített munkadarab elszakadna. Miután ezt az értéket meg tudtam határozni, elkezdhettem kísérletezni olyan többlépéses pályatervezési stratégiákkal, amikkel ez az α_{krit} alakíthatósági határ növelhető.

A kialakítandó geometria (munkadarab) minden esetben egy $H = 20$ mm mélységű, $R_f = 30$ mm felső sugarú és változó α oldalfal ferdeségű csonkakúp volt. A munkadarab felszíne a 2. ábra bal oldalán látható. Az α oldalfal ferdeséget változtattam az alkalmazott megmunkálási pálya alakíthatósági határára vonatkozó hatékonyságának függvényében, tehát ha a megmunkálási pálya az alakíthatósági határt sikeresen bővítette, akkor a célgeometria oldalfalának ferdeségét megnöveltem, majd az újra generált megmunkálási pályával újra teszteltem.



2. ábra: A kialakítandó geometria palástja (balra), g görbe (jobbra)

A munkám során mindent analitikusan számoltam, mivel a legtöbb paraméter és változó változtatására szükség volt a kísérletek során, hiszen már a kialakítandó geometria oldalfal ferdeségének is változni kellett.

A pályatervezési munkáim matematikai és kódolási részekre oszthatóak. Először a matematikai számítási feladatokat végeztem el. Ezen belül a munkadarab felületének analitikus definiálása után az alakítási stratégia definiálása következett, majd a pályafüggvények meghatározása, végül a térbeli szerszámkorrekció meghatározását végeztem el. A matematikai részt teljes egészében analitikusan készítettem el, hiszen ez megkönnyítette a későbbi kódolási feladataimat, valamint a pályatervezést általánosabban használhatóvá tette. Ez után következett a két részből álló kódolási rész. Az első lépés a MATLAB kód elkészítése volt. Itt minden stratégiához különálló, paraméteres MATLAB kódokat írtam, amik magukba foglalták a szükséges matematikai számításokat és a paraméteresen megírt G-kód generáló kódokat. A kódolási rész második eleme így a pályaparaméterek MATLAB-ban történő megadása, majd a kód futtatásával a G kód írása volt.

A térbeli szerszámkorrekció kidolgozásának szükségességét a szerszám programozott pontja és a munkadarabbal való érintkezési pontja közötti eltérés indokolta.

A matematikai számításaim két fontos eredménye a **g** és **p** görbe volt. A **g** görbe a szerszám és a munkadarab érintkezési pontjának pályája, míg a **p** görbe a szerszám programozott pontjának pályája. A **p** görbe a térbeli szerszámkorrekció eredménye, a függvénye a 2. képletben látható. Ezek a pályák a 1. ábra jobb oldalán láthatóak.

$$\mathbf{p}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot \frac{-\Delta z}{2\pi} \varphi - \frac{r_{\text{szerszám}}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} \right) \\ \sin(\varphi) \cdot \left(R_f + \frac{R_f - R_a}{H} \cdot \frac{-\Delta z}{2\pi} \varphi - \frac{r_{\text{szerszám}}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} \right) \\ -\frac{\Delta z}{2\pi} \varphi - \frac{r_{\text{szerszám}} \cdot \frac{R_a - R_f}{H}}{\sqrt{\left(\frac{R_f - R_a}{H}\right)^2 + 1}} - r_{\text{szerszám}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ahol:

- R_a : csonkakúp alsó körének sugara, mm
- R_f : csonkakúp felső körének sugara, mm
- H : csonkakúp magassága, mm
- α : csonkakúp oldalfal ferdesége, rad
- φ : szögelfordulás változója, rad
- Δz : Egy körbefordulás (keringés) alatt megtett z irányú süllyedés, mm

2.1. Az első többlépéses alakítási kísérletek

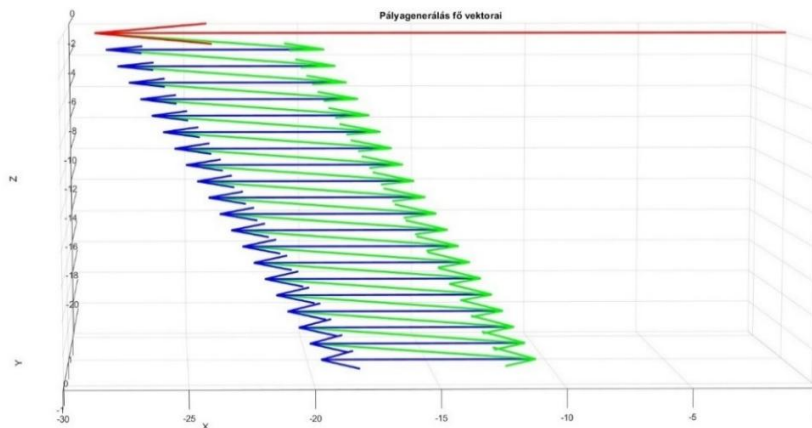
Az első többlépéses alakítási kísérletek során azonos alapsíkú és szimmetria tengelyű, de különböző α oldalfal ferdeségű csonkakúp felületeken haladó spirálpályákat hoztam létre. A szerszám pályákat kísérleti úton teszteltük a CNC megmunkáló központtal, a kisebb oldalfal ferdeségtől 5°-os növekményekkel fokozatosan haladva a nagyobb oldalfal ferdeség irányába. A pályatervezés során kétlépéses és háromlépéses alakítási stratégiákat is kidolgoztam.

Fontos jellemzője ennek a fajta pályagenerálásnak, hogy az egymás után következő lépések kiinduló pontja azonos, míg a végső pontjuk különböző. Ez azt eredményezi, hogy az egymást követő lépések a munkadarab felső síkjából nem von be több anyagot az alakításba. A csonkakúp alsó felületéből azonban bekerül többletanyag az alakítási folyamatba.

2.2. Sík spirállal kombinált szakaszosan mélyítő stratégia

Ezzel a pálya típussal az volt a célom, hogy minél több anyagot tudjak átmozgatni az alakítás során a munkadarab alsó, középső felületéről az oldalfalba, mivel ez az alsó felület a megmunkálás során deformálatlan maradna egy lépéses stratégiát alkalmazva. Ezt azzal akartam elérni, hogy minél laposabb β oldalfal ferdeségű kúp felületen haladó spirállal a lehető legközelebb jusson a szerszám a munkadarab függőleges szimmetria tengelyéhez, ezzel biztosítva az alsó felület bevonását az alakítási műveletbe.

Ezzel a stratégiával a szerszám először létrehozott egy $\Delta z=0,1\text{ mm}$ mélységű lapos kúpot ($1^\circ-2^\circ$ oldalfal ferdeségű), majd ezt egy sík spirállal kibővítette a célgeometria oldalfaláig. Ezután ebből a pontból ismételte ezt a két lépést egészen addig, míg le nem ért a kúp aljáig. A szerszám minden esetben az XZ síkból indult és ugyanebbe a síkba tért vissza egy, vagy több egész fordulatot megtéve a paláston. A pálya XZ síkbeli metszete a 3. ábrán látható.



3. ábra: A pályagenerálás vektorainak ismétlődése az XZ síkban ($\beta=6^\circ$, $\Delta z = 1\text{ mm}$)

3. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

A kísérleteket a BME G épületében végeztük egy KONDIA 640B CNC megmunkáló központtal, NCT 300 vezérléssel. A 0,22 mm vastag AlMn1Mg1 alumínium lemezt egy speciális befogókészülék rögzítette, amely megelőzte a ráncosodást. Az erőméréseket egy Kistler piezoelektromos szenzorral végeztem, az adatokat LabVIEW szoftver rögzítette, majd MATLAB-ban dolgoztam fel. Gépzsíros kenést használtunk.

Első többlépéses alakítási kísérletek eredményei

1. táblázat

Mérés sorszáma	Lépések száma	Oldalfal ferdeség	Elszakadt?
7.	2	60° (1. lépés)	nem
8.		65° (2. lépés)	nem
9.	2	60° (1. lépés)	nem
10.		70° (2. lépés)	igen
11.	3	60° (1. lépés)	nem
12.		65° (2. lépés)	nem
13.		70° (3. lépés)	igen

Az előkísérletek célja az α_{krit} alakíthatósági határ meghatározása volt egy lépéses alakító stratégiákkal. Azonos paraméterek mellett fokozatosan növelve az α értékét, a munkadarab $\alpha = 65^\circ$ -nál szakadt el, így az alakíthatósági határt $\alpha_{krit} = 60^\circ$ -nak állapítottam meg 5°-os felbontás mellett.

Az első többlépéses alakítási kísérletek eredményeit az 1. táblázatban foglaltam össze. A kétlépéses alakítási stratégiával az $\alpha_{krit} = 60^\circ$ -os határt sikeresen kibővítettem 65° -ra, míg a háromlépéses stratégia szintén 65° -os alakíthatósági határt eredményezett. A többlépéses eljárás során lépcsőzetes hibák jelentkeztek, ami megerősíti a szakirodalomban leírtakat.

Az öt kísérlettel tesztelt sík spirállal kombinált szakaszosan mélyítő stratégiánál $\alpha = 65^\circ$ -os oldalfal ferdeségű munkadarab kialakítása volt a cél, de minden esetben a fal elszakadt. A kísérletek eredményei a 2. táblázatban láthatóak. A kisebb Δz értékek miatt az első két kísérletben 7,7 mm mélyen történt a szakadás, míg a nagyobb Δz esetén a szakadás mélysége 10,1–12,5 mm volt. A stratégia optimalizálásához további kísérletek szükségesek a pályatervezési paraméterek hatásának részletes vizsgálatával.

A sík spirállal kombinált szakaszosan mélyítő stratégia kísérleti eredményei

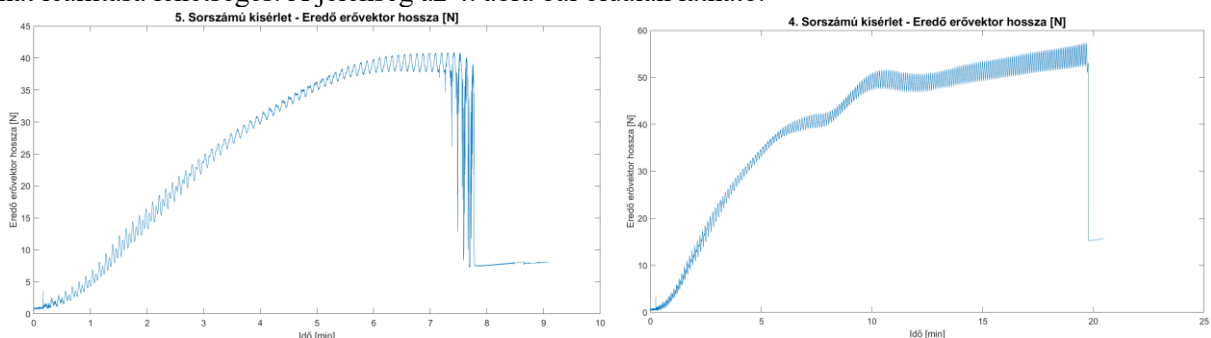
2. táblázat

Mérés sorszama	Oldalfal ferdeség	β	Δz [mm]	$L_{sík}$ [-]	$L_{térbeli}$ [-]	Elszakadt?
2.1.	65°	$0,5^\circ$	0,1	2	2	igen
2.2.	65°	$2,2^\circ$	0,7	4	2	igen
2.3.	65°	10°	3	15	15	igen
2.4.	65°	6°	2	15	20	igen
2.5.	65°	6°	1	15	20	igen

3.1. Erőmérések eredményei

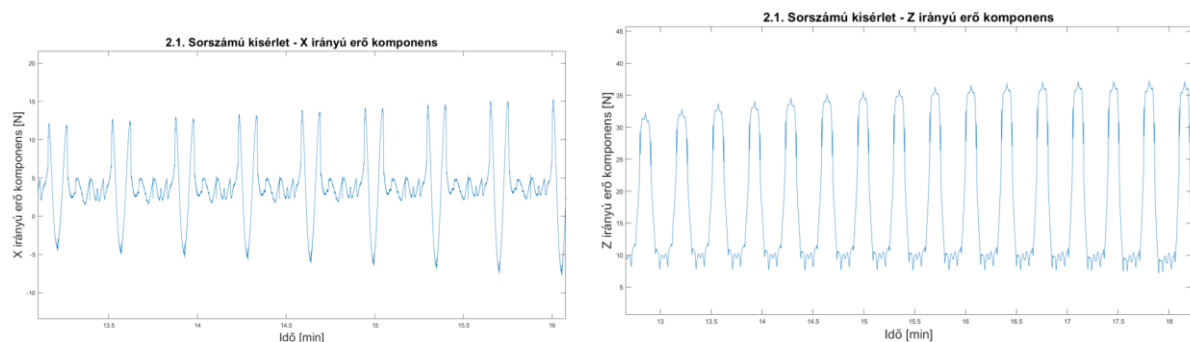
Az erőméréseket 1000 Hz mintavételezési frekvenciával végeztem, majd MATLAB-ban Gauss szűrővel szűrtem az adatokat. Az alakító erők Z irányú komponense folyamatos növekedést mutatott, valószínűleg az anyag felkeményedése és a szerszám egyre meredekebb süllyedése miatt. A kísérletek során egy 6,5–14 mm mélységben jelentkező hullámszerű erőingadozás figyelhető meg, amely összefüggésben lehet a fémek szakítógörbéjével. A jelenséghez tartozó grafikon a 4. ábra jobb oldalán látható.

Fontos eredmény, hogy a munkadarab falának szakadása előtt minden alkalommal jelentős erőingadozás volt megfigyelhető. Emiatt az oldalfal szakadása előjelezhető, így még a szakadás előtt az alakítási folyamat leállítása lehetséges. A jelenség az 4. ábra bal oldalán látható.



4. ábra: Erőingadozás a szakadás előtt (balra), Hullámszerű erőingadozás (jobbra)

A sík spirállal kombinált szakaszosan mélyítő stratégia során a síkbeli spirális mozgás során az XY síkbeli erők megnövekedtek, de ez nem akadályozta meg a munkadarab falának szakadását, így a stratégia további finomítása szükséges. Azonban beigazolódott az elv, miszerint anyag mozgatása lehetséges ezen stratégiával az adott irányokba, mivel az X és Y irányú erő komponens jelentősen megnövekedett a síkbeli spirális pályákon, míg a Z irányú jelentősen lecsökkent. Ezen komponensek diagramjai az 5. ábra bal és jobb oldalán láthatóak.



5. ábra: Sík spirállal kombinált szakaszosan mélyítő stratégia X irányú (balra) és Z irányú (jobbra) erőkomponensei

4. KONKLÚZIÓ

A dolgozatban az egyponthoz tartozó inkrementális lemezalakítás alkalmazhatóságát vizsgáltam, különös tekintettel a pályatervezésre és a többlépéses alakítási technológiákra. Matematikai modelleket dolgoztam ki a térbeli szerszámkorrekcióra, amelyeket MATLAB-ban implementáltam és sikeresen alkalmaztam G kód generálására. Az első többlépéses alakítási stratégia sikeres volt az alakíthatósági határ kibővítésére vonatkozólag, míg a második nem hozott egyértelmű eredményt, valószínűleg a pályaparaméterek nem optimális megválasztása miatt. A szakirodalomban leírt geometriai lépcsőzetes hibákat saját kísérleteimmel is alátámasztottam. Az erőmérések során tapasztalt hullámszerű jelenség további vizsgálata segítheti az inkrementális lemezalakítás mechanikai és anyagtudományi modelljeinek fejlesztését.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet nyilvánítani a konzulensemnek, Jacsó Ádámnak a szakmai támogatásért, a dolgozatom többszöri átnézéséért és a kísérletek elvégzésében tett segítségért a dolgozat megírása során. Továbbá szeretnék köszönetet nyilvánítani Tanca Vikornak a további kísérletek elvégzésében tett segítségért, és Bíró Istvánnak az erőmérő szoftver elkészítéséért.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] M. Tisza and P. Kovács, 'INNOVATÍV ALAKÍTÓ ELJÁRÁSOK – INKREMENTÁLIS LEMEZALAKÍTÁS'. GÉP, LXI. évfolyam, 2010., 2010.
- [2] I. Paniti, 'A lemezalapú gyors prototípusgyártás új módszerei'. Pattantyús-Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola, 2014. [Online]. Available: http://doktori.bme.hu/bme_palyazat/2014/honlap/Paniti_Imre_hu.htm
- [3] H. K. Nirala, P. K. Jain, J. J. Roy, M. K. Samal, and P. Tandon, 'An approach to eliminate stepped features in multistage incremental sheet forming process: Experimental and FEA analysis', J. Mech. Sci. Technol., vol. 31, no. 2, pp. 599–604, Feb. 2017, doi: 10.1007/s12206-017-0112-6.
- [4] M. Skjoedt, N. Bay, B. Endelt, and G. Ingarao, 'Multi Stage Strategies for Single Point Incremental Forming of a Cup', Int. J. Mater. Form., vol. 1, no. 1, pp. 1199–1202, Apr. 2008, doi: 10.1007/s12289-008-0156-3.
- [5] J. Verbert et al., 'Multi-Step toolpath approach to overcome forming limitations in single point incremental forming', Int. J. Mater. Form., vol. 1, no. 1, pp. 1203–1206, Apr. 2008, doi: 10.1007/s12289-008-0157-2.
- [6] S. Wu, Y. Ma, L. Gao, Y. Zhao, S. Rashed, and N. Ma, 'A novel multi-step strategy of single point incremental forming for high wall angle shape', J. Manuf. Process., vol. 56, pp. 697–706, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.05.009.
- [7] B. Marton, 'A szerszámhátréteg hatásának kísérleti vizsgálata egyponthoz tartozó inkrementális lemezalakítás során', BME, Budapest, 2024.
- [8] F. Maaß, M. Hahn, and A. E. Tekkaya, 'Interaction of Process Parameters, Forming Mechanisms, and Residual Stresses in Single Point Incremental Forming', Metals, vol. 10, no. 5, Art. no. 5, May 2020, doi: 10.3390/met10050656.
- [9] Y. H. Kim and J. J. Park, 'Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal', J. Mater. Process. Technol., vol. 130–131, pp. 42–46, Dec. 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00788-4.
- [10] A. Bansal, R. Lingam, S. K. Yadav, and N. Venkata Reddy, 'Prediction of forming forces in single point incremental forming', J. Manuf. Process., vol. 28, pp. 486–493, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.04.016.