



MISKOLCI EGYETEM  
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



## TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

### Kovácshenglerlési technológia és szerszámtervezése

*Készítette:*

**Búdi László**

*MSc szintű, gépészmérnök szakos*

*CAD/CAM szakirányos hallgató*

*Konzulensek:*

**LUKÁCS ZSOLT**

*egyetemi adjunktus*

*Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet*

**Miskolc, 2014**

## Tartalomjegyzék

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Bevezetés.....                                                           | 2  |
| 2. A Keresztékes hengerlés technológiája.....                               | 3  |
| 2.1 Általános ismertető .....                                               | 3  |
| 2.2 Szerszámgeometria .....                                                 | 4  |
| 2.3 A hengerítés hibalehetőségei .....                                      | 6  |
| 2.3.1 Csúszás (Slip) .....                                                  | 6  |
| 2.3.2 Felületi hibák .....                                                  | 6  |
| 3. A kovácshengerlő szerszám tervezése .....                                | 8  |
| 3.1 A gyártandó alkatrész jellemzői.....                                    | 8  |
| 3.2 Alkalmazott képletek és összefüggések.....                              | 9  |
| 3.3 Számítások .....                                                        | 15 |
| 3.4 Kézi számítási eredmények összehasonlítása .....                        | 18 |
| 4. A Szerszám modellezése .....                                             | 20 |
| 4.1 Modellezés .....                                                        | 20 |
| 4.2 A folyamat vizsgálata Deform 3D végeselemes szoftver segítségével ..... | 30 |
| 4.3 Következtetés.....                                                      | 34 |
| 5. Irodalomjegyzék.....                                                     | 35 |

## 1. Bevezetés

TDK dolgozatom témája, amely egyben a diplomatervem fő részét is képezi, egy keresztékes kovácshengerlő szerszám tervezése, mellyel forgásszimmetrikus tengelyeket gyártanak. Az elkészítendő alkatrész egy sebességváltó főtengelyének előgyártmánya, amely további megmunkálási- és szerelési folyamatokat követően épül be a váltóműbe. A tengelyt, valamint a technológia megismerésének és tanulmányozásának a lehetőségét a mezőkövesdi székhelyű Kovács Vegyesipari Kereskedelmi és Szolgáltató Kft. biztosította.

A dolgozat első részében a keresztékes hengerlés technológiáját, szerszámgeometriát és azok jellemzőit, valamint a folyamat hibalehetőségeit mutatom be.

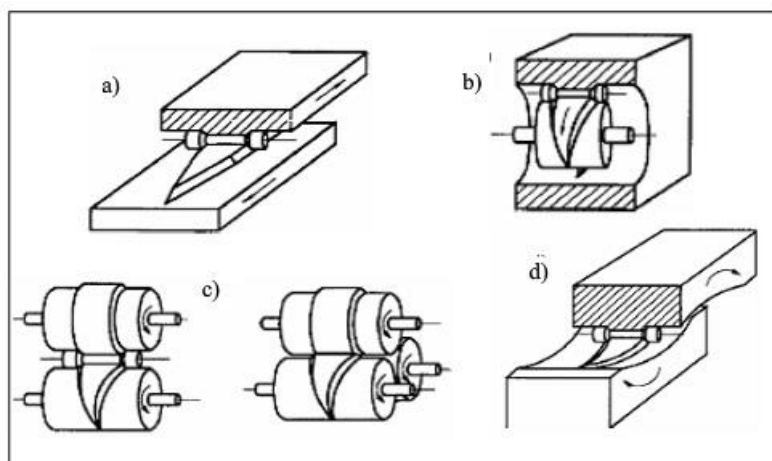
A második részben ismertetem a szerszám geometriájának meghatározásához szükséges képleteket, tapasztalati összefüggéseket, majd a tengely első lépcsőjének kialakításához szükséges számításokat végzem el először  $\alpha=20^\circ$  és  $\beta=8^\circ$  kiindulási adatokkal. Ezt követően néhány, az iparban is jellemző szögpárok eseteire is megvizsgálom az eredményeket.

