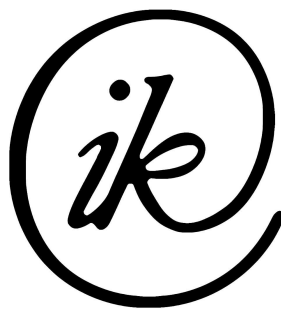
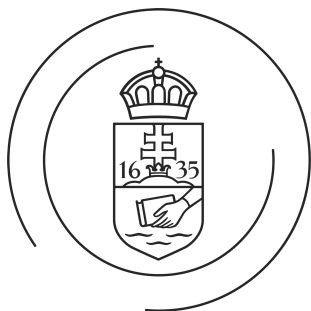


HORVÁTH MILÁN  
DIPLOMAMUNKA

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM

INFORMATIKAI KAR

SAVARIA MŰSZAKI INTÉZET



DIPLOMAMUNKÁK

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM  
INFORMATIKAI KAR  
SAVARIA MŰSZAKI INTÉZET

Horváth Milán  
DIPLOMAMUNKA

Diplomamunka

Konzulens:

*Bátorfi János György*  
egyetemi tanársegéd

Témavezető:

*Prof. Dr.Sidor Jurij*  
egyetemi tanár

Szombathely, 2025.

## **ZÁRADÉK**

Ez a diplomamunka elzártan kezelendő és őrzendő, a hozzáférése a vonatkozó szabályok szerint korlátozott, a diplomamunka tartalmát csak az arra feljogosított személyek ismerhetik.

A korlátozott hozzáférés időtartamának lejártáig az arra feljogosítottakon kívül csak a korlátozást kérelmező személy vagy gazdálkodó szervezet írásos engedélyével rendelkező személy nyerhet betekintést a diplomamunka tartalmába.

A hozzáférés korlátozása és a zárt kezelés 2034 január 31. napján ér véget.

Szombathely, 2024. 01. 31.

Placeholder for feladatkiiras.pdf

# NYILATKOZATOK

## *Nyilatkozat az önálló munkáról*

Alulírott, *Horváth Milán* (MYQGQ0), az Eötvös Loránd Tudományegyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a diplomamunkát meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és diplomamunkámban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Ennek a diplomamunkának önálló, eredeti szerzője vagyok, ez az önálló szellemi alkotás jogtisztaság szempontjából megfelel az „Eötvös Loránd Tudományegyetem Szervezeti és Működési Szabályzata, II. kötet, Hallgatói Követelményrendszer. Módosításokkal egybeszerkesztett változat [2017. szeptember 1.]” c. szabályzat 74/A–74/C. §-aiban foglalt rendelkezéseknek.

Szombathely, 2025. október 6.

---

*hallgató*

# Tartalomjegyzék

<b>Előszó</b>	<b>ix</b>
<b>Jelölések jegyzéke</b>	<b>x</b>
<b>1. Bevezetés</b>	<b>1</b>
<b>2. Irodalmi áttekintés</b>	<b>2</b>
2.1. Képlékeny alakítás elméleti alapjai . . . . .	2
2.1.1. Rugalmas és képlékeny alakváltozás . . . . .	2
2.1.2. Feszültség-alakváltozás kapcsolata, szakítódiaagram . . . . .	3
2.2. Mikroszerkezettől a tervezésig . . . . .	4
2.2.1. Kristályszerkezet és csúszórendszerek . . . . .	4
2.2.2. Textúra-fejlődés az alakítás során . . . . .	5
2.3. Lemezek képlékeny anizotrópiája . . . . .	5
2.3.1. Az anizotrópia . . . . .	5
2.3.2. Lankford-tényező . . . . .	6
2.3.3. Csúcsosodás, az anizotrópia közvetlen hatása . . . . .	6
2.3.4. Ideális mélyhúzzható lemez . . . . .	7
2.4. A mélyhúzás technológiája . . . . .	7
2.4.1. A mélyhúzás alapelvei, fázisai . . . . .	7
2.4.2. Meghatározó technológiai paraméterek . . . . .	8
2.4.3. A mélyhúzás tipikus hibái és azok okai . . . . .	8
2.4.4. A mélyhúzás, mint egyensúlyi folyamat . . . . .	8
2.5. Mélyhúzó szerszámok tervezése . . . . .	9
2.5.1. A szerszám felépítése . . . . .	9

2.5.2.	A szerszámgeometria szerepe . . . . .	9
2.5.3.	Technológiai erők számítása . . . . .	9
2.6.	Végelem módszer . . . . .	9
2.6.1.	Végelem módszer alapelvei . . . . .	9
2.6.2.	Mélyhúzási folyamat szimulációja VEM-mel . . . . .	10
2.6.3.	Anyagmodellek . . . . .	10
<b>3.</b>	<b>Anyagok és módszerek</b>	<b>11</b>
<b>4.</b>	<b>Szerszámkialakítás</b>	<b>12</b>
<b>5.</b>	<b>Mérési eredmények értékelése</b>	<b>13</b>
<b>6.</b>	<b>Összefoglalás</b>	<b>14</b>



# Előszó

Már a középiskolás éveim során érdeklődtem a 3D tervezés, a CAD-CAM világa felé. Gépi forgácsoló szakmámból kifolyólag elég régóta körülvesz engem a gépészeti világ és akkor jött a gondolat, mi lenne ha jelentkeznék egyetemre. Életem egyik legjobb döntése volt a gépészmérnöki képzés elkezdése. Rengeteg új információval gazdagodtam, sokkal jobban el tudtam mélyülni a CAD-CAM rendszerekben, valamint megismerkedtem számomra addig teljesen ismeretlen módszerekkel. Az egyik ilyen volt a végeselem analízis. Ez a terület tetszett meg a legjobban a képzés során, rengeteg lehetőség rejlik benne. A diplomamunka téma kiválasztásánál számomra fontos volt, hogy a CAD-CAM, valamint a végeselem analízis szerepet kapjanak az elkészítés során.

~ ~ ~

## *Köszönetnyilvánítás*

*Ha kell*

Szombathely, 2025. október 6.

*Horváth Milán*

# Jelölések

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar és angol nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyüknél található.

## Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
$E$	Rugalmassági modulusz	GPa
$F$	erő	N
$S$	keresztmetszet	mm <sup>2</sup>

## Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
$\varepsilon$	alakváltozás	1
$\sigma$	feszültség	MPa

## Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
$e$	elem
max	maximális érték

# 1. fejezet

## Bevezetés

A mélyhúzás a lemezalakítás egyik legösszetettebb és legszélesebb körben alkalmazott technológiája, amelynek során síklemezből háromdimenziós, üreges alkatrészeket állítanak elő. A folyamat sikerességét döntően befolyásolja a lemezanyag anizotróp viselkedése, amely a gyártási folyamat során – különösen a hengerelés következtében – kialakuló preferált kristályorientációból (textúra) ered. Az anyag irányított mechanikai tulajdonságai közvetlenül hatnak az alakíthatóságra, a fülképződésre és a végtermék minőségére.

Az anizotrópia mértékét a Lankford-paraméterrel ( $r$ -érték) jellemezzük, amely a vastagságirányú és szélességirányú alakváltozás arányát fejezi ki egytengelyű húzás során. Wu et al. (2023) kísérleti vizsgálatai rozsdamentes acél hengermélyhúzása során kimutatták, hogy az  $r_{90}$  értéke 29-48%-kal járul hozzá az aljzati visszarugózáshoz, míg az  $r_{45}$  és  $r_0$  értékek másodlagos jelentőségűek. A síkanizotrópia ( $\Delta r$ ), amely a különböző irányokban mért  $r$ -értékek közötti eltéréseket számszerűsíti, közvetlenül felelős a fülképződés mértékéért és mintázataért.

A képlékeny alakítás során fellépő anizotróp viselkedés pontos modellezése kritikus fontosságú a szerszámtervezésben és a folyamatoptimalizálásban. A hagyományos izotróp folyási kritériumok (von Mises, Tresca) nem képesek megfelelően leírni a lemezanyagok irányított tulajdonságait. Az elmúlt évtizedekben számos anizotróp folyási kritérium került kifejlesztésre – a klasszikus Hill'48 modellről (Hill, 1948) a fejlett Barlat-család kritériumaiig (Yld2000-2d, Yld2004-18p) –, amelyek fokozatosan javuló pontossággal írják le a valós anyagviselkedést (Chen et al., 2023).

Jelen irodalmi áttekintés célja, hogy átfogó képet nyújtson a mélyhúzás folyamatáról, a lemezanyagok anizotróp viselkedésének fizikai hátteréről, a szerszámtervezés alapelveiről, valamint a modern végeelem-módszer (VEM) alkalmazásáról. Külön hangsúlyt helyezünk az anyagfüggő viselkedésre és a kristályszerkezet szerepére, mivel ezek az alapvető tényezők határozzák meg a mélyhúzhatóságot és az ipari folyamatok megbízhatóságát.

## 2. fejezet

### Irodalmi áttekintés

#### 2.1. Képlékeny alakítás elméleti alapjai

##### 2.1.1. Rugalmas és képlékeny alakváltozás

A képlékeny alakítás olyan technológiai folyamatok összessége, amelyek során a fém vagy ötvözet munkadarabot külső mechanikai erőhatással, maradandó (képlékeny) alakváltozás révén alakítjuk át kívánt formára, miközben az anyag térfogata és tömege változatlan marad [1]. A folyamat alapja az anyag képlékeny viselkedése: a ráhatáskor fellépő feszültség túllépi a folyáshatárt, így az anyag a tehermentesítést követően sem tér vissza eredeti alakjára.

Az alakítási folyamatok a hőmérséklettől függően két alapvető csoportra oszthatók, amelyek különböző mikroszerkezeti folyamatokat és technológiai jellemzőket eredményeznek.

##### *Hidegalakítás*

Hidegalakítás ( $T < 0,3T_m$ , ahol  $T_m$  az olvadáspont Kelvinben): A szobahőmérsékleten vagy közel ahhoz végzett alakítás során az anyag képlékenyen deformálódik, de az alakváltozás mechanizmusai (diszlokációs mozgás, csúszás) nem járnak újrakristályosodással. A hidegalakítás jellemzői:

- Kiváló méretpontosság (IT12-IT14 tolerancia)
- Jó felületi minőség
- Növekedő szilárdság és keménység (alakítási keményedés)
- Csökkenő képlékenység

- Textúra kialakulása és stabilizálódása
- Maradó feszültségek jelenléte

Acéllemezeknél a szobahőmérsékletű alakítás uralkodó a járműipari alkalmazásokban, ahol a dimenzionális stabilitás és a felületi minőség kritikus követelmény. Az alumíniumötvözetek szintén kiválóan hidegalakíthatók az FCC kristályszerkezetből adódó jó szobahőmérsékletű képlékenységük miatt.

### *Melegalakítás*

Melegalakítás ( $T > 0,5 - 0,6T_m$ ): Magasabb hőmérsékleten végzett alakítás során a képlékeny deformáció egyidejűleg zajlik a dinamikus újrakristályosodással vagy dinamikus recovery folyamatokkal, ami friss, deformálatlan szemcsestruktúrát eredményez. A melegalakítás előnyei:

- Jelentősen csökkentett alakítóerők
- Nagy alakváltozások elérhetősége egyetlen lépésben
- Kedvező mechanikai tulajdonságok finomabb szemcsestruktúra miatt
- Belső feszültségek csökkenése
- Nehezen alakítható anyagok megmunkálhatósága

Hátrányok közé tartozik a nagyobb energiaráfordítás, oxidációs és lekéregesedési problémák, valamint rosszabb méretpontosság és felületi minőség. A járműiparban alkalmazott korszerű nagyszilárdságú acélok (AHSS – Advanced High-Strength Steels) melegalakítása speciális keményítési eljárásokat (press hardening, hot stamping) tesz lehetővé, amelyek során a melegalakítást azonnal hűtéssel kombinálják [2].

### *2.1.2. Feszültség-alakváltozás kapcsolata, szakítódiaagram*

Az alakíthatóság az anyag azon képessége, hogy törés nélkül mekkora mértékű képlékeny alakváltozást képes elviselni adott alakítási körülmények között. Az alakíthatóságot számos tényező befolyásolja:

- **Anyagi tényezők:** Kristályszerkezet (FCC anyagok általában jobb alakíthatóságúak, mint BCC anyagok szobahőmérsékleten), kémiai összetétel és ötvözőelemek, mikroszerkezet (szemcseméret, fázisösszetétel), textúra (preferált kristályorientáció), előzetes alakváltozási történet (hideghengerlés mértéke).

- **Technológiai tényezők:** Alakítási hőmérséklet, alakváltozási sebesség, feszültség-állapot (egytengelyű, síkbeli, háromtengelyű), súrlódási viszonyok, szerszámgeometria.

Az alakíthatóság jellemzésére több kísérleti módszer és kritérium létezik. A legismertebb az egytengelyű szakítóvizsgálatból származó szakadási nyúlás ( $A_{50}$  vagy  $A_{80}$ ), amely azonban csak közelítő képet ad a komplex alakítási folyamatok során várható viselkedésről.

Lemezalakítás esetében a Forming Limit Diagram (FLD) az iparban széles körben alkalmazott eszköz, amely a főalakváltozások síkjában ábrázolja azt a határgörbét, amely elválasztja a biztonságos alakítási tartományt a nyakképződési/szakadási zónától. Az FLD hagyományos formája Keeler és Backofen (1963) kutatásaiból származik, és számos szabványosított mérésen alapul (Nakazima-teszt, Marciniak-teszt, hidraulikus domborítási teszt) [3].

[4] átfogó áttekintésükben rámutattak, hogy a hagyományos FLD nem képes előre jelezni a nyírási törésmódokat és az élrepedéseket, amelyek különösen az AHSS acélok esetében jelentenek problémát. Ennek következtében fejlettebb károsodásmodellek kerültek kifejlesztésre (MMC – Modified Mohr-Coulomb, eMMC – extended MMC, GISSMO – Generalized Incremental Stress State dependent damage MOdel), amelyek figyelembe veszik a feszültségi triaxialitást és a Lode-paraméter hatását a törési mechanizmusokra.

## 2.2. Mikroszerkezettől a tervezésig

Az anizotrópia azt jelenti, hogy az anyag mechanikai tulajdonságai különböző irányokban eltérők. Fémlemezeknél az anizotrópia elsődleges oka a kristályos textúra, azaz a preferált szemcseorientációk kialakulása a gyártási folyamat (hengerlés és hőkezelés) során.

### 2.2.1. Kristályszerkezet és csúszórendszerek

A kristályszerkezet alapvetően meghatározza a rendelkezésre álló csúszórendszerek számát és orientációját, ami döntően befolyásolja a képlékeny anizotrópiát és az alakíthatóságot.

#### *FCC (face-centered cubic) fémek*

Az FCC szerkezetű fémek (alumínium, réz, ausztenites acél, nikkel) 12 oktaéderikus csúszórendszerrel rendelkeznek:  $\{111\}\langle 110 \rangle$  típusú síkok és irányok. A 12 független csúszó-

rendszer nagy szabadságot biztosít a képlékeny alakváltozáshoz, ami általában jó szobahőmérsékletű képlékenységet eredményez. Az FCC fémek gömbös illeszkedése (atomic packing factor = 0,74) és a csúszósíkok nagy sűrűsége kedvező alakíthatóságot biztosít. Az FCC anyagok hengerelése során jellemző textúrakomponensek alakulnak ki: Brass  $\{112\}\langle 111\rangle$ , Copper  $\{112\}\langle 111\rangle$ , S  $\{123\}\langle 634\rangle$ . Újrakristályosodás után megjelenik a Cube  $\{001\}\langle 100\rangle$  orientáció, amely közepes  $r$ -értékeket ( $r \approx 0,5-1,0$ ) eredményez. [5] alumíniumlemezek vizsgálata kimutatta, hogy 20-30% húzás után a textúra  $\langle 111\rangle$  és  $\langle 100\rangle$  szálak textúrák felé fejlődik, ami jelentősen módosítja a lokális alakíthatóságot.

### *BCC (body-centered cubic) fémek*

A BCC szerkezetű fémek (ferrites acél, alacsony karbontartalmú acél) elsődlegesen  $\{110\}\langle 111\rangle$  és  $\{112\}\langle 111\rangle$  rendszereken csúsznak, összesen 24-48 potenciális rendszerrel. A BCC szerkezet kisebb atomi illeszkedési faktora (0,68) és a csúszósíkok nagyobb Peierls-feszültsége miatt szobahőmérsékleten általában alacsonyabb képlékenységet mutat, mint az FCC fémek. A BCC anyagoknál az  $\alpha$ -szálak ( $\{001\}\langle 110\rangle \rightarrow \{112\}\langle 110\rangle$ ) és  $\gamma$ -szálak ( $\{111\}\langle 110\rangle$ ,  $\{111\}\langle 112\rangle$ ) textúrakomponensek kritikusak. [6] kristályplaszticitás-szimulációi bizonyították, hogy 8, 6 vagy 4 fül alakul ki a kezdeti BCC textúráról függően, és a textúra élessége közvetlenül korrelál a fülprofil élességével. A  $\gamma$ -szálak komponensek ( $\{111\}\langle uvw\rangle$ ) magas  $r$ -értékeket ( $r=1,5-3,0$ ) biztosítanak, ami kiváló alakíthatóságot eredményez.

### *2.2.2. Textúra-fejlődés az alakítás során*

A textúra nem statikus jellemző, hanem útfüggő módon fejlődik az alakítási folyamat során. [7] átfogó tanulmánya szerint a textúra útfüggő módon fejlődik: a peremrégióban (síkbeli alakváltozás)  $P \{011\}\langle 111\rangle$  és Goss  $\{011\}\langle 100\rangle$  orientációk erősödnek a korai szakaszban, míg a falrégióban (egytengelyű húzás)  $\alpha$ -szálak komponensek dominálnak. Ez lokális alakíthatósági különbségeket eredményez ugyanazon alkatrészen belül.

## **2.3. Lemezek képlékeny anizotrópiája**

### *2.3.1. Az anizotrópia*

Az anizotrópia azt jelenti, hogy az anyag mechanikai tulajdonságai különböző irányokban eltérők. Fémlamezeknél az anizotrópia elsődleges oka a kristályos textúra, azaz a preferált szemcseorientációk kialakulása a gyártási folyamat (hengerlés és hőkezelés) során. A hen-

gerelési folyamat során nagy nyíró- és nyomó-alakváltozások érik a fémlemezt. Az egyes szemcsék nem homogén módon deformálódnak, mivel kristályorientációjuktól függően különböző csúszórendszerek aktiválódnak. A kedvezőbb orientációjú szemcsék gyorsabban alakulnak, míg mások lassabban, és ez egy preferált orientációeloszlást, azaz textúrát eredményez.

Az anizotrópia típusai:

- **Normál anizotrópia (plastic strain ratio anisotropy):** Az  $r$ -érték irányfüggősége, amely a vastagságirányú alakváltozás ellenállását jellemzi. Minél nagyobb az  $\bar{r}$  (átlagos  $r$ -érték), annál jobban ellenáll az anyag a vastagságcsökkenésnek, ezáltal jobb mélyhúzhatóságot mutat.
- **Síkbeli anizotrópia (planar anisotropy):** A különböző irányokban mért  $r$ -értékek közötti eltérés,  $\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90})/2$  képlettel számítva. Ez közvetlenül felelős a fülképződésért:  $\Delta r > 0$  esetén fülek alakulnak ki  $0^\circ$  és  $90^\circ$ -nál,  $\Delta r < 0$  esetén  $\pm 45^\circ$ -nál.
- **Folyáshatár-anizotrópia (yield strength anisotropy):** Különböző irányokban eltérő folyáshatár értékek. Ez befolyásolja az anyagáramlást és az erőeloszlást a szerződésben.

### 2.3.2. Lankford-tényező

A Lankford-paraméter, vagy  $r$ -érték, az anizotrópia legfontosabb mennyiségi jellemzője, amelyet William T. Lankford vezetett be 1950-ben [8]. Az  $r$ -érték az egytengelyű húzóvizsgálat során mért szélességi és vastagsági valódi képlékeny alakváltozások arányaként definiált:  $r = \varepsilon_{width} / \varepsilon_{thickness} = \ln(w/w_0) / \ln(t/t_0)$  ahol  $w$  és  $w_0$  a pillanatnyi és kezdeti szélesség,  $t$  és  $t_0$  a pillanatnyi és kezdeti vastagság. Az  $r > 1$  azt jelenti, hogy az anyag inkább szélességében, mint vastagságában alakul képlékenyen, ami előnyös mélyhúzásnál. Az átlagos  $r$ -érték (normál anizotrópia):  $\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4$ . A síkanizotrópia (planar anisotropy):  $\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90})/2$ . [9] kísérleti vizsgálata rozsdamentes acél hengereken kimutatta, hogy az  $r_{90}$  a legnagyobb hatással van az aljzati visszarugózásra (29-48% hozzájárulás), míg  $r_{45}$  és  $r_0$  másodlagos jelentőségűek.

### 2.3.3. Csúcsosodás, az anizotrópia közvetlen hatása

Fülképződés (earing): Az anyag síkbeli anizotrópiája ( $\Delta r \neq 0$ ) miatt a mélyhúzott pohár szélén periodikus magasság-ingadozások alakulnak ki. A fülek száma és elhelyezkedése közvetlenül függ a kristályos textúrától:



- 4 fül: Tipikus alumíniumötvözeteknél kockatextúra dominanciája esetén,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  helyeken.
- 6 fül: Jellemző mélyhúzó acéloknál  $\gamma$ -szálas textúra esetén.
- 8 fül: Összetett textúra esetén, vegyes orientációs komponensekkel.

[10] kereskedelmi tisztaságú titán vizsgálatokor 13,7%-os fülmagasságot mért  $\Delta r \neq 0$  esetén. A fülképződés csökkenthető optimalizált terítékalak alkalmazásával, amely figyelembe veszi az anizotróp viselkedést.

### 2.3.4. Ideális mélyhúzható lemez

Az optimális mélyhúzhatóság magas átlagos  $r$ -értéket ( $\bar{r} \uparrow$ ) és a nullához közeli síkbeli anizotrópiát ( $\Delta r \rightarrow 0$ ) igényel. A magas  $\bar{r}$  érték biztosítja az elvékonyodással szembeni nagy ellenállást, míg az alacsony  $\Delta r$  érték megakadályozza a fülképződést és az ezzel járó anyagvesztést.

## 2.4. A mélyhúzás technológiája

### 2.4.1. A mélyhúzás alapelvei, fázisai

A mélyhúzás olyan lemezmegmunkálási eljárás, amelynek során síklemezt (tártsalemezt, terítéket) bélyeg segítségével húzógyűrűn keresztül húzunk át, miközben a lemez radiális húzó- és tangenciális nyomófeszültség hatására üreges, általában forgásszimmetrikus vagy egyéb alakú alkatrészé formálódik [1, 11]. A mélyhúzás során három fő deformációs zóna különíthető el:

- **Bélyeg alatti zóna (aljzat):** Itt az anyag viszonylag kis alakváltozást szenved, elsősorban hajlítási és egyenesítési cikluson megy keresztül a bélyegsugárnál.
- **Sugár-régiók (bélyegsugár és húzógyűrű-sugár):** Ezek a legkritikusabb zónák a legnagyobb von Mises feszültség szempontjából.
- **Peremzóna (flange):** A húzógyűrű és a peremtartó közötti terület, ahol az anyag radiális húzó- és tangenciális (kerületi) nyomófeszültségnek van kitéve.

### 2.4.2. Meghatározó technológiai paraméterek

- **Határalakítási arány (LDR – Limiting Drawing Ratio):** A legnagyobb sikeresen mélyhúzzható teríték átmérőjének ( $D_0$ ) és a bélyeg átmérőjének ( $d_p$ ) aránya:  $LDR = D_0/d_p$ . Az LDR értéke erősen anyagfüggő és közvetlenül összefügg az átlagos Lankford-paraméterrel ( $\bar{r}$ ).
- **Lemezvastagság hatása:** A vastagság-átmérő arány ( $t_0/d_p$ ) növelése javítja a mélyhúzzhatóságot.
- **Alakítási sebesség hatása:** Nagyobb sebességeknél figyelembe kell venni az alakváltozási sebesség hatását (strain rate effect), amely növeli a folyáshatárt.
- **Súrlódási viszonyok:** A súrlódás alapvetően befolyásolja az anyagáramlást és az alakítóerő nagyságát.

### 2.4.3. A mélyhúzás tipikus hibái és azok okai

- **Ráncosodás (wrinkling):** A tangenciális nyomófeszültség következtében a peremrégióban lokális instabilitás lép fel. Megelőzése megfelelő peremtartó erővel lehetséges.
- **Szakadás (tearing/fracture):** Túlzott radiális húzófeszültség vagy nem megfelelő anyagnyúlás következménye. Elkerülése érdekében nagyobb szakadási nyúlással és magasabb  $r$ -értékkel rendelkező anyagokat kell választani.
- **Fülképződés (earring):** Az anyag síkbeli anizotrópiája ( $\Delta r \neq 0$ ) miatt kialakuló periodikus magasság-ingadozások.
- **Elvékonyodás (thinning):** A lemez radiális húzása során bekövetkező vastagságcsökkenés.
- **Narancsbőr-effektus (orange peel):** Durva szemcseméretű anyagoknál jelentkező érdes felület.

### 2.4.4. A mélyhúzás, mint egyensúlyi folyamat

A sikeres mélyhúzás egy kényes egyensúly fenntartását igényli a két fő hibamód, a ráncosodás és a szakadás között. A peremtartó erőnek elég nagynek kell lennie a ráncosodás megakadályozásához, de nem lehet túl nagy, mert az a megnövekedett súrlódás miatt a bélyegáttöréshez (szakadáshoz) vezet. Ez a két korlát jelöli ki a biztonságos működési tartományt, az úgynevezett technológiai ablakot.

## 2.5. Mélyhúzó szerszámok tervezése

### 2.5.1. A szerszám felépítése

A mélyhúzó szerszám három alapvető funkcionális egységből áll:

- **Bélyeg (punch):** Meghatározza az alkatrész belső alakját. Anyaga jellemzően edzett szerszámacél (pl. X210Cr12).
- **Húzógyűrű (die/mátrix):** Meghatározza az alkatrész külső alakját. A bélyeg és a húzógyűrű közötti rés (clearance) kritikus paraméter.
- **Peremtartó (blank holder):** Biztosítja a teríték rögzítését és szabályozott normál-erővel nyomja azt a húzógyűrű felületére.

### 2.5.2. A szerszámgeometria szerepe

A szerszámgeometria, különösen a lekerekítési sugarak (bélyegsugár  $r_p$  és húzógyűrűsugár  $r_d$ ), alapvetően befolyásolja a feszültségeloszlást és az anyagáramlást. Túl kicsi sugarak szakadáshoz, túl nagyok pedig a méretpontosság elvesztéséhez vezethetnek. [12] részletesen vizsgálták a sugár hatását mikro-mélyhúzás esetében.

### 2.5.3. Technológiai erők számítása

Az egyszerűsített analitikus képlet a bélyegerő maximumának becsléséhez:  $F_{draw} = \pi \times d_p \times t \times \sigma_{UTS} \times (D_0/d_p - \beta)$  ahol  $d_p$  a bélyeg átmérője,  $t$  a lemezvastagság,  $\sigma_{UTS}$  a szakítószilárdság,  $D_0$  a teríték átmérője, és  $\beta$  egy kísérleti korrekciós tényező ( $\approx 0,6-0,7$ ). Az anizotrópia figyelembevételéhez Hill'48 vagy fejlettebb folyási kritériumokat kell integrálni az erőszámításba.

## 2.6. Végeselem módszer

### 2.6.1. Végeselem módszer alapelvei

A végeselem-módszer (Finite Element Method, FEM) numerikus technika parciális differenciálegyenletek közelítő megoldására. A módszer alapja a kontinuum felosztása véges

számú, egyszerű geometriájú elemre (végeselem), amelyek csomópontjaiban az ismeretlen változókat (elmozdulás, feszültség, alakváltozás) interpolációs függvényekkel közelítjük.

### 2.6.2. Mélyhúzási folyamat szimulációja VEM-mel

A VEM szimulációk lehetővé teszik a komplex geometriák, nemlineáris anyagmodellek és kontaktusok pontos modellezését. Két fő megközelítés létezik:

- **Explicit időintegrációs módszer:** Hatékony nagy deformációs, dinamikus folyamatok szimulációjára (pl. LS-DYNA, ABAQUS/Explicit).
- **Implicit időintegrációs módszer:** Stabilis nagyobb időlépésekkel, kvázistatikussal folyamatok és visszarugózás-analízis esetében preferált (pl. ABAQUS/Standard, ANSYS/Static).

A lemezalakítás szimulációjában leggyakrabban héjelemeket (shell elements) használnak.

### 2.6.3. Anyagmodellek

A pontos szimulációhoz elengedhetetlenek a fejlett anyagmodellek.

- **Anizotróp folyási kritériumok:** A Hill'48 kritérium a legegyszerűbb, de korlátozott pontosságú [13]. A Yld2000-2d [14] kiváló pontossággal írja le az alumínium-ötvözetek viselkedését. A Yld2004-18p (Barlat et al., 2005) erősen anizotróp BCC és HCP anyagokhoz készült.
- **Keményedési modellek:** Az izotróp modellek nem képesek leírni a Bauschinger-effektust. A kinematikus és kombinált keményedési modellek realisabb leírást adnak komplex terhelési történetek esetén.

A legelterjedtebb szoftverek (ABAQUS, LS-DYNA, AutoForm) különböző szinteken támogatják ezen modellek implementációját, gyakran felhasználói alprogramokon (UMAT) keresztül.

## **3. fejezet**

### **Anyagok és módszerek**

## **4. fejezet**

### **Szerszámkialakítás**

## **5. fejezet**

### **Mérési eredmények értékelése**

## **6. fejezet**

### **Összefoglalás**



# Irodalomjegyzék

- [1] L. Gillemot and Gy. Ziaja. *Fémek képlékeny alakítása*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1977.
- [2] R. Pereira, N. Peixinho, and S. L. Costa. A review of sheet metal forming evaluation of advanced high-strength steels (ahss). *Metals*, 14(4):394, 2024. doi: 10.3390/met14040394.
- [3] Z. Marciniak, J. L. Duncan, and S. J. Hu. *Mechanics of sheet metal forming*. Butterworth-Heinemann, 2002.
- [4] A. S. Takalkar and M. C. L. Babu. A review on effect of thinning, wrinkling and spring-back on deep drawing process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(6):1011–1036, 2019. doi: 10.1177/0954405417752509.
- [5] J. Savoie, Y. Zhou, J. J. Jonas, and S. R. MacEwen. Textures induced by tension and deep drawing in aluminum sheets. *Acta Materialia*, 44(2):587–598, 1996. doi: 10.1016/1359-6454(95)00214-6.
- [6] D. Raabe, Y. Wang, and F. Roters. Crystal plasticity simulation study on the influence of texture on earing in steel. *Computational Materials Science*, 34(3):221–234, 2005. doi: 10.1016/j.commatsci.2004.12.072.
- [7] O. Engler. Correlating crystallographic texture with anisotropic properties and sheet metal forming of aluminium alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 35:514–522, 2025. doi: 10.1016/j.jmrt.2025.01.059.
- [8] W. T. Lankford, S. C. Snyder, and J. A. Bauscher. New criteria for predicting the press performance of deep drawing sheets. *Transactions of the ASM*, 42:1197–1232, 1950.
- [9] F. Wu, Y. Hong, Z. Zhang, C. Huang, and Z. Huang. Effect of lankford coefficients on springback behavior during deep drawing of stainless steel cylinders. *Materials*, 16(12):4321, 2023. doi: 10.3390/ma16124321.
- [10] B. Tang, N. Guo, Z. Y. Liu, and Z. Y. Chen. Planar anisotropy, tension–compression asymmetry, and deep drawing behavior of commercially pure titanium at room temperature. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(11):6073–6082, 2018. doi: 10.1007/s11665-018-3646-6.
- [11] Z. Weltsch. *Képlékeny alakítás a járműiparban*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2019.
- [12] L. Luo, D. Wei, G. Zu, and Z. Jiang. Influence of blank holder-die gap on micro-deep drawing of sus304 cups. *International Journal of Mechanical Sciences*, 191:106065, 2021. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106065.

- [13] Z. Mu, J. Zhao, Q. Meng, X. Huang, and G. Yu. Applicability of hill48 yield model and effect of anisotropic parameter determination methods on anisotropic prediction. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(3):2023–2042, 2022. doi: 10.1007/s11665-021-06366-z.
- [14] F. Barlat et al. Plane stress yield function for aluminum alloy sheets—part i: theory. *International Journal of Plasticity*, 19(9):1297–1319, 2003.

## **Melléklet A**

## **Melléklet B**