

## ALAKÍTHATÓSÁGI ELEMZÉSEK INKREMENTÁLIS LEMEZALAKÍTÁSNÁL

**Tisza Miklós**

egyetemi tanár, tanszékvezető

Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék,

3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros

[tisza.miklos@uni-miskolc.hu](mailto:tisza.miklos@uni-miskolc.hu)

### **Összefoglalás**

Az utóbbi években egyre erőteljesebb igény jelentkezik rugalmas, új innovatív alakító eljárások kidolgozására és széles körű alkalmazására. A hagyományos képlékenyalakító eljárások általában merev, fix kialakítású szerszámokat alkalmaznak: a munkadarab alakját megfelelően kiképzett alakító bélyeggel és matricával együttesen határozzuk meg. Azonban különösen olyan esetekben, amikor a szerszámok költségeinek csökkentése fontos szempont, a szerszám nélküli, rugalmas alakító eljárások alkalmazása különösen előnyös lehet. Az inkrementális alakítás egyike e követelményeket kielégítő új innovatív technológiáknak. A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszéke a Ljubljana-i Egyetemmel közösen ezen új technológiai eljárás kutatására nyert el EUREKA projektet. Az ennek keretében megkezdett kutatásokat a Miskolci Egyetem hazai és nemzetközi versenyképességének komplex megújítása című projektben folytatjuk.

**Kulcsszavak:** inkrementális lemezalakítás, technológiai paraméterek

### **Abstract**

Recently, there is a strong demand for the elaboration and widespread application of new, flexible, innovative forming processes. Conventional forming processes apply rigid tool constructions: the shape of the part to be produced is usually defined by the forming punches and dies. However, particularly in those cases when the reduction of tool costs is of utmost importance, the application of flexible, dieless forming processes has the highest priority. Incremental sheet metal forming is one of the most promising innovative new processes elaborated during the last decades. The Department of Material Processing Technologies at the University of Miskolc together with the Production Engineering Department at the University of Ljubljana have gained a joint EUREKA project to study these new processes and to further develop them. The research work started in the above project is further continued within the framework of the Hungarian national project entitled: Complex renewal of domestic and international competitiveness of the University of Miskolc.

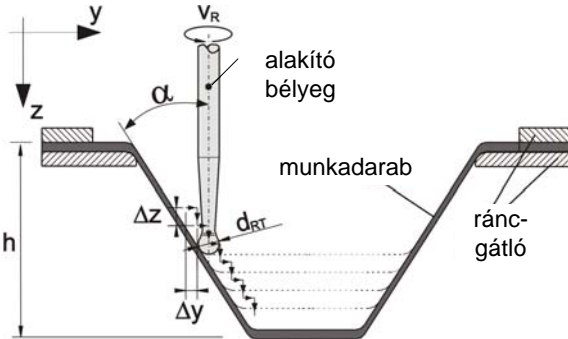
**Keywords:** incremental sheet forming, technological parameters

## 1. Bevezetés

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 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.

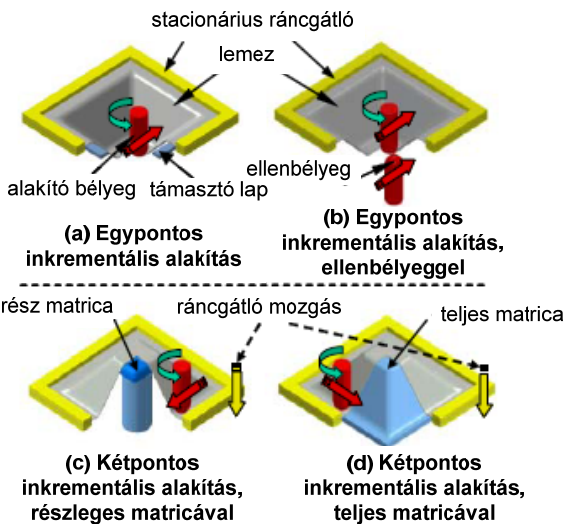
Az inkrementális alakítás technológiai változatait elemezve két alapvető csoportot különböztethetünk meg, nevezetesen a szimmetrikus és az aszimmetrikus inkrementális lemezalakítást [2]. Mindkét esetben az alakítást egy viszonylag egyszerű kialakítású, sokcélúan felhasználható alakító bélyeggel végezzük, amelynek derékszögű koordinátákban meghatározott mozgását a megmunkáló gép CNC vezérlése biztosítja. Az x és az y tengelyek a



1. ábra. Elvi vázlat az inkrementális alakítás értelmezéséhez

lemez síkjában értendők, míg a z-tengely jelöli a bélyeg elmozdulásának irányát, amelynek mentén az alakítás történik. A szimmetrikus inkrementális alakítás közvetlenül a fémnyomásból eredeztethető, amelynél a gyártandó szimmetrikus alkatrész alakítását a fémnyomásnál megismert túske és alakító szerszám helyett egyetlen, ún. egy pontos alakító szerkezettel végezzük (az eljárás elvi vázlata az 1. ábrán látható).

Az inkrementális alakítások második főcsoportját az aszimmetrikus inkrementális alakítás jelenti, amely további



2. ábra. Az aszimmetrikus inkrementális lemezalakítás négy alapesete [3]

alcsoportokra bontható. Az aszimmetrikus inkrementális alakítás eljárás változatainak 2. ábrán látható átfogó rendszerezését Bambach és Hirt ismertette [3].

Általános esetben az inkrementális alakításhoz szerszámként 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 szárátmérőjét 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.

## 2. Az inkrementális alakítás technológiai, alakíthatósági kérdései

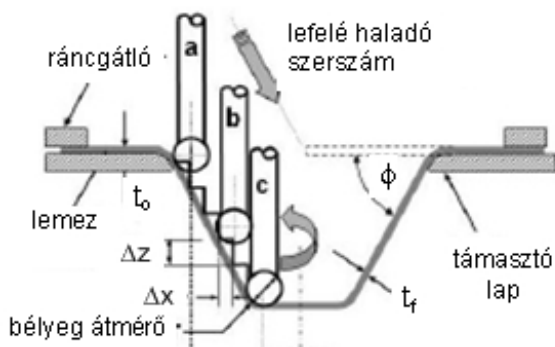
Az inkrementális lemezalakítás legfontosabb technológiai paramétereit a lemezvastagság ( $t$ ), a szerszám átmérő ( $d$ ), a szerszám forgási sebesség ( $\omega$ ), a behúzási szög, azaz a munkadarab falszöge ( $\phi$ ), valamint a bélyeg  $x$  és  $z$ -tengely irányú elmozdulásai ( $\Delta x$ , illetve  $\Delta z$ ) jelentik. E paraméterek jelölése a 3. ábrán is látható, amely egyben az inkrementális lemezalakítás folyamatának jobb megértését is segíti. (Az ábra egyponτος, inkrementális lemezalakításra vonatkozik.)

Az előzőekben felsorolt és a 3. ábrán is bejelölt technológiai paraméterek mind az alakíthatóságra, mind pedig a termék minőségére lényeges hatást gyakorolnak, amelyek elemzésére a következő pontokban térünk ki részletesen.

### 2.1. A technológiai paraméterek és az alakíthatóság kapcsolata

Mind az eljárás adott célra való alkalmazhatósága, mind pedig az alakítási folyamat végeeselemes modellezése szempontjából kiemelkedő fontosságú az alakíthatóság kérdéseinek vizsgálata, az eljárással megvalósítható alakváltozási határértékek meghatározása. E határértékeket a lemezalakításban legáltalánosabban az alakítási határdiagramokkal adjuk meg, amelyekkel részletesen a 2.2. pontban foglalkozunk.

Kezdetben – az inkrementális alakításra érvényes alakítási határdiagramok hiánya miatt – az alakíthatóság jellemzésére a 3. ábrán is bejelölt, ún. behúzási szöget ( $\phi$ ) alkalmazták. Ha a  $\phi$  behúzási szög értékét növeljük, a falvastagság a



3. ábra. Egyponτος, inkrementális alakítás főbb technológiai paraméterei

$$t_r = t_o \sin \alpha \quad (1)$$

összefüggéssel megadott szinusz törvény szerint változik, azaz csökken, ahol az  $\alpha$  falszögre az  $\alpha = 90^\circ - \phi$  összefüggés érvényes. Amikor a falvastagság csökkenés olyan mértéket ér el, amelynél az anyagban repedés keletkezik, az ehhez tartozó ( $\phi_{\max}$ ) értékét tekintették az alakíthatóság határértékének. Az ily módon elfogadott  $\phi_{\max}$  anyagjellemző annak megítélésére is alkalmas, hogy az alakítás egy, vagy több egymást követő alakítási lépésben végezhető-e el.

Bár az inkrementális alakítás alakváltozási állapota annál jóval összetettebb, hogy a maximális behúzási szög ( $\phi_{\max}$ ), mint egyetlen paraméter elegendő legyen az alakíthatóság megítélésére, mégis számos olyan vizsgálatot dolgoztak ki az inkrementális alakítás alakváltozási határértékeinek meghatározására, amelyeknél az alakíthatósági határértéket a  $\phi_{\max}$  értékéhez kötötték. Az egyik ilyen – legáltalánosabban elfogadott benchmark vizsgálat kidolgozása Micari és Ambrogio [4] nevéhez fűződik. Vizsgálataik alapján egy olyan csonkakúp alakú próbatestet javasoltak, amelynél az alapkúp átmérője  $D = 72$  mm és a magassága  $H = 40$  mm. A vizsgálatokat az előzők szerint rögzített geometriai paraméterekkel, a  $\phi$  behúzási szög változtatásával végezték és a  $\phi_{\max}$  értékeként az első repedés megjelenéséhez tartozó behúzási szöget tekintették.

Jeswiet és munkatársai [5] parametrikus kísérlet sorozat eredményeiből összefüggést állítottak fel az alakíthatóság jellemzésére alkalmazott  $\phi_{\max}$  és a lemezvastagság között. Különböző alumínium ötvözeteket vizsgálva, azonos jellegű, csak a paramétereikben különböző összefüggéseket állapítottak meg, például

$$\begin{aligned} \phi_{\max} &= 8,5t_o + 60,7^\circ && \text{AA 3003 – O Al ötvözetre, és} \\ \phi_{\max} &= 3,3t_o + 58,3^\circ && \text{AA 5754 – O Al ötvözetre.} \end{aligned} \quad (2)$$

Az előzőkben tárgyalt egyszerű alakíthatósági paraméter mellett természetesen az inkrementális alakításnál is fontos a különböző alakváltozási történeteket is magába foglaló alakítási határ diagramok meghatározása, amelyre a 2.2. és a 2.3. pontokban térünk ki részletesebben.

Az előzőkből is nyilvánvaló, és az inkrementális alakítás sajátos alakváltozási állapotából is következik – nevezetesen, hogy minden egyes pillanatban csak egy kis tartományra lokalizált képlékeny zóna létezik – ezért a hagyományos alakító eljárásokra érvényes alakítási határ diagramok nem alkalmazhatók közvetlenül az inkrementális alakításra.

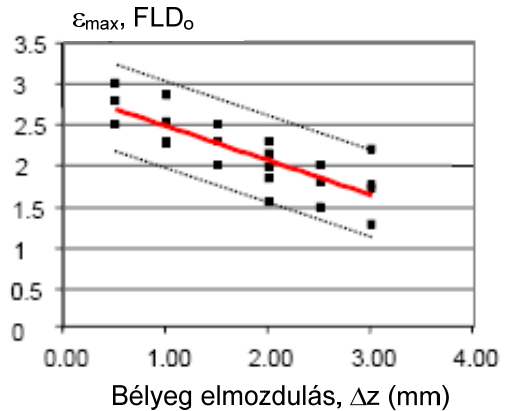
A 3. ábrán feltüntetett alapvető technológiai paraméterek (a lemezvastagság, a szerszám átmérő, a szerszám  $x$  és  $z$ -tengely irányú elmozdulása, valamint a szerszám forgási sebessége) az alakíthatóság szempontjából is fontos szerepet játszanak. A következőkben röviden ezen alapvető paramétereknek az alakíthatóságra gyakorolt hatását elemezzük.

Hirt és munkatársai [9] három különböző vastagságú, DC04 anyagminőségű, mélyhúzható acéllemezzel végzett kísérlet sorozat eredményei alapján kimutatták, hogy a lemezvastagság jelentős hatást gyakorol az előzőkben elemzett  $\phi_{\max}$  maximálisan megengedhető falszögre. Hasonló következtetésre jutott Kim és Park [10] AA 1050-O anyagminőségű alumínium ötvözet vizsgálatakor. Kísérleteiket vékony,  $t_0 = 0,3$  mm és  $t_0 = 0,5$  mm vastagságú lemezeken végezték. A lemezvastagság 0,5 mm-ről 0,3 mm-re való csökkentésével az alakítási határgörbe  $FLD_0$  értéke 1,2-ről 0,92-re csökkent.

A szerszám átmérő hatását elemezve Micari [11] megállapította, hogy bizonyos határok között a szerszám átmérő csökkentése az alakíthatóságot növeli. Ezt a megállapítást azzal támasztotta alá, hogy míg a kisebb szerszám átmérő esetén az alakváltozó zóna közvetlenül a szerszám-munkadarab érintkezésére koncentrálódik, a nagyobb szerszám átmérő a képlékeny zóna nagyobb tartományra való kiterjedését eredményezi. Hasonló eredményre jutott Hirt is [7], aki 6-30 mm átmérőjű szerszámokkal végzett kísérleteket,  $t = 1,5$  mm vastagságú, DC04 anyagminőségű lágyacélon. A szerszám átmérőt 30 mm-ről 6 mm-re csökkentve, az alakíthatóság közel kétszeres növekedését tapasztalta.

A technológiai paraméterek közül a bélyeg elemi, növekményi elmozdulásai ( $\Delta x$  és  $\Delta z$ ) is jelentős hatással vannak az alakíthatóságra. (A marógépen való megmunkálás analógiáját felhasználva a  $\Delta z$ , mint *fogásmélység*, míg a  $\Delta x$ , mint az *előtolás* értelmezhető.) A  $\Delta z$  értékének növelésével a növekvő mértékű alakváltozás következtében a lemez alakíthatósága csökken, amint az a 4. ábrán is látható. Micari [10]  $t_0 = 1$  mm kiinduló lemezvastagságú, Al 1050-O anyagminőségű alumínium ötvözetre a 4. ábrán bemutatott diagramon a szórási tartományt is feltüntette. Hasonló eredményekre jutott Hirt [9], valamint Hagan és Jeswiet [12] is. Mivel adott falszög esetén  $\Delta z$  értékével a  $\Delta x$  „előtolás” érték is adott, ugyanezt állapíthatjuk meg a szerszám előtolás és a megvalósítható maximális alakváltozás kapcsolatára is.

Micari [10] szerint a szerszám forgási sebességének növelése ugyancsak növeli az alakíthatóságot. Ezt egyrészt a nagyobb szerszám sebesség által keltett lokális hő hatásának, másrészt a szerszám és a lemez közötti súrlódás csökkenésének tulajdonította. Ugyanakkor a szerszám fordulatszám növelésének határt szab egyrészt a szerszám növekvő kopása, másrészt az a körülmény, hogy a súrlódás csökkentésére alkalmazott kenőanyag elége is bekövetkezhethet, amely részben ellenté-

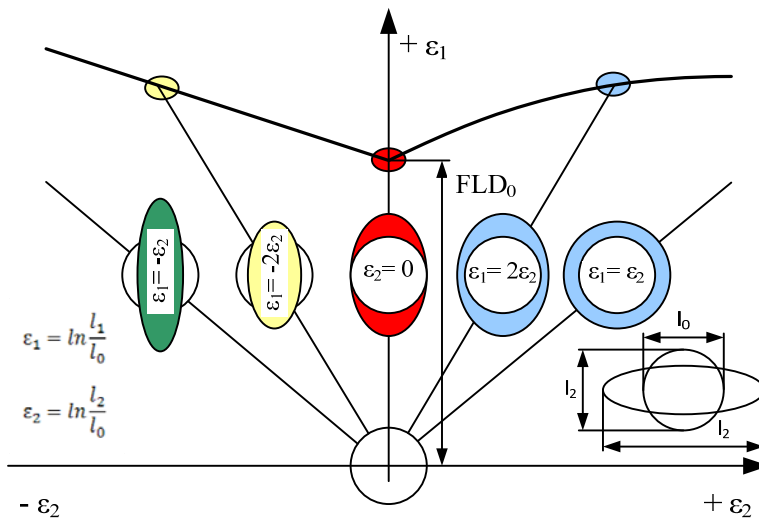


4. ábra. Az  $\varepsilon_{\max}$  ( $FLD_0$ ) változása a  $\Delta z$  bélyeg elmozdulás függvényében

tes hatást fejt ki, másrészt pedig biztonsági és környezetvédelmi problémákat is felvet.

## 2.2. Alakítási határdiagramok

Az eddigiekben az alakíthatóság és a technológiai paraméterek kapcsolatával, az alakíthatóságot befolyásoló alapvető tényezőkkel foglalkoztunk. Azonban, ahogyan arra már korábban is utaltunk, inkrementális alakításnál is fontos a különböző alakváltozási történeteket is magába foglaló alakítási határdiagramok ismerete. A hagyományos lemezalakító eljárásoknál az alakítási határdiagram alakja jellegzetes V-alakkal jellemezhető, amint az 5. ábrán is látható.

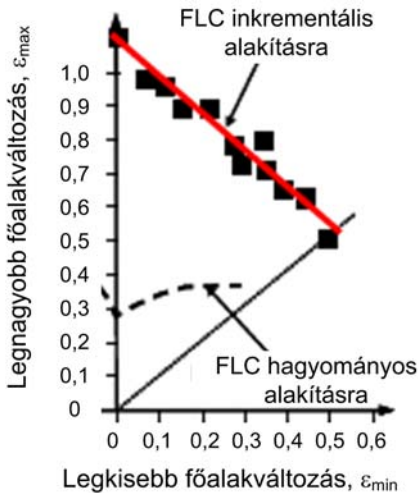


5. ábra. Hagományos lemezalakításra érvényes alakítási határdiagram

Az 5. ábrán néhány jellegzetes alakváltozási történetet bemutató alakítási útvonalat is feltüntetünk a legnagyobb ( $\epsilon_1$ ) és a legkisebb ( $\epsilon_2$ ) főalakváltozások kapcsolatának megadásával. Mivel a határdiagramot gyakran a legnagyobb és legkisebb főalakváltozás irányát szemléletesen érzékeltető körháló felvitelével és torzulásának mérésével határozzuk meg, az 5. ábrán is megadtuk az alakítás előtt szabályos körháló alakjának az alakítási folyamat közbeni megváltozását.

Az 5. ábrán bemutatott diagram első változatát Keeler [13] javasolta az alakítási határértékek megállapítására. A Keeler által kidolgozott alakítási határdiagram csak a pozitív  $\epsilon_1$  és  $\epsilon_2$  főalakváltozások tartományára érvényes. A diagramot Goodwin [14] fejlesztette tovább, kiterjesztve a legkisebb főalakváltozások negatív tartományára is, ezért e diagramokat a szakirodalom Keeler-Goodwin alakítási határdiagramoknak nevezi [17].

Az alakítási határdiagramok kísérleti meghatározása idő- és munkaigényes feladat. Napjainkban a lemezalakításban leginkább elterjedt két vizsgálati technika a Marciniak [15] és a Nakazima [16] nevével fémjelzett módszer. A hagyományos



**6. ábra.** Alakítási határdiagram hagyományos és inkrementális alakításra

Az inkrementális alakításra vonatkozó alakítási határdiagram meghatározása a hagyományos alakításnál megszokottnál is összetettebb feladat. Amint az alakítási határdiagramok elméletéből is ismert [19] a határgörbe meghatározásához többféle próbatest kialakítást alkalmaznak. Fokozottan érvényes ez az inkrementális alakításra. Az egyik legátfogóbb vizsgálat e területen Young és Jeswiet [23] nevéhez fűződik.

Öt különböző alakú próbatestet alkalmaztak az ún. kompozit FLD meghatározására. A próbatest alakok: csonka kúp, félgömb, hiperboloid, gúla és egy ún. „ötszirmú virágalak” amelyben alakítás közben egyidejűleg nyomó- és a húzófeszültségek is ébrednek. A különböző alakú próbatestek mindegyike egy alakítási határgörbét eredményez, amelyeket egyetlen diagramban egyesítve a legösszetettebb alakokra is alkalmazható, ún. kompozit alakítási határdiagramot kapunk.

### 2.3. Inkrementális alakítási határdiagram kísérleti meghatározása

A már említett EUREKA projekt keretében az inkrementális alakításra érvényes alakítási határdiagramok meghatározására mi a hagyományos alakításoknál alkalmazott Marciniak vizsgálat egy módosított eljárását alkalmaztuk [24]. A módszer elvi alapjait PhD értekezésében a projektben is közreműködő kutatóként Ales Petek dolgozta ki [25].

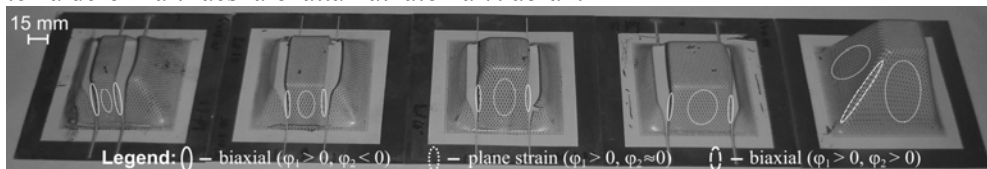
Az inkrementális alakításra érvényes alakítási határdiagram meghatározásához – a Marciniak módszerhez hasonlóan – azonos alaplemezből különböző bevágásokkal készített lemezcsíkokat használtunk. Az alaplemez 150×150 mm méretű

lemezalakításra érvényes alakítási határdiagramok meghatározásának önálló irodalma van, e helyen csak az alakítási határdiagramok elmélete és kísérleti meghatározása témában, a szerzők által készített összefoglaló tanulmányra utalunk [17].

Az eddigi kutatások azt mutatják, hogy az 5. ábrán bemutatott, hagyományos alakításokra vonatkozó alakítási határdiagramokkal szemben, az alakítási határgörbe inkrementális alakításnál jó közelítéssel egy negatív iránytangensű egyenessel adható meg, amint az a 6. ábrán is látható [18].

volt és négy további – az alaplemezzel azonos kiinduló méretű lemezből, 20, 30, 40 és 50 mm szélességű bevágással készített – lemez próbatestet alkalmaztunk. A vizsgálathoz Al 3003 minőségű alumínium lemezt használtunk. Mindegyik próbatestet 84×84 mm gúla alaplap méretekkkel jellemezhető, csonka gúla alakot eredményező vezérpályán mozgó bélyeggel alakítottuk. A vizsgálatok előtt a próbatestekre az alakváltozások mérése céljából  $d = 2$  mm-es körhálót vittünk fel. A vezérlőprogram olyan szerszám pályát határoz meg, amellyel a csonka gúla alapja 84×84 mm, az oldaléleknél a lekerekítési sugár 10 mm. A különböző méretű bevágásokkal készített próbatesteknél a bevágásoknál az ütésszerű hatások kiküszöbölésére az alaplemez méretével megegyező, folytonos felületű „védőlemezt” helyeztünk az alakítandó próbatest és az alakító szerszám közé.

A korábbi vizsgálatok eredményeiből tudjuk, hogy minimum két paraméter elemzése szükséges az inkrementális alakítás határ alakváltozási értékeinek vizsgálatánál, nevezetesen a maximális behúzási szög ( $\phi_{\max}$ ) és a megvalósítható maximális alakváltozás ( $\varepsilon_{\max}$ ). Ehhez meg kell határoznunk a maximális behúzási szög határértékét minden egyes próbatest geometriára. Ennek érdekében a kísérleteket minden lemez próbatest esetén 5 fokként növekvő falszöggel végeztük, miközben az alakítás többi paramétere nem változtattuk. A vizsgálatokat a próbatestek szakadásáig folytattuk. Az alakítási határgörbe (FLC) meghatározása két fő lépésből áll: az első lépés a munkadarab inkrementális alakítása, az előzőekben leírt módon, míg a második lépés az előzetesen a próbatestek felületére felvitt körháló alakítás hatására bekövetkezett torzulásának pontos mérése optikai alakváltozás méréssel. A mérésekből az optikai alakváltozás mérő rendszer a legnagyobb ( $\varepsilon_1$ ) és a legkisebb ( $\varepsilon_2$ ) főalakváltozásokat közvetlenül meghatározza. Az alakított próbatestek a deformált rácshálózattal láthatók a 7. ábrán.



**7. ábra.** Az inkrementális alakítási határgörbe meghatározásához alkalmazott alakított próbatestek a deformált rácshálózattal

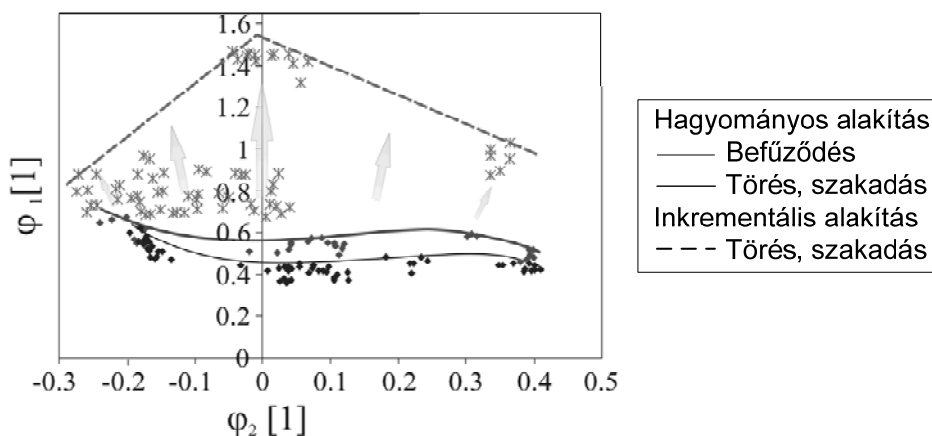
A különböző szélességű bevágásokat tartalmazó lemezcsíkok más-más alakváltozási állapotot testesítenek meg. A 150×150 mm méretű, bevágás nélküli alaplemez deformált hálózatán két jellegzetes alakváltozási tartomány figyelhető meg: a sík oldalfelületeken az anyag alapvetően az alakító bélyeg mozgásirányát követve áramlik, azaz lényegében síkalakváltozási állapot a jellemző ( $\varepsilon_1 \neq 0$ ,  $\varepsilon_2 \approx 0$ ). Ezzel szemben a sarkok görbült felületein (az oldallapok lekerekítési sugara környezetében) a lemez hosszirányban is alakváltozik, ezért itt kéttengelyű, biaxiális alakváltozási állapotról ( $\varepsilon_1 \neq 0$ ,  $\varepsilon_2 \neq 0$ ) beszélhetünk. Mivel mind a két főalakváltozás



pozitív, ez csak az alakítási határadiagram pozitív térnegyedének meghatározására alkalmas. Az alakítási határadiagram teljes tartományának meghatározásához általában további próbatestekre van szükség: erre a célra legáltalánosabban alkalmazott a Young és Jeswiet [23] által javasolt, ötszirmú virágalak. Azonban az általunk alkalmazott különböző szélességű lemezcsíkok (7. ábra) alakítása lokálisan ugyancsak olyan alakváltozási állapotokat eredményez, amelyekből az alakítási határadiagram negatív tartománya is meghatározható. A legkisebb főalakváltozás negatív értékei a lemezcsíkok bevágási élei környezetében észlelhetők, amint az a 7. ábrán is látható.

Az előzőekben leírt módszerrel meghatározott alakítási határadiagram látható Al3003 alumínium ötvözetre a 8. ábrán. Az ábrán feltüntettük ugyanezen anyagminőség hagyományos alakításra érvényes alakítási határgörbéit is. A 8. ábrából jól látható, hogy a teljes alakítási tartományban az inkrementális alakításra érvényes alakítási határgörbe a hagyományos alakításra érvényes alakítási határgörbe fölött halad. Különösen jelentős a különbség a  $\varepsilon_1 > 0$  és  $\varepsilon_2 = 0$  esetén, azaz síkalakváltozási állapotban. Síkalakváltozás esetén inkrementális alakítással közel háromszor nagyobb alakváltozás érhető el, mint ugyanezen alakváltozási állapotban hagyományos alakításnál.

A nagyobb alakváltozóképeség egyik lehetséges magyarázata az inkrementális alakítás ciklikus alakváltozási története, amely az ismételt képlékeny alakváltozás során egy szuperponált hidrosztatikus feszültségkomponenst eredményez, amint erre Hirt [26] is utalt. Egy másik gyakran felhozott érv az inkrementális alakításnál alkalmazott szerszám kisebb mérete. A kis szerszámátmérő az alakváltozást a bélyeg és az alakított lemez kis érintkezési felületére koncentrálja, a növekvő szerszám átmérő pedig egyre növekvő tartományra kiterjedően osztja el.



8. ábra. Alakítási határadiagram Al 1050 anyag hagyományos és inkrementális alakítására

### 3. Összefoglalás – Következtetések

A cikk magyar-szlovén nemzetközi együttműködésben, 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 összegezhjük:

- Összetett, bonyolult alkatrészek gyorsan, egyszerűen gyárthatók közvetlenül az alkatrész CAD modelljéből előállított szerszám pálya 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 – rendszerint lényegesen nagyobb.
- Ebből következően az eljárás termelékenysége is általában kicsi, következésképpen az egyedi, illetve kissorozatú gyártásban lehet csak versenyképes alternatíva.

## Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutatómunka az EUREKA\_HU\_ISMFP\_ME és a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt közös finanszírozásában – az Új Magyarország fejlesztési terv keretében – az Európai Unió támogatásával, és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## Irodalomjegyzék

- [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. pp. 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] MICARI, F. és AMBROGIO, G.: *A Common Shape for Conducting Incremental Forming Tests*, 1st Incremental Forming Workshop, University of Saarbrücken, 9 June 2004. On CD-ROM.
- [5] JESWIET, J. et. al.: *Asymmetric single point incremental forming of sheet metal*, Annals of CIRP. v. 54. pp. 623-650. 2005.
- [6] 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.
- [7] HIRT, G. JUNK, S., WITULSKI, N.: *Incremental Sheet Forming: Quality Evaluation and Process Simulation*, 7th ICTP International Conference on Technology of Plasticity, October 27-November 1, 2002, Yokohama, Japan, paper no. 343.
- [8] HIRT, G., JUNK, S., BAMBACH, M., CHOUVALOVA, I.: *Process Limits and Material Behaviour in Incremental Sheet Forming with CNC-Tools*, THERMEC 2003, International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials - Processing, Fabrication, Properties, Applications, July 7-11, 2003, Leganés, Madrid, Spain.
- [9] HIRT, G., AMES, J., BAMBACH, M., KOPP, R.: *Forming Strategies and Process Modelling for CNC incremental Sheet Forming*, Annals of CIRP vol 53/1/2004; pp. 203-206.
- [10] KIM, Y. H AND PARK, J. J.: *Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal*, Journal of Materials Processing Technology; vol. 130-131, 2002, pp. 42-46.
- [11] MICARI, F.: *Single Point Incremental Forming: recent results*, Seminar on Incremental Forming, 22 October 2004. Cambridge University. CD-ROM

- [12] HAGAN, E., AND JESWIET, J.: *Analysis of surface roughness for parts formed by CNC incremental forming*, IMECHE part B, J. of Engineering Manufacture. Vol. 218 No. B10, 2004. pp. 1307 – 1312.
- [13] KEELER, S. P.: *Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches*, Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA 1961.
- [14] GOODWIN, G. M.: *Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop*, Society of Automotive Engineers, 1968. 680093, pp. 380-387.
- [15] MARCINIAK, Z., KUCZYNSKI, K.: *Limit strains in the process of stretch forming of sheet metal*, Int. Journal of Mechanical Science, 1967. 9. k. pp. 609-620.
- [16] NAKAZIMA, K., KIKUMA, T., ASAKU, K.: *Study on the formability of sheet metal*, Yawata Technical Report, 1968. pp. 1-264.
- [17] KOVÁCS, P., TSIÁZ, M.: *Alakítási határdiagramok elméleti és kísérleti vizsgálata*, Kutatási jelentés, OTKA 61724, Miskolc, 2006. pp. 1-37.
- [18] YOUNG, D., AND JESWIET, J.: *Forming Limit Diagrams for Single Point Incremental Forming of Aluminium Sheet*, IMECHE part B, J. of Engineering Manufacture, vol. 219 part B 2005. pp. 1 – 6.
- [19] 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.
- [20] FILICE, L., FRATINI, L., MICARI, F.: *Analysis of Material Formability in Incremental Forming*, Annals of the CIRP, v. 51/1/2002: 199-202.
- [21] JESWIET, J., HAGAN, E., SZEKERES, A.: *Forming Parameters for Incremental Forming of Aluminum Sheet Metal*, IMECHE part B, J. of Engineering Manufacture. 2002 Vol. 216, pp. 1367 – 1371.
- [22] LIEVERS, W.B., PILKEY, A.K., LLOYD, D.J.: *Using Incremental Forming to Calibrate a Void Nucleation Model for Automotive Aluminum Sheet Alloys*, Acta Materiala, vol.52. (2004) pp. 3001-3007.
- [23] YOUNG, D., AND JESWIET, J.: *Forming Limit Diagrams for Single Point Incremental Forming of Aluminum Sheet*, IMECHE part B, J. of Engineering Manufacture, vol. 219. part B 2005. pp. 1 – 6.
- [24] KUZMAN, K., TISZA, M., PETEK, A., KOVÁCS, P.: *Investigation of Forming Limit Diagrams for Single Point Incremental Sheet Forming*, IDDRG 2010. Graz, 31.05.2010-02.06.2010. pp. 461-468.
- [25] PETEK, A.: *Definition of Stable Technological Window for Incremental Sheet Metal Forming*, PhD Thesis, University of Ljubljana, 2008. pp. 1-132.
- [26] HIRT, G.; BAMBACH, M.; JUNK, S.; *Modelling of the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process*; Proceedings of the 10th Int. Conf. on Sheet Metal; 2003. pp. 495-502.