Végül képekkel illusztrálva és szöveges magyarázat segítségével elkészítem a teljes szerszámot. Az elkészült szerszám első felületalakító részét kiemelem, és ezt használom csak fel szimulációs környezetben való vizsgálatra idő és erőforrás csökkentése érdekében. A kapott eredményeket összehasonlítom az általam számított eredményekkel, és levonom a következtetéseket.

## 2. A Keresztékes hengerlés technológiája

### 2.1 Általános ismertető

Az alakítási technológiák folyamatos kutatási területét képezik a jobb és hatékonyabb eljárások kifejlesztésének, melyek jó minőségben alacsony anyag- és energiafogyasztással dolgoznak. Ez részben megfigyelhető a fémalakítási technológiák között a modernnek számító keresztékes hengerlési technológiánál is. A keresztékes hengerlés a meleghengerlés egy speciális fajtája, amely egy innovatív technológia, számos előnnyel a hagyományos megmunkálásokkal szemben. A technológia az 1960-as években alakult ki, azóta nagy népszerűsége tett szert, elsősorban az USA-ban, főként az autóipar területén. Hasonlóan a többi hengerléshez, a folyamat jellemzője a nagy precizitás (átmérő tűrése akár 0,4 mm is lehet), jó felületminőség ( $R_a=5\mu\text{m}$ ) és nagyobb szilárdság (kifáradási határa 1,5-2-szer, kopásállósága 20-40%-al nagyobb). Az anyagmegtakarítás a többi eljáráshoz képest 20-60%-al is nagyobb lehet, függően az alakítás módjától. Az eljárással elsősorban tengelyszimmetrikus alkatrészeket, főként lépcsős tengelyeket kovácsolnak, egyszerre akár többet is, függően a munkadarabok méretétől. A deformálódás bonyolultsága miatt a folyamat analízisére közelítő megoldások és tapasztalati megfontolások szolgáltatnak eredményt. A technológia lényege, ugyanúgy, mint a többi kovácsolási technológiánál, hogy a szerszám adja meg az alkatrész kívánt végleges alakját. A szerszám kialakításának típusait az 1. ábra szemlélteti. A munkadarab megközelítőleg 1100 - 1250°C-ra van felhevítve és az alakadás a szerszámhengerek egy fordulatra történik. [1][2]



1. ábra. Szerszámkonfigurációk

a) sík, b) egy hengeres, c) több hengeres, d) homorú

### **A technológia előnyei:**

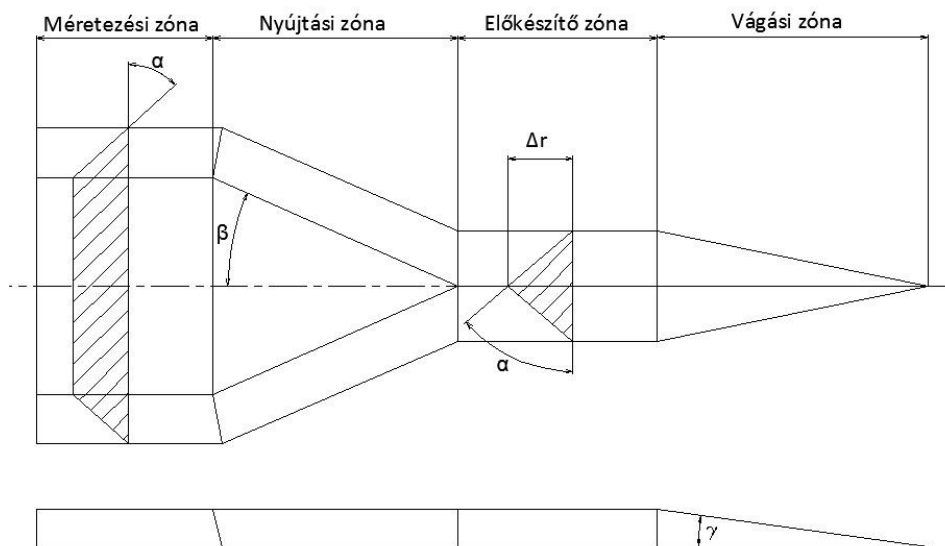
- Energiatakarékos eljárás: hatékony, egyszerre több ugyanolyan alkatrész is gyártható
- Nagy termelékenység: a folyamat sebessége 5 – 20-szor nagyobb, mint más kovácsolásé. Ez is energia megtakarítást eredményez.
- Környezetbarát eljárás: a szerszám nem igényel olaj, vagy egyéb hűtést, valamint működés közben nagyon alacsony a zajszint.
- Jó termékminőség: a felhevített munkadarab a képlékeny folyással eléri a kívánt alakot. Az anyagszerkezet folytonos marad, valamint szemcseszerkezete finomodik, amely növeli a szilárdságot.
- Nagyobb anyagkihasználtság: a hengerítés lecsökkenti a nyersanyag árát azáltal, hogy az anyagvesztés 10% körüli, szemben más eljárásokkal, ahol ez az arány akár 40% fölé is emelkedhet.
- Automatizálható: további költségcsökkentést eredményez, kevesebb dolgozóra, valamint a kisebb munkaterületre van szükség. [1][2]

