

INKREMENTÁLIS LEMEZALAKÍTÁS

INCREMENTAL SHEET METAL FORMING

Kovács Péter Zoltán*, Prof. Dr. Tisza Miklós**

ABSTRACT

Sheet metal forming is one of the most important key technologies in manufacturing industry. It may be reasoned by several facts, among them the economy of sheet forming processes concerning both the material and energy consumption, as well as the overall cost efficiency of sheet forming processes should be mentioned. To keep this key role of sheet metal forming in manufacturing industry, a continuous development is necessary concerning materials, sheet production technologies, development of new innovative forming processes, tooling and manufacturing equipment. In this paper, a new innovative sheet forming process, the incremental sheet metal forming will be described.

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi években egyre erőteljesebb igény jelentkezik rugalmas, új innovatív alakító eljárások kidolgozására és egyre szélesebb körű alkalmazására. Az inkrementális alakítás egyike e követelményeket kielégítő új innovatív technológiáknak.

A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszéke a Ljubljani Egyetem Gyártástechnikai Intézetével közösen EUREKA program keretében pályázati támogatást nyert el *Hatékony inkrementális lemezalakító eljárások kidolgozása* címmel. A projektben mindkét országból egy-egy iparvállalat is részt vesz: Szlovéniából az EMO Orodjarna d.o.o., Magyarországról az Industar Kft.

Ebben a cikkben röviden ismertetjük az inkrementális alakítás alapjellemzőit, majd beszámolunk a közös kutatások kezdeti eredményeiről.

2. AZ INKREMENTÁLIS LEMEZALAKÍTÁS ELVI ALAPJAI

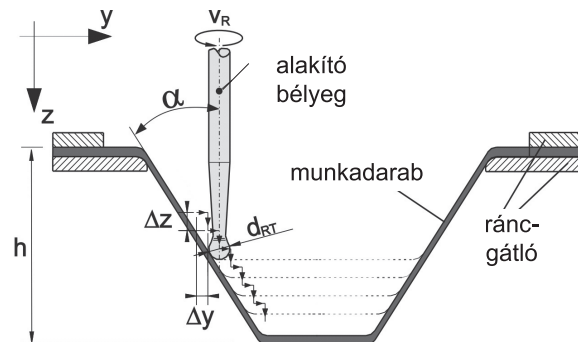
A hagyományos képlékenyalakító eljárások általában egyszerű, merev szerszámokat alkalmaznak: a munkadarab alakját rendszerint a munkadarab alakjá-

nak megfelelően kiképzett alakító bélyeggel és matricával határozzuk meg, alakítjuk ki. Azonban különösen olyan esetekben, amikor a szerszámok költségeinek csökkentése fontos szempont, a szerszám nélküli (matrica nélküli), rugalmas alakító eljárások alkalmazása különösen előnyös lehet.

2.1. Az inkrementális alakítás technológiai változatai

Az inkrementális alakítás alapötletét Leszak [1] szabadalmaztatta az Egyesült Államokban 1967-ben. Ezt követően számos szakközlemény foglalkozott az inkrementális alakítás különféle változatainak elemzésével.

Az inkrementális lemezalakításnál rendszerint egy egyszerű gömbvégződésű alakító szerszámmal (bélyeggel), matrica nélkül, az alakító szerszámelem mozgásának térbeli vezérlésével, elemi alakítási lépések sorozatával, bonyolult, nagymértékű alakváltozást igénylő alkatrészek viszonylag egyszerűen, költséghatékonyan gyárthatók. Az eljárás sematikus vázlatát a főbb geometriai és technológiai paramétereket is feltüntetve az 1. ábra szemlélteti.

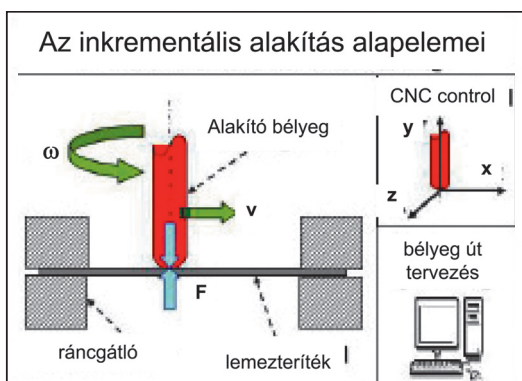


1. ábra. Egy pontos inkrementális alakítás elvi vázlatja

Az inkrementális lemezalakítás általában a 2. ábrán látható négy alapelemmel jellemezhető: az alakítandó lemez; az ún. ránc tartó; az alakító bélyeg és az alakító bélyeg mozgását meghatározó CNC vezérlés.

* egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék

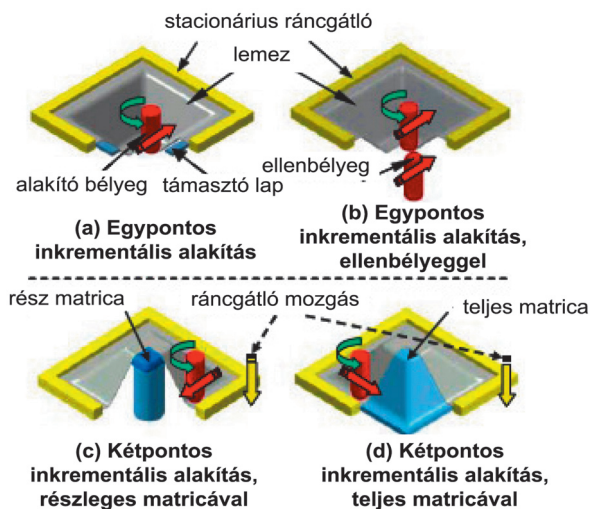
** témavezető, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék



2. ábra. Az inkrementális lemezalakítás alapelemei

A különféle eljárás változatoknál e négy alapelemhez további elemek társulnak, mint például az ellenbélyeg, az alakot részben, vagy teljesen meghatározó matrica [2].

Az inkrementális alakítás technológiai változatait elemezve két alapvető csoportot különböztethetünk meg, nevezetesen szimmetrikus és aszimmetrikus inkrementális lemezalakítást. Mindkét esetben az alakítást egy viszonylag egyszerű kialakítású, sokcélúan felhasználható alakító bélyeggel végezzük, amelynek derékszögű koordinátákban meghatározott mozgását a megmunkáló gép CNC vezérlése biztosítja. Az x és az y tengelyek a lemez síkjában értendők, míg a z-tengely jelöli a bélyeg elmozdulásának irányát, amelynek mentén az alakítás történik.



3. ábra. Az inkrementális lemezalakítás négy alapesete

Az inkrementális alakítások második főcsoportját az aszimmetrikus inkrementális alakítás jelenti, amely további alcsoportokra bontható. Az aszimmetrikus inkrementális alakítás eljárás változatainak 3. ábrán látható átfogó rendszerezését Bambach és Hirt ismertette [3].

2.2. Az inkrementális alakítás szerszámozási kérdései

Általános esetben az inkrementális alakításhoz szerzőként csak egyetlen, univerzális alakító bélyegre van szükség. A legáltalánosabban tömör, félgömbvégződésű

alakító bélyegeket alkalmaznak, amelyek az alakítás során folyamatos érintkezést biztosítanak a szerszám és az alakítandó lemez között. Különösen kis falszögek esetén előfordulhat, hogy a bélyeg szárátmértőjét a bélyegvégződés átmérőjénél kisebbre kell választani, a bélyegszár és az alakítandó lemez érintkezésének elkerülése érdekében. Erre egyébként a bélyeg mozgáspályájának generálásánál is mindig tekintettel kell lenni. Néhány tipikus bélyeg kialakítás látható a 4. ábrán.



4. ábra. Különböző bélyeg kialakítások inkrementális alakításhoz

Az ábra bal oldalán $\phi 6$, 10 és 30 mm átmérőjű, ötvöztött karbidokat tartalmazó szerszámacélból készült bélyeg kialakítások láthatók, míg az ábra jobb szélén látható bélyeg műanyag bevonattal készült az alakítás közbeni kémiai reakciók elkerülése érdekében.

2.3. Az inkrementális alakítás gépi berendezései

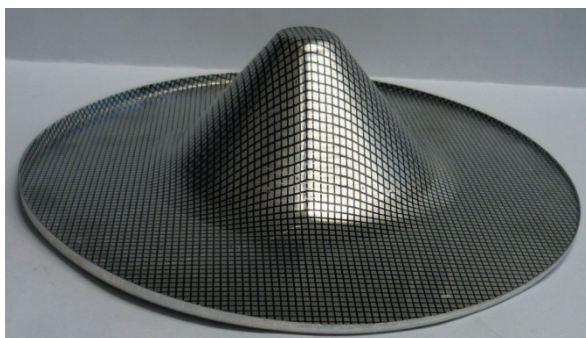
Általában elmondható, hogy lényegében minden, legalább 3-tengelyes CNC vezérléssel rendelkező marógép alkalmas inkrementális alakításra is. Természetesen vannak olyan paraméterek, amelyek az alakítás szempontjából kedvezőbbek. Így például a nagy szerszám sebesség, nagy munkatér (nagy méretű alkatrészek alakítására), valamint a nagy merevség az inkrementális alakítás szempontjából a megmunkáló gép előnyös paramétereit jelentik [4]. Jellemzően az inkrementális lemezalakítási kísérletek zömét többcélú, általános rendeltetésű, CNC vezérlésű marógépeken végezték. Kimondottan az inkrementális alakítás céljaira tervezett, kereskedelmi forgalomban is kapható, egycélú alakító gépet napjainkig csak egyetlen alakító gépgyártó, a japán AMINO cég gyárt [5].



5. ábra. Az AMINO cég célorientált alakító gépe [5]

Az előkísérletekhez jól alakítható alumínium ötvözetet választottunk. Ennek indoka, az alumínium jó alakíthatósága mellett elsősorban az Al-ötvözet viszonylag kis alakítási szilárdsága, amelynek következtében az alakítás erőszüksége sem túl nagy, így a precíziós megmunkálásokra alkalmazott CNC marógép orsóját nem terheljük túl. Mindezek alapján az Al 1050-A alumínium ötvözetet választottuk az előkísérletek anyagaként.

Kísérleteink során vizsgáltuk az inkrementális lemezalakítás legfontosabb technológiai paramétereit. E vizsgálatok során különféle csonka kúp alakzatokat hoztunk létre (9. ábra). Minden esetben a munkadarab anyaga: Al 1050-A, a lemezvastagság 0.6 mm és a teríték átmérője 194 mm volt.



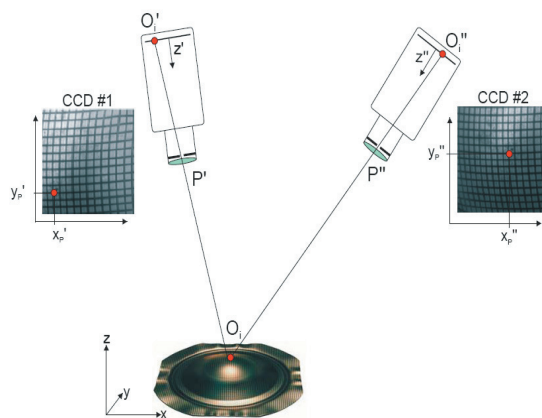
9. ábra. Inkrementális alakítással készített munkadarab

4. AZ INKREMENTÁLIS ALAKÍTÁS VIZSGÁLATA

A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológia Tanszékén a Regionális Egyetemi Tudásközpont támogatásával a közelmúltban egy integrált lemezalakíthatósági vizsgáló rendszert valósítottunk meg, amely egy elektro-hidraulikus, számítógép vezérlésű lemezvizsgáló gépet és egy automatizált optikai alakváltozás-mérő rendszert foglal magába (9. ábra).



10. ábra. Az alakíthatósági vizsgáló rendszer és az optikai mérőrendszer fényképe



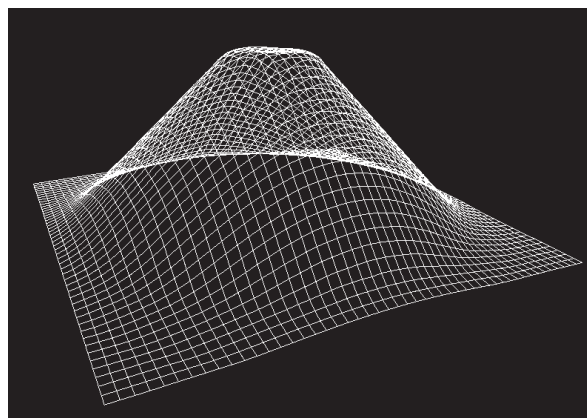
11. ábra. Az alakíthatósági vizsgáló rendszer és az optikai mérés alapelveinek vázlatja

A képmérés alkalmazott technikája lehetővé teszi, hogy az alakított munkadarab felületi pontjainak 3D-s koordinátáit a különböző nézetekből felvett képekből egyértelműen meghatározzuk. Az AutoGrid mérőrendszer (10. ábra) 4 CCD kamerát használ mobil mérőfejekkel.

Az alakváltozásokat a munkadarab felületére felvett 2×2 mm-es, négyzetrácsos háló torzulásának mérésével határozhatjuk meg.

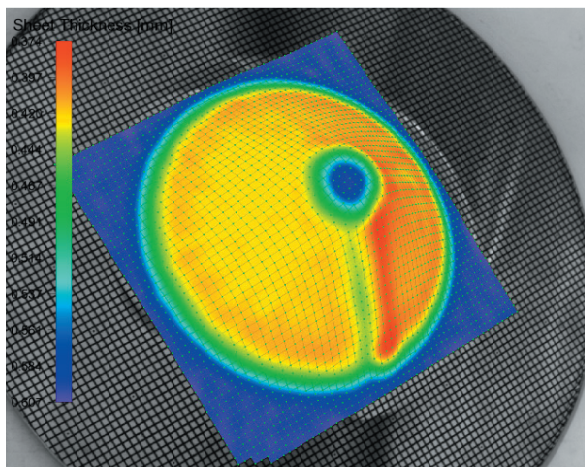
Az AutoGrid rendszerben a képek rögzítése kétféle módszerrel történhet: *normál*, illetve *eljárás közbeni* felvétellel. A *normál* felvételt alapvetően az alakítási eljárások utáni alakváltozási elemzésre használjuk. Az *eljárás közbeni* képrögzítési opció lehetővé teszi az alakítási folyamat közbeni alakváltozás mérését, kiértékelést is. Ezt a lehetőséget különösen az alakítási határgörbék meghatározásánál hasznosítjuk.

A képrögzítést követően, a képek automatikus kiértékelésével, az erre a célra kidolgozott szoftver segítségével meghatározhatjuk a rácspont koordináták 3D-s térbeli helyét (12. ábra.), amelyből az alakváltozási értékek számíthatók. A képek rögzítésénél a 3D-s képet a 4 kamera képéből határozzuk meg.



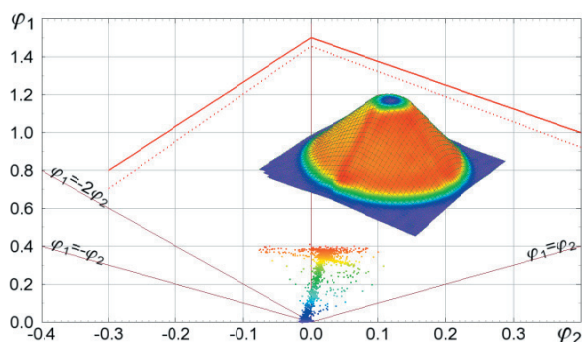
12. ábra. A rácspontok térbeli elhelyezkedése alapján meghatározott 3D-s háló

A mérés szoftveres elemzésével számos, az alakítási folyamat legfontosabb jellemzőit bemutató eredményt szolgáltatathatunk: főalakváltozások, összehasonlító nyúlás, falvastagság-eloszlás, stb. A falvastagság eloszlását mutatja a 13. ábra.



13. ábra. Falvastagság eloszlása

A különböző alakváltozási utak mentén meghatározott φ_1 és φ_2 főalakváltozási értékeket diagramban ábrázolva az alakítási határ diagramot kapjuk. A 14. ábrán az Al 1050 A anyagminőségű alumínium ötvözet inkrementális alakításra meghatározott alakítási határdiagramjában az alakított munkadarabon mért φ_1 és φ_2 főalakváltozási értékeket ábrázoltuk.



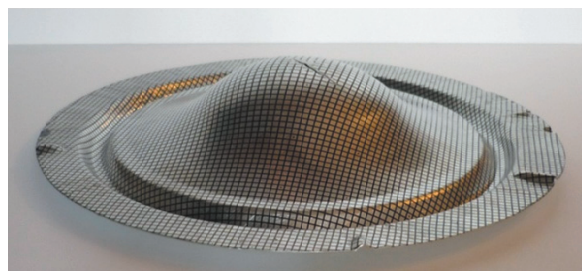
14. ábra. Alakítási határ diagram

4.1. Az alakíthatóság elemzése

Amint azt már korábban említettük a hagyományos képlékenyalakító eljárásoknál merev szerszámokat, a munkadarab alakjának megfelelően kiképzett alakító bélyeget és matricát, míg az inkrementális alakításnál általában csak egy egyszerű, gömbfejű alakító bélyeget használunk. Az inkrementális lemezalakításnál az alakító szerszámelem mozgásának térbeli vezérlésével az anyagban, elemi alakítási lépések sorozatával nagyobb alakítást tudunk létrehozni, mint a hagyományos alakításokkal. Ennek igazolása érdekében a Vialux optikai mérőrendszer segítségével bemutatjuk ugyanazon geo-

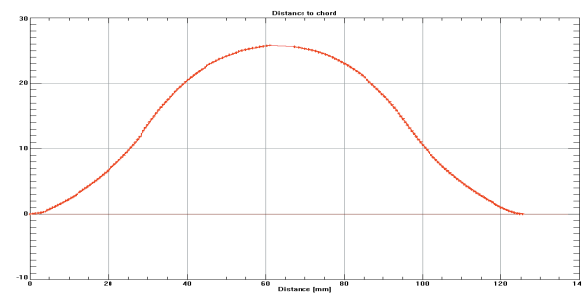
metriájú munkadarab elkészítését hagyományos alakító eljárással, és az inkrementális alakítással.

Az alakíthatósági vizsgáló berendezésen, egy 100 mm-es gömbfejű bélyeggel a lemezt hagyományos alakítással szakadásig alakítottuk. Az így elkészített munkadarab fényképe látható a 15. ábrán.



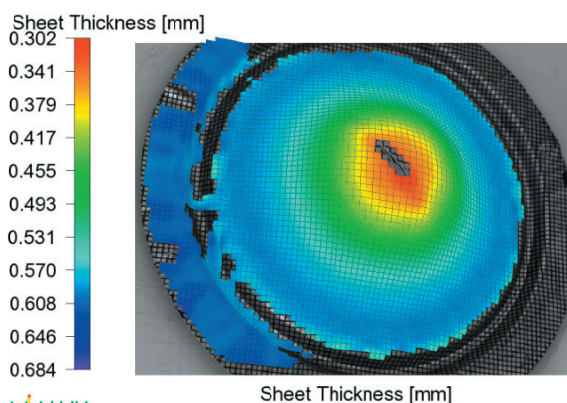
15. ábra. Hagományos képlékenyalakító eljárással készített munkadarab

Mivel a lemezt ebben az esetben is behálóztuk az alakítást követően a Vialux optikai mérőrendszer segítségével – metszetek készítésével – meghatározhatjuk a pontos geometriát (16. ábra) amit inkrementális alakítással is létre kívánunk hozni.



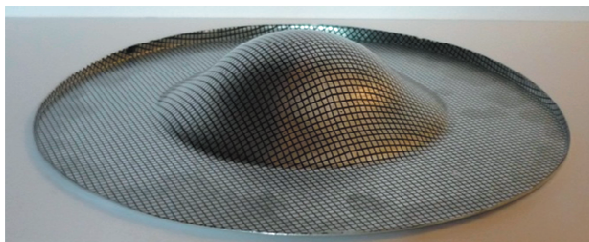
16. ábra. A munkadarab geometria meghatározásához készített metszeti kép hagyományos képlékenyalakító eljárással készített munkadarabon

Az alakítás elemzése során az ipari körülmények között is a legegyszerűbben összehasonlítható értékeket a falvastagság változás eloszlása mutatja (17. ábra).



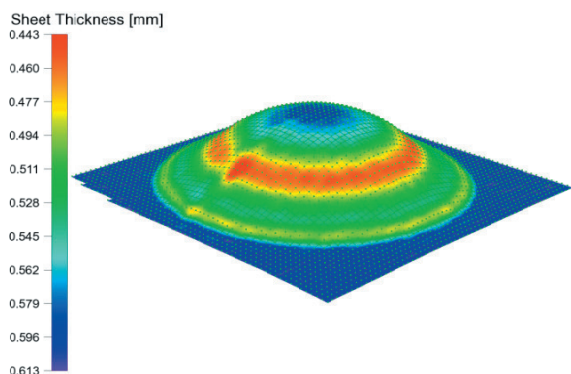
17. ábra. A falvastagság eloszlása hagyományos képlékenyalakító eljárással készített munkadarabon

Az inkrementális alakítás során azonos méretű és tulajdonságú lemezt alakítottunk 10 mm átmérőjű, gömbfejű alakító bélyeggel, a bélyeget a megvalósítandó geometriának megfelelő pályán mozgatva. Az így elkészített munkadarabot szakadás nélkül kialakítottuk, amelyet a 18. ábra mutat.

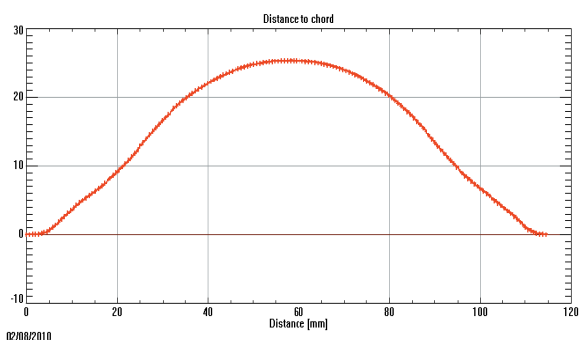


18. ábra. Inkrementális alakítással készített munkadarab

Az inkrementális alakításnál a falvastagság eloszlását a falszög változása igen számottevően befolyásolja. Az inkrementális alakítással készített munkadarab falvastagság eloszlását szemlélteti a 19. ábra.



19. ábra. Falvastagság eloszlása inkrementális alakítással készített munkadarabon



20. ábra. A geometria ellenőrzéséhez készített metszeti kép inkrementális alakítással készített munkadarabon

4.2. Az inkrementális alakítás modellezése

Napjaink informatikai hátterével elérhetővé vált a bonyolult matematikai-mechanikai modellekkel leírható alakító eljárások numerikus modellezése is.

Az alakítástechnikában, különösen a lemezalakítás területén e célra számos szoftver áll rendelkezésünkre.

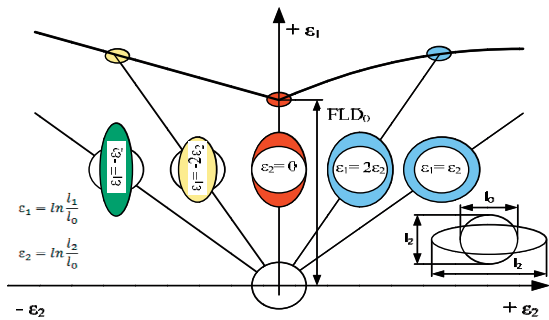
A modellezés fő feladata, hogy megismerjük az alakíthatóság határait, a modellező programok alkalmazhatóságát, a modellezés pontosságát, korlátait. Az inkrementális alakítás modellezéséhez a MARC általános végeleemes szoftvert használtuk.

Az elemzés során lehetőség van a tényleges alakítások optikai mérőrendszerrel kapott eredményeinek és a numerikus modellezés eredményeinek összevetésére, ezáltal a program megbízhatóságának ellenőrzésére is. A továbbiakban alapvető célkitűzésünk, hogy ezek az eljárások és vizsgálati-elemzési technikák, a kísérleti és modellezési tapasztalatokat felhasználva minél szélesebb körben bevezetésre kerüljenek az iparban.

Az összehasonlítás során kulcskérdés, hogy az értékelés, összehasonlítás, milyen szempontok szerint történjen: mi az a célszerűen megválasztott jellemző, ami jól mérhető mind a tényleges mind a modellkísérletek során és megfelelő információt hordoz a folyamat megértése szempontjából.

Összetettebb alakítások esetén a hagyományos mérőszámok nem elégségesek. A bonyolultabb alakítás követelményeit jobban jellemző, és a lemez anizotrópiáját is tartalmazó, komplex mérőszámok kifejlesztése és alkalmazása vált szükségessé. Előtérbe kerültek az alakíthatósági határállapotot jellemző mérőszámok, diagramok. A napjainkban széles körben elterjedt végeleemes módszereket alkalmazó, számítógépes technológiai- és szerszámtervező rendszerek a hagyományos anyagjellemzők mellett az alakíthatóság értékelésére alapvetően az alakíthatósági határdiagramokat (FLD) alkalmazzák.

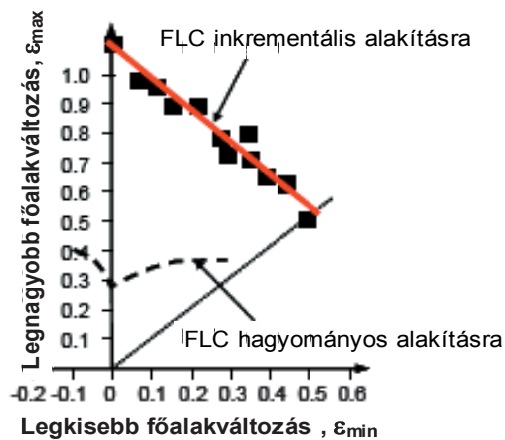
Az alakítási határdiagramok alkalmazásának fő célja, hogy meg tudjuk határozni alakítás során azt a biztonságos tartományt, ahol az alakítás, törés, repedés veszélye nélkül, biztonsággal elvégezhető, illetve azt a kritikus zónát, ahol nem-kívánt mértékű elvékonyodás, vagy törés legvalószínűbben bekövetkezik. Egy adott pontban az alakváltozási állapot, a síkban értelmezett főalakváltozásokkal (φ_1 , φ_2) egyértelműen jellemezhető. Az FLD-k a legnagyobb és a legkisebb főalakváltozások (φ_1 , φ_2) koordináta rendszerében ábrázolják a károsodási határeseteket. A tönkremenetelt eredményező károsodási pontokat összekötő görbét nevezik alakítási határgörbének. Az alakítási határgörbék (FLC)-k meghatározhatók elméleti úton és kísérleti módszerekkel is. A kísérleti módszereknél az alakítás előtt, valamilyen – rendszerint kör alakú, vagy négyzetrácsos hálót, visznek fel a lemez felületére. A körök, az alakítás hatására „ellipszisekké” torzulnak. Körháló alkalmazása esetén az eredeti kör átmérőjéből és az alakítás során ellipszis alakúvá torzult háló nagy és kis tengelyeiből a főalakváltozások közvetlenül meghatározhatók. Egy ilyen hagyományos diagramot szemléltet a 21. ábra, a jellegzetes alakváltozási utakat is feltüntetve. Hasonlóképpen a négyzetrácsos háló alkalmazása esetén is – némiképp bonyolultabb algoritmus alkalmazásával – a főalakváltozások pontról-pontra meghatározhatók.



21. ábra. Hagymányos lemezalakításra érvényes alakíthatósági határdiagram

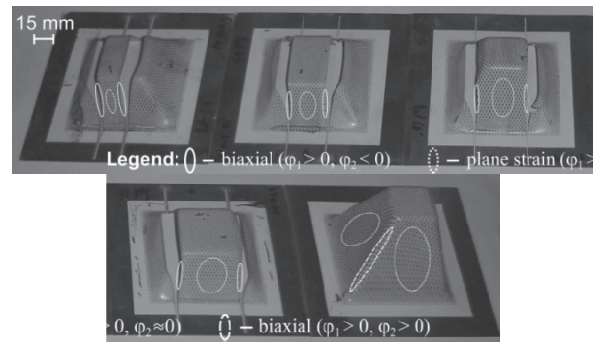
Az alakítási határdiagram egy megbízható eszköz az alakítási technológiákban, amellyel minősíthetjük az alakítási folyamatot, figyelembe véve az anyag alakíthatósági tulajdonságait. A kísérleti úton mért értékek a diagramon egy pontthalmazként jelennek meg, amelyet könnyen összehasonlíthatunk az anyagra vonatkozó alapadatokkal, azaz az alakíthatósági határgörbével.

Az inkrementális alakításnál is fontos a különböző alakváltozási történeteket is egybefoglaló alakíthatósági határdiagramok ismerete. Míg a klasszikus lemezalakító eljárásoknál az alakítási határgörbe alakja a 21. ábrán is látható V-alakkal jellemezhető, az eddigi kutatások azt mutatják, hogy az alakítási határgörbe inkrementális alakításnál jó közelítéssel egy negatív iránytangensű egyenessel adható meg, amint az a 22. ábrán is látható.



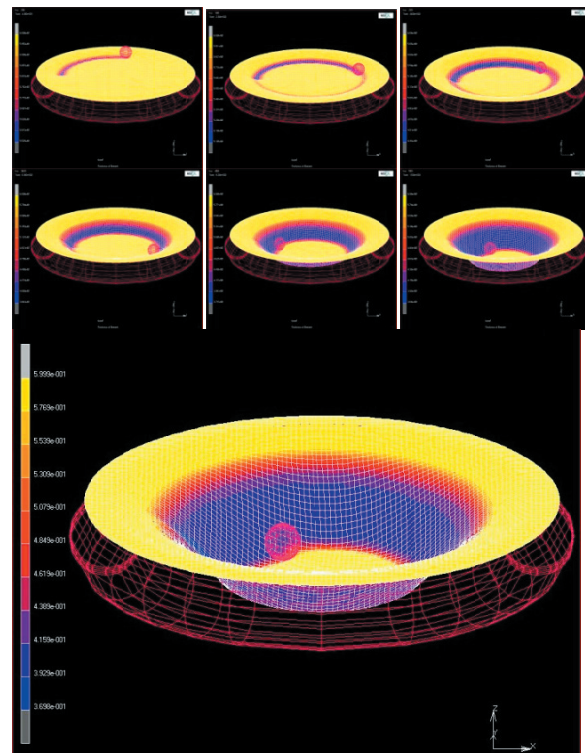
22. ábra. Inkrementális alakításra érvényes alakítási határgörbe

Az inkrementális alakítás határdiagramjának meghatározása a hagyományos alakításnál megszokottnál is összetettebb feladat. Amint az alakítási határdiagramok elméletéből is ismert [8] a határgörbe meghatározásához többféle próbatest kialakítást alkalmaznak. Ugyanez érvényes az inkrementális alakítás esetére is. A szokásosan alkalmazott próbatestek csonkakúp, félgömb, hiperboloid, vagy gúla alakúak. A 23. ábra az inkrementális alakítás határdiagramjainak meghatározására kifejlesztett, speciális, osztott munkadarab kialakítást szemléltet.



23. ábra. Inkrementális alakítással készített próbatestek az alakíthatósági határgörbe meghatározására

Az inkrementális lemezalakítás legfontosabb technológiai paramétereit vizsgálva modelleztük az elvégzett kísérleteket. A 24. ábrán egy 45°-os falfszögű csonka kúp falvastagság eloszlása látható az alakítási folyamat során.



24. ábra. 45°-os csonka kúp inkrementális alakítási folyamatának modellezése

A modelleknél 4 csomópontos héj elemeket használtunk. A szimulációkban a valóság minél pontosabb leírása érdekében további kísérletekre van szükség az anyagra vonatkozó legfontosabb bemeneti paraméter az alakítási határgörbe minél pontosabb meghatározásában. A MARC szoftverben elvégzett szimulációk megmutatták, hogy a program alkalmas az inkrementális alakítás modellezésére. A végleges eredmények kialakításához további szimulációk elvégzésére van szükség.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk egy EUREKA projekt keretében folyó kutatás, az inkrementális lemezalakító eljárás elemzésével foglalkozik. A bemutatott rövid ismertetésből is nyilvánvaló, hogy az inkrementális alakító eljárások számos előnnyel rendelkeznek. Az eljárás legfontosabb előnyeit röviden az alábbiakban összegezhetjük:

- Összetett, bonyolult alkatrészek gyorsan, egyszerűen gyárthatók közvetlenül az alkatrész CAD modelljéből előállított szerszámpálya vezérlő programmal.

- Az eljárás nem igényel különleges szerszámozást, sőt lényegéből fakadóan rendszerint csak egy viszonylag egyszerű, általánosan alkalmazható alakító bélyegre van szükség.

- Az előzőkből következően az eljárás kiválóan alkalmas gyors prototípus gyártásra és kissorozatú gyártásra egyaránt.

- Az alkatrész kialakításának módosítása a gyártásban könnyen és gyorsan megvalósítható, a bélyeg mozgását vezérlő CNC program módosításával, ezáltal nagyfokú rugalmasságot biztosítva az alkatrészek széles választékának és változatainak előállításában.

- Ugyancsak az eljárás lényegéből fakadóan a pillanatnyi képlékeny zóna kis kiterjedésű és növekményi természetéből következően az alakíthatóság jelentős növekedését eredményezi a hagyományos eljárásokhoz viszonyítva, ezáltal

- egyrészt nehezen alakítható anyagok megmunkálására is alkalmas,

- másrészt összetett geometriájú alkatrészek a hagyományos alakító eljárásokhoz viszonyítva kevesebb alakítási lépéssel megvalósíthatók.

- Nem igényel különleges megmunkáló gépet, a legtöbb, legalább 3-tengelyes CNC vezérléssel rendelkező egyetemes megmunkáló gépen is elvégezhető.

- A gyártandó alkatrész méretét lényegében csak a megmunkáló gép méretei korlátozzák.

Az eljárásnak természetesen vannak bizonyos hátrányai is, amelyeket röviden az alábbiakban összegzünk:

- Az eljárás legnagyobb hátrányaként azt kell megemlíteni, hogy a gyártási idő a hagyományos alakító eljárásokhoz képest – az eljárás inkrementális, növekményi jellegéből következően – lényegesen nagyobb.

- Ebből következően az eljárás termelékenysége is kicsi, következésképpen az egyedi, illetve kissorozatú gyártásban lehet csak versenyképes alternatíva.

Egy további hátrányként megemlíthető, hogy $\alpha = 90^\circ$ -os falszögű alkatrészek – ugyancsak az eljárás lényegéből fakadóan – egy lépésben nem gyárthatók, többlépéses alakító eljárást kell alkalmazni.

5. SUMMARY

This paper presents a study on a novel sheet metal forming process, namely the incremental sheet metal forming. The research work presented in this paper is the part of a joint European project performed under the umbrella of

EUREKA project initials. It is evident from the short description that incremental forming processes have several advantages. The most important advantages of the process can be summarized as follows:

- *Complex, complicated parts can be produced quickly, directly from the CAD model of the part with controlling the tool path by CNC control system.*

- *The process does not require special tools; usually it only needs a simple, generally applied forming punch.*

- *The process is suitable for fast production of prototypes and for application in small series production, too.*

- *Any modification of the part to be produced can be done easily and quickly, just modifying the CNC program controlling the punch movement. Hereby, it provides great flexibility to produce wide range and large variety of parts.*

- *Due to the incremental nature of instantaneous plastic zone it results in significant increase of formability compared to traditional processes.*

6. IRODALOM

- [1] LESZAK, E.: *Apparatus and process for incremental dieless forming*, US Patent, US 3342051A1, published 1967.09.19
- [2] JESWIET, J. et al: *Asymmetric single point incremental forming of sheet metal*, Annals of CIRP. v. 54. pages 623-650. 2005
- [3] BAMBACH, M., HIRT, G., JUNK, S.: *Modelling and experimental evaluation of the incremental sheet CNC sheet metal forming*, 7th Int. Conf. on Computational Plasticity, COMPLAS'2003, Barcelona, 7-10. April 2003.
- [4] HIRT, G.: *Tools and Equipment used in Incremental Forming*, 1st Incremental Forming Workshop, University of Saarbrücken, 9 June 2004. On CD-ROM.
- [5] AMINO, H., LU, Y., MAKI, T., OSAWA, S., FUKUDA, K.: *Dieless NC Forming, Prototype of Automotive Service Parts*, Proceedings of the 2nd International Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing (ICRPM), Beijing, 2002.
- [6] MATSUBARA, S.: *Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Tool*, Journal of the JSTP, v. 35, pp. 1311-1316, 1994.
- [7] AOYAMA, S., AMINO, H., LU, Y., MATSUBARA, S.: *Apparatus for dieless forming plate materials*, Europäisches Patent EP0970764, 2000.
- [8] TISZA, M., KOVÁCS, P. Z.: A complex measuring and evaluation system for determination of forming limit diagrams, *Materials Science Forum* Vol. 589 (2008) pp 233-238.
- [9] TISZA, M., KOVÁCS, P. Z.: *Hatékony inkrementális alakító eljárások kidolgozása*, Kutatási jelentés, Készült az EUREKA_HU_08 (OMFB 220/2009) projekt keretében, Miskolc, 2010. pp. 1-45.

7. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A cikkben ismertetett inkrementális lemezalakító eljárások vizsgálatára az EUREKA_HU_08-ISM- FP_ME (nyilvántartási száma: OMFB 220/2009) számú projekt keretében került sor. A szerzők ezúton is megköszönik a Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatalnak a kutatómunkához nyújtott pénzügyi támogatást.