

Egyponos inkrementális lemezalakítás alkalmazása komplex geometriák készítésére alátámasztó szerszám segítségével

Forming of complex geometries by single point incremental sheet forming with supporting die

PESZMEG László¹, Dr. JACSÓ Ádám²

^{1,2}Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Gyártástudomány és -technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
tel.: +36 1 463 1875

e-mail: ¹peszme@edu.bme.hu, ²jacso.adam@gpk.bme.hu
honlap: www.manuf.bme.hu

Abstract

During the research, complex geometries were produced from 0.22 mm thick aluminium sheets on a CNC machining centre, using PLA support tools manufactured with FDM technology. Among the various CAM tool path strategies, spiral-type paths that scan the entire surface proved to be the most effective for geometric accuracy. The results confirmed that the combination of 3D-printed polymer counter-tools and SPIF technology represents a flexible and effective solution for the manufacturing of complex sheet components.

Keywords: single point incremental sheet forming, rapid prototyping, FDM, CAD/CAM/CNC, tool path optimisation

Kivonat

A kutatás során 0,22 mm vastagságú alumínium lemezekből állítottunk elő komplex geometriákat CNC megmunkálóközponton, FDM technológiával készült PLA alátámasztó szerszámok segítségével. A különböző CAM pályatervezési stratégiák közül a teljes felületet végigpásztázó spirál típusú pályák bizonyultak a leghatékonyabbnak a geometriai pontosság szempontjából. Az eredmények igazolták, hogy a 3D nyomtatott polimer ellendarabok és a SPIF technológia kombinációja rugalmas és hatékony megoldást jelent a komplex lemezalkatrészek gyártására.

Kulcsszavak: egyponos inkrementális lemezalakítás, gyors prototípusgyártás, FDM, CAD/CAM/CNC, szerszámoptimalizálás

1. BEVEZETÉS

Lemezalakítási technológiákat az ipar széles területén alkalmaznak. Legnagyobb számban az autóipar területén fordul elő. Komplex geometriák előállítására a legelterjedtebb technikák a lemezahajlítás, a mélyhúzás és a hidroformálás. Ezek a technológiák nagy erő kifejtésre alkalmas berendezéseket és nagy teherbírású, egyedi szerszámokat igényelnek, amelyek jelentős költségekkel járnak. Ezek megtérülése csak közép és tömeggyártás esetén gazdaságos, mivel nagy darabszám esetén az egy alkatrészeire jutó költség több felé oszlik el [1].

Az inkrementális lemezalakítás alkalmas lehet gyors prototípusgyártásra és egyedi alkatrészeket igénylő területeken is. Az autóipar, a repülőgépgyártás és a gyógyászati segédeszközök gyártása egyaránt lehet ilyen terület [2]. Szemben a hagyományos lemezalakítási eljárásokkal, az inkrementális alakítás során az előállítandó geometria fokozatosan, elemi lépésekben készül el, így a megmunkálás közben kis terhelések lépnek fel, ezért nincs szükség nagy teljesítményű alakítógépekre [3], [4]. Az egyponos inkrementális alakítás során jellemzően CNC megmunkáló központot vagy ipari robotot alkalmaznak. Az alakító szerszám egy univerzális, általában gömbvégű forgószerszám, amit egy előre meghatározott szerszám pályán mozgatva alakul ki az alkatrész.

Inkrementális lemezalakítás esetében beszélhetünk negatív és pozitív alakításról. Negatív formázás esetén nem alkalmazunk formázó geometriát, hanem csak a forgó szerszámot használjuk a kívánt geometria előállításához. Pozitív alakítás alkalmazásánál a formázni kívánt lemezt mozgatjuk a formázó geometriához, amely a forgó szerszámmal együtt alakítja a munkadarabot a mintageometriára [5]. Egyes esetekben az elkészítendő geometria részleges vagy teljes ellendarabjával segítik a megmunkálást, így pontosabb és összetettebb geometria állítható elő.

Egypontos szabadalakításról beszélünk, amikor az alakításban csak a forgó alakító szerszám vesz részt. Ebben az esetben egy keret segítségével feszítik ki a lemezt, majd a szerszám által bejárt pálya határozza meg a gyártmány alakját. Kétpontos alakítás esetében az alakító szerszámmal szemben is dolgozik egy forgó szerszám. Ez a megoldás a leginkább eszközigenyes, mivel vagy egy speciálisan erre a célra kialakított CNC vezérelt gépet kell létre hozni, vagy két szinkronban mozgó robotkarral lehet kivitelezni a gyártást, viszont ennél a megoldásnál érhető el a legnagyobb alakítási pontosság. A részleges geometriával rendelkező megtámasztó szerszám alkalmazása szintén növeli a pontosságot és nagyobb bonyolultságot tesz elérhetővé, hiszen meredekebb falak és nem monoton mélységeloszlású keresztmetszetek is kialakíthatóak. Az alátámasztó szerszám a geometria felső részének kialakítását segíti, a megmunkálás további részében pedig megtámasztja az előgyártmányt. A teljes geometriával rendelkező ellendarab alkalmazása még pontosabb alakítást tesz lehetővé, mivel itt a megmunkálás teljes ideje alatt megtámasztást biztosít a lemeznek. Az egyenletes falvastagság előállításában a lemez mozgatása és az ellendarab gondoskodik. Jelen kutatásban ennek az eljárásnak a megvalósítását vizsgáltuk

2. KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK

A kutatás célja egy komplex geometria létrehozása volt, amely a BME Gépészmérnöki Kar logójának egyszerűsített változatát mintázza. A kísérleteket egy Kondia B640 típusú 3-tengelyes megmunkálóközponton végeztük. Az inkrementális lemezalakítás során alkalmazott alátámasztó szerszám célja az volt, hogy a megmunkálás teljes ideje alatt megtámasztást biztosítson a lemeznek, növelve ezzel a geometriai pontosságot.

A kísérletekben a munkadarab minden esetben egy 0,22 mm vastagságú AlMn1Mg1 alumínium lemez volt, amelyet alulról és felülről egy-egy szorítólemezzel és gyorszorító elemekkel egymáshoz feszítve támasztottunk meg. Ezzel biztosítottuk, hogy a megmunkálás során ne gyűrődhessen fel a gyártmány széle. A szorítókeret közepén szabadon rendelkezésre állt egy 100 mm átmérőjű és 40 mm magasságú henger alakú munkatér, ahol az alátámasztó geometria kapott helyett. A kísérletek során a lemezalakítás maximális mélysége 2 mm volt.

A megtámasztó elem a kialakítandó geometria negatívjának megfelelően lett kialakítva az éleknél 2 mm-es sugarú lekerekítéseket alkalmazva. A falak ferdesége 50°-os volt, így az alakítás során nem alakult ki a kritikust meghaladó falferdeség. Az alátámasztó szerszám tervezése során fontos szempont volt a könnyű szerelhetőség, így a kísérletek során gyorsan és egyszerűen cserélhetőek voltak a lemezek és az alátámasztó geometriák anélkül, hogy a teljes befogó készüléket át kellett volna szerelni vagy a nullpontot újra fel kellett volna venni. Az alakítási kísérletekhez szükséges ellennyomó elemek gyártása FDM technológiával valósult meg, amely lehetővé tette a különböző geometriák rugalmas és gyors előállítását. A 3 és 4 mm vastagságú alátámasztó szerszám anyagának a PLA-t választottuk a jó nyomószilárdsági tulajdonsága miatt. A PLA alapanyagú alátámasztó szerszámok alkalmazása jelentős költségmegtakarítást és gyorsabb gyártás-előkészítést tesz lehetővé a hagyományos acélszerszámokhoz képest.

Kísérleteknél használt alakító szerszám egy Ø4 mm-es félgömbvégű réz tüske volt, amit egy patronos szerszámbe fogóba rögzítettünk.

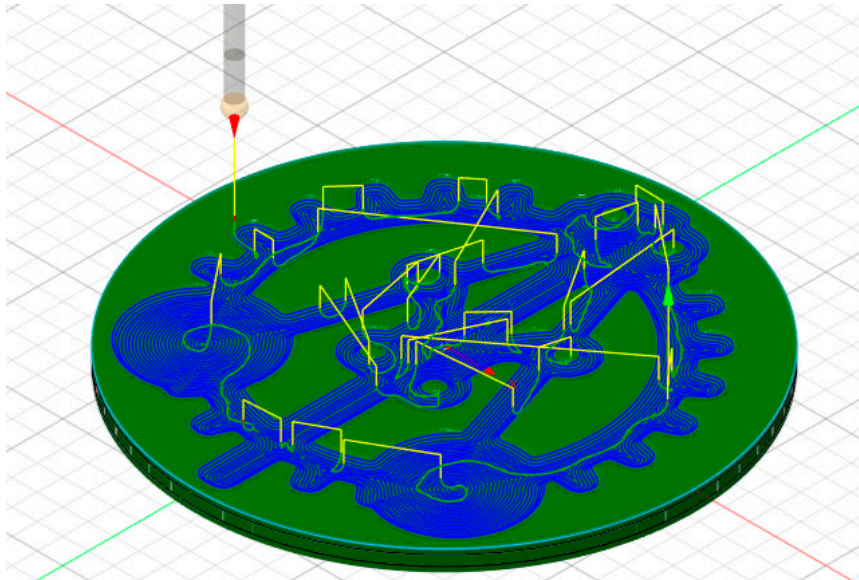
3. PÁLYATERVEZÉSI STRATÉGIÁK

A vizsgálatokhoz összesen hét különböző szerszám pályát hoztunk létre a Fusion CAM szoftver segítségével. Minden esetben a Scallop stratégiát alkalmaztunk az egyenletes lépésköz biztosítása érdekében.

Az első öt kísérlet során a kontúrparhuzamos stratégiát vizsgáltuk különböző beállításokkal. Ennél az esetben a szerszám csak a mélyített részeket pásztázta végig, ezzel is csökkentve a megmunkálási időt. Az utolsó két kísérletnél pedig a spirális stratégiát vizsgáltuk, ahol a szerszám a teljes területet végigpásztázza, ami ugyan hosszabb megmunkálási időt eredményez, de egyenletesebb felületeti struktúra mellett. A kísérletek során 0,1 mm, 0,3 mm és 0,5 mm-es lépésközöket állítottunk be a megmunkálási idő és a geometriai minőség összehasonlításához. Minden pályánál egységesen 2000 1/min fordulatszámot és 1000 mm/min előtolási sebességet alkalmaztunk. Továbbá a pályák generálásánál 0,22 mm-es ráhagyást kellett beállítani, hogy a szerszám a lemezvastagságnak megfelelő távolságban kövesse az ellennyomó formát.

Kontúrpárhuzamos stratégia

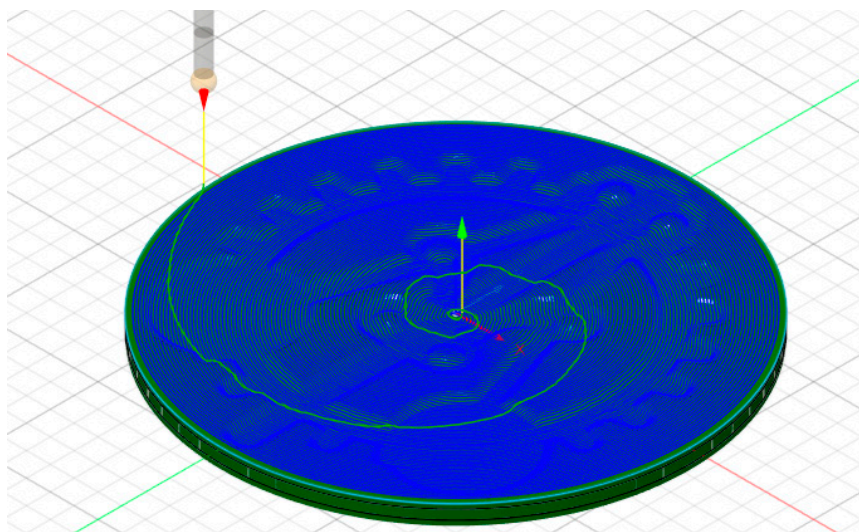
A Kontúrpárhuzamos stratégia I., a Kontúrpárhuzamos stratégia II. és a Kontúrpárhuzamos stratégia III. szerszámok esetén rendre 0,1, 0,3 és 0,5 mm lépésköz került beállításra. Ezzel azt a feltételezést vizsgáltuk, miszerint a legsűrűbb szerszám pálya hozza létre a legjobb felületi minőséget. A 0,1 mm-es lépésköz esetén a szerszám sűrűbben halad végig a felületen, ugyanakkor megnöveli a megmunkálási időt. A 0,5 mm-es beállítás ezzel szemben gyorsabb alakítást tesz lehetővé, de durvább felületet eredményezhet. Ez a kísérlet tehát az optimális egyensúly keresését szolgálta a termelékenység és a minőség között. A pályatervezés során vizsgáltuk még a beállított tűrés hatását is, először egységesen 0,1 mm-t megadva, majd a Kontúrpárhuzamos T stratégiánál ezt 0,5 mm-re növelve. Hasonlóképpen vizsgáltuk a geometria mélységének hatását is, először egységesen 0,78 mm-t beállítva, majd a Kontúrpárhuzamos M stratégiánál ezt 1,78 mm-re növeltük.



1. ábra Kontúrpárhuzamos

Spirális stratégia

A spirális szerszámok esetén a lépésköz egységesen 0,1 mm volt, és azonosan 0,78 mm-es mélységig ment le a szerszám. A két vizsgált szerszám pálya között csak a bejárás iránya tért el. A Spirál I. szerszám pálya esetében a szerszám a középpontból indult és kifelé haladt, ezzel az anyagot a középpontból a szél felé tolva. A Spirál II. pálya esetén pedig a szerszám kívülről indult a középpont felé, ezzel az anyagot a középpont felé mozgatta. A mozgásirány megválasztása meghatározó abban, hogy a kész alkatrészen ne léphessen fel vetemedés az alakítás után.



2. ábra Spirál típusú szerszám pálya

4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

Az elkészült munkadarabok

A kísérletek során mindegyik szerszámpanyával sikerült szakadás nélkül létrehozni a kívánt lemezalkatrészeket, a geometria megfelelőségét és a megmunkálás idejét tekintve viszont jelentősen eltérő eredmények születtek.

A kontúrpárhuzamos stratégiával készült lemezek a 3-7. ábrákon láthatóak. A 0,1 mm-es és a 0,3 mm-es lépésközzel beállított szerszámpanyák esetében a megmunkálásnál apró barázdák jelentkeztek a lemez felületén. A 0,5 mm-es lépésköz esetén volt a legrövidebb a megmunkálás ideje, azonban ennél a megmunkálásnál a még inkább kivehetőek a szerszámpanya ritkaságából adódó barázdák. Mindhárom kísérlet esetén azonos helyen és hasonló mértékű kitüremkedések keletkeztek a mélyítések középvonalainál, amelyek abból adódtak, hogy a lemez az alakítás irányában megnyúlt, majd összegyűrődött. A 0,1 mm-es és 0,3 mm-es alakításnál ezek a hibák egészen sarkossá és élessé váltak, míg a 0,5 mm-es alakítás során a kitüremkedés tompa marad, így kevésbé volt szembevető.

A Kontúrpárhuzamos T startégiánál, amelynél a kimeneti tőrés mértéke a többi pályához képest 0,5 mm-re volt állítva, az előző esetekhez hasonló helyeken jelentkeztek a kitüremkedések, de még élesebben. Ennek gyártmányának a felületi minősége tehát elmaradt a finomabb 0,1 mm-es tőrésű pályával készült gyártmányokéhoz képest. A Kontúrpárhuzamos M szerszámpanya esetén a megmunkálási mélység nagyobb volt (1,78 mm), így a mintának azon részei, ahol nem haladt végig a szerszám, az ellen nyomó szerszámtól eltávolodva jelentősen kitüremkedtek, így a geometriai minősége ebben az esetben is csökkent.



3. ábra *Kontúrpárhuzamos I.*



4. ábra *Kontúrpárhuzamos II.*



5. ábra *Kontúrpárhuzamos III.*

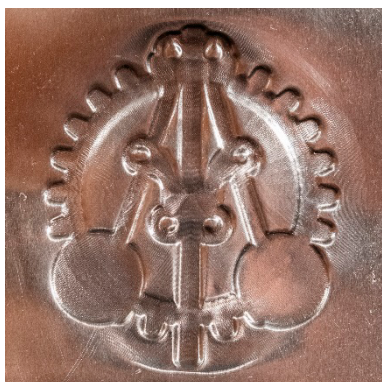


6. ábra *Kontúrpárhuzamos T*



7. ábra *Kontúrpárhuzamos M*

A spirális stratégiáknál sokkal egységesebb felületi struktúrák jöttek létre, ahogyan az a 8. és 9. ábrákon is látható. Azonban a Spirál II. stratégia esetén, ahol a szerszám kívülről befelé haladt, a minta közepén jelentős mértékű geometriai eltérések jelentek meg az anyag összegyűrődéséből adódóan. A Spirál I. esetén, ahol a szerszám belülről kifelé haladt, a korábban megfigyelt felpúposodások és kitüremkedések nem jelentkeztek, így ez a megmunkálási stratégia bizonyult a legkedvezőbbnek a geometriai pontosság szempontjából, azonban ennek a gyártási ideje lett a leghosszabb.



8. ábra Spirál I.



9. ábra Spirál II.

Megmunkálási idők

Minden egyes stratégia esetében rögzítésre kerültek a CAM szoftver által előzetesen becsült idők, valamint a szerszám gép vezérlése által mért valós megmunkálási idők. Az elméleti és a valós idők jelentősen eltértek egymástól a CAM rendszer pontatlan becslése miatt, ami megnehezíti a technológia tervezhetőségét. A mért időeredményeket és az összehasonlító adatok, az 1. táblázatban kerültek összefoglalásra. Megállapítható, hogy a CAM-ben érdemes szigorúbb tűrést beállítani, hogy a pálya a posztprocesszálás után is megfelelően sima maradjon a G kódban. Továbbá a spirális szerszám pályák akár kétszer annyi időt is igényelhetnek, mint a kontúrpárhuzamos stratégia, a megmunkált felület jobb minősége miatt mégis érdemes lehet ezt a stratégiát választani.

Szerszám pályák tulajdonságai

1. táblázat

	Becsült idő [h:min:s]	Valós idő [h:min:s]	Lépésköz [mm]	Tűrés [mm]	Mélység [mm]
Kontúrpárhuzamos I.	0:39:50	0:15:22	0,1	0,1	0,78
Kontúrpárhuzamos T	0:40:33	0:47:05	0,1	0,5	0,78
Kontúrpárhuzamos M	0:39:59	0:45:03	0,1	0,1	1,78
Kontúrpárhuzamos II.	0:13:14	0:15:23	0,3	0,1	0,78
Kontúrpárhuzamos III.	0:08:27	0:09:50	0,5	0,1	0,78
Spirál I.	1:14:47	0:29:26	0,1	0,1	0,78
Spirál II.	1:14:48	0:29:40	0,1	0,1	0,78

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elvégzett kísérletek igazolták, hogy 3D nyomtatással készült PLA alátámasztó szerszám megfelelően alkalmazható az inkrementális lemezalakítás technológiájához kis darabszámú prototípusgyártásra komplex geometriák esetén is, költsége pedig töredéke a fém szerszámokénak. A szerszámon a hét kísérlet után sem volt látható deformáció vagy törés. A kísérletek azt mutatták, hogy a legpontosabb eredményt az a típusú szerszám pálya adja, ahol a szerszám a megmunkált lemez teljes felületét végigpásztázta, azaz az inkrementális alakítás szempontjából a folyamatos spirál jellegű pályák előnyösebbek. Ezen belül a kísérletek azt is megmutatták, hogy a belülről kifelé haladó pályatervezési stratégiák kedvezőbbek. További kísérletekben érdemes lehet vizsgálni nagyobb megmunkálási mélységű alakításokat, illetve méréssel ellenőrizni az előállított geometriák alak- és méretpontosságát. A jövőbeni kutatások során célunk a nagyobb mélységű alakítások vizsgálata, az előállított geometriák alak- és méretpontosságának szkennelésen alapuló mérése, valamint ismételt kísérletek végzése a folyamat stabilitásának statisztikai értékelése érdekében.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az Európai Unió 2020-1.2.3-EUREKA-2022-00026 azonosítójú, „Szoborszerű lemezalkatrészek mesterséges intelligenciával támogatott egyablakos rendeléskezelése és hibrid gyártása” című, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal 2021-1.2.4-TÉT-2021-00054 azonosítójú, „Mikromegmunkálás gépi tanulóval támogatott folyamatfelügyelete az Ipar 4.0 keretén belül” című projektjének, és az MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíj (BO/00841/24/6) támogatásával valósulhatott meg.

HASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] T. Altan és A. E. Tekkaya, Szerk., *Sheet metal forming: processes and applications*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2012.
- [2] Imre Paniti, „New solutions in Incremental Sheet Forming Új módszerek az inkrementális lemezalakításban”. Doktori (PhD) téziszfüzet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2014.
- [3] Marton Balázs - A szerszámpálya hatásának kísérleti vizsgálata egy pontos inkrementális lemezalakítás során. Szakdolgozat, 2024
- [4] H. I. Khalaf, R. Al-Sabur, A. Kubit, Ł. Świąch, K. Žaba, és V. Novák, „Experimental Investigation of Load-Bearing Capacity in EN AW-2024-T3 Aluminum Alloy Sheets Strengthened by SPIF-Fabricated Stiffening Rib”, *Materials*, köt. 17, sz. 8, o. 1730, ápr. 2024, doi: 10.3390/ma17081730.
- [5] V. Oleksik, T. Trzepieciński, M. Szpunar, Ł. Chodoła, D. Ficek, és I. Szczygny, „Single-Point Incremental Forming of Titanium and Titanium Alloy Sheets”, *Materials*, köt. 14, sz. 21, o. 6372, okt. 2021, doi: 10.3390/ma14216372.
- [6] T. Trzepieciński, V. Oleksik, T. Pepelnjak, S. M. Najm, I. Paniti, és K. Maji, „Emerging Trends in Single Point Incremental Sheet Forming of Lightweight Metals”, *Metals*, köt. 11, sz. 8, o. 1188, júl. 2021, doi: 10.3390/met11081188.