## **2.2 Szerszámgeometria**

Az alapanyag deformációja a szerszám alábbi geometriai paramétereitől függ:

- Alakítás szöge
- Nyújtás szöge
- Emelkedési szög
- Hengerlési mélység
- Ék hossza

A szerszámot négy zónára lehet felosztani (2. ábra):



2. ábra. Szerszám geometria

- **Vágási zóna:** A szerszám ezen része alakítja ki a kívánt vágási mélységet, azaz fokozatosan csökkenti le a kiindulási átmérőt a kívánt átmérőre.
- **Előkészítő zóna:** Beállítja a lecsökkenteni kívánt alakítandó felületet.
- **Alakítási zóna:** Megadja a munkadarab végső alakját. Az alakítási zóna hossza és az alakítási szög kiemelt fontosságú. Ezek helytelen megtervezése esetén nem a kívánt geometriájú darabot kapjuk.
- **Méretezési zóna:** Eltünteti a korábbi műveletekben keletkezett görbületeket, egyenetlenségeket. Az oldalkések gyakran egyesítve vannak a méretezési zónával annak érdekében, hogy eltávolíthassuk a kovácsolt darabot a deformálódott végtől, több darabos megmunkálás esetén pedig a kovácsolt darabok egymástól való elválasztását biztosítja.

Szerszám szögek (2. ábra):

- **Alakítási szög ( $\alpha$ ):** Szabályozza a kapcsolódó felület méretét a szerszám és a munkadarab között. Ebben a zónában a kisebb alakítási szög élesebb szerszámot jelent, amely növeli az érintkezési felületet és kisebb lokalizált képlékeny alakváltozást eredményez. A nyújtási és méretezési zónában az alakítási szög a tengely vállainak megfelelő geometriát követi
- **Nyújtási vagy kiterjesztési szög ( $\beta$ ):** Szintén nagyon fontos paraméter az alakítási folyamatban. Ez határozza meg az axiális irányú deformáció mértékét. Nagyobb  $\beta$  nagyobb nyúlást eredményez. Ebben az esetben a munkadarab gyorsan növekszik

axiális irányba, amely meggyorsítja a kis üregek kialakulását a vágási és előkészítési zónában. [1][2]

## **2.3 A hengerítés hibalehetőségei**

A hengerlési folyamat során felmerülő hibák csoportosítása:

- Csúszás (Slip)
- Helytelen alakú munkadarab
- Felületi hibák
- Anyag belsejében keletkező hibák

### **2.3.1 Csúszás (Slip)**

Csúszás a szerszám és munkadarab forgási sebességének különbségéből adódik. Ez a jelenség helytelen alakadáshoz vezet, így a kész darab keresztmetszete is eltérő lesz a várt eredménytől. A csúszás igen érzékeny a súrlódási tényezőre, ami azt jelenti, hogy a súrlódási tényező csökkenésével a csúszás jelentős mértékben növekszik. A kritikus súrlódási tényező értéke 0,3-re tehető, ettől kisebb értéknél a csúszás veszélye áll fenn. Azonban ez még önmagában kevés lehet, így a szerszám egyes felületire fogazást készítenek, amivel kiküszöbölhető a csúszás.

Az alakítási szög ( $\alpha$ ) helyes megválasztása is fontos, ugyanis minél nagyobb a szög értéke, az érintkező (alakítandó) felület annál kisebb lesz, ami szintén csúszást eredményez. Korábbi tapasztalatok alapján a szög értéke  $\alpha > 30^\circ$  esetén okoz gondot, viszont az előkészítési és méretezési zónában nem meghatározó a szerepe, hiszen ott nem történik jelentős képlékeny alakváltozás.

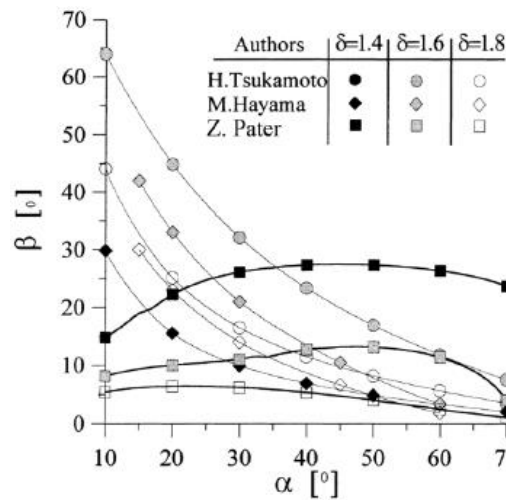
Másrészről viszont az érintő- és normál irányú erők biztosítják a munkadarab forgását a szerszámok között. A megfelelő alak eléréshez szükséges, hogy a két erő egyensúlyban legyen egymással. Ha a tangenciális erő nagyobb, mint a normál irányú, abban az esetben a munkadarab csúszik a szerszámok felülete között. [1][2]

### **2.3.2 Felületi hibák**

A felületi hibák elsősorban a csavarvonszerű hornyok, elvékonyodás, nyakképződés, átfedések keletkezése.

Csavarvonszerű hornyok tulajdonképpen repedések, amelyek a felület közelében lévő belső repedések felnyílásával keletkeznek.

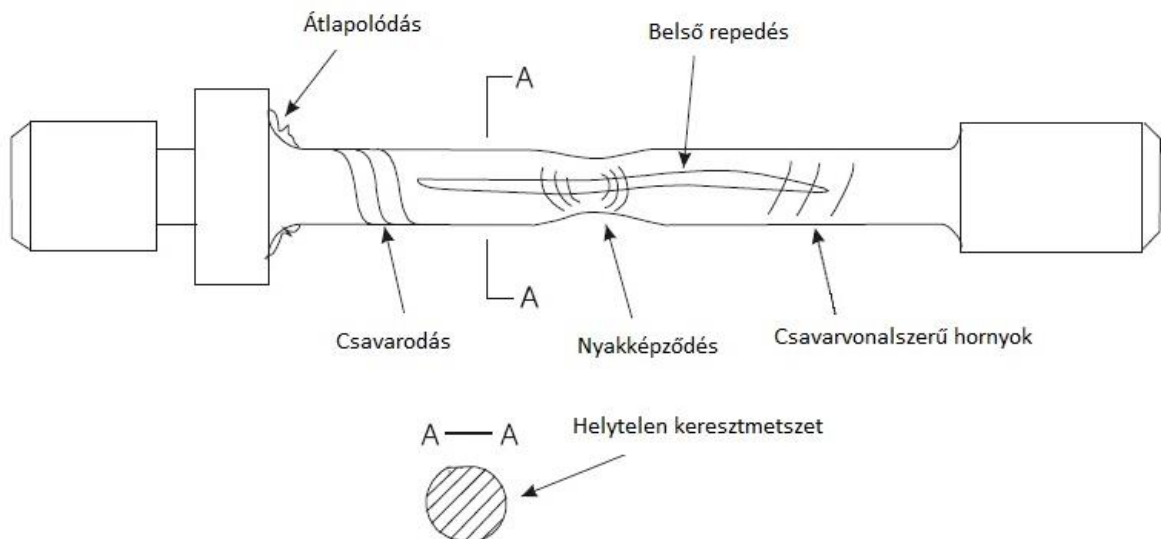
Az alakítás során nyakképződési probléma merülhet fel a munkadarab túlzott vékonyítás következtében. Főként akkor észlelhető a jelenség, ha a húzófeszültség nagyobb, mint az anyag szakítószilárdsága. Az anyagfolyás folyamatos, amíg a munkadarab el nem törik. A törés a munkadarab középső részén fordul elő, ahol a húzófeszültség a legnagyobb. A nyakképződést elősegíti továbbá az alakítási és nyújtási szög, valamint a felületcsökkentés növelése, melyek kapcsolatát a 3. ábra szemlélteti. A nyakképződés elkerülésére léteznek közelítő képletek, összefüggések.



3. ábra. Nyakképződési határok

Belső anyaghibák jellemzően a törések és az üregesedés. Ezek kialakulásáért a munkadarab belsejében ébredő túlzottan nagy húzófeszültség, valamint a nyírási zónában kialakuló nagy nyírófeszültség a felelős. [1][2]

A munkadarabok jellemző hibáit a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra. Munkadarab hibái

Az 5. ábrán egy többlépcsős hengerelt főtengely látható, a végeinél pedig a levágott „pogácsának” nevezett hulladék. A nyersdarab hosszát kellően nagyra kell választani, hogy a véghulladék ne legyen túl kicsi, mert a nagymértékű átmérő csökkenés következtében beszívódások keletkeznek, amely kis véghulladék esetén a tengelybe is belenyúlik, így a termék selejtes lesz. Túl nagy véghulladék keletkezése sem előnyös a nagyarányú anyagvesztés miatt.



5. ábra. Hengerelt tengely

### 3. A kovácshengerlő szerszám tervezése

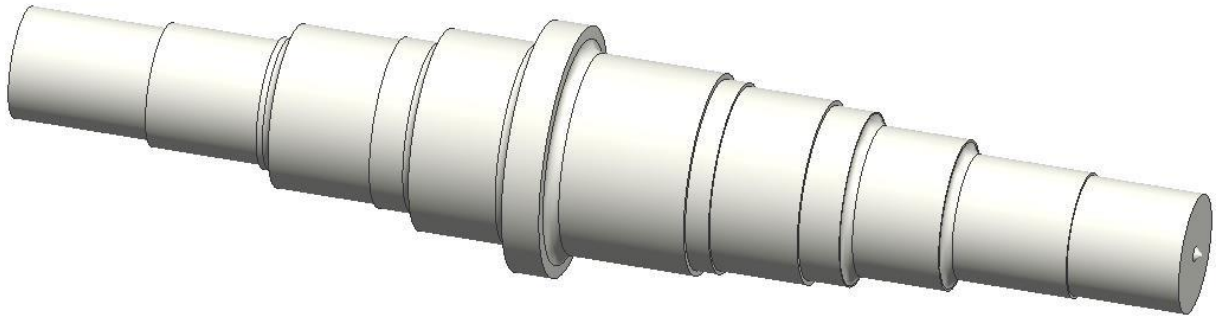
#### 3.1 A gyártandó alkatrész jellemzői

Az általam választott tengely a 1299-404-059 rajzszámú sebességváltó főtengely kovácsolt előgyártmánya, amelyről a 3D-s modell a 6. ábrán látható. Anyaga ZF7B rozsdamentes speciális szerkezeti acél, melynek jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat

|                             |         |         |         |        |         |        |        |
|-----------------------------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|
| Anyagnév                    | DIN     | AISI    |         |        |         |        |        |
| ZF7B                        | 20MnCr5 | 5120    |         |        |         |        |        |
| Kémiai összetétel (tömeg %) |         |         |         |        |         |        |        |
| C                           | Si      | Mn      | Cr      | Mo     | Ni      | Al     | S      |
| 0,182 %                     | 0,236 % | 1,256 % | 1,247 % | 0,07 % | 0,157 % | 0,03 % | 0,03 % |
| Cu                          | V       | Ti      | P       |        |         |        |        |
| 0,187 %                     | 0,006 % | 0,002 % | 0,012 % |        |         |        |        |

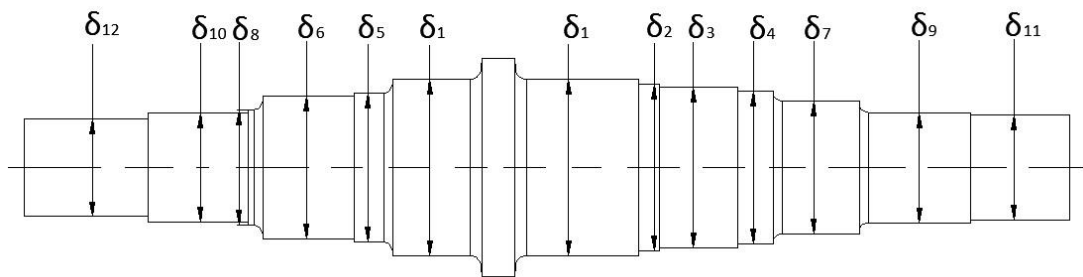
Az anyag alkalmazását tekintve elsősorban az autóiparban előforduló nagy terhelésű komponensek jellemző anyaga, mint például fogaskerekek, tengelyek, főtengelyek, kapcsoló rudak, büttykös tengelyek. [3]



6. ábra. Hengerelt tengely 3D-s modellje

### 3.2 Alkalmazott képletek és összefüggések

- Átmérő viszony:



7. ábra. Átmérő viszonyok

$$\delta = \frac{d_0}{d}$$

Ahol:

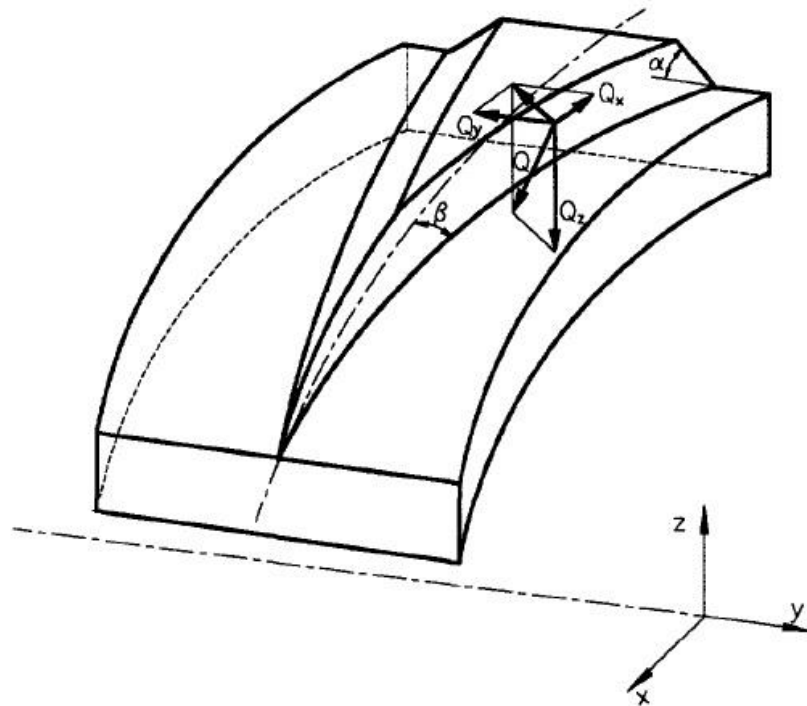
$d_0$  - a kiinduló átmérő

$d$  – az alakítás utáni átmérő

A kiinduló nyersdarab átmérője 100 mm, mivel a kialakítandó tengely legnagyobb átmérője is ennyi, hossza pedig 250 mm, amely korábbi tapasztalatok által lett meghatározva a cégen belül. A lépcsők kialakításánál a kiinduló átmérőt mindig az előzőleg kialakított átmérő képzi. Az alakváltozási zóna geometriai komplexitása és a deformálódás mechanizmusa miatt a folyamat elemzése igen bonyolult. Ez az oka, hogy a legtöbb kiadvány tapasztalati módszereket alkalmaz a hengerlési erő meghatározására. A keresztékes hengerlés változó paramétereinek közötti összefüggések az extrudálási folyamatra

visszavezetve kerülnek meghatározásra. Ez a megoldás az úgynevezett Upper-Bound módszer.

A hengerlési folyamathoz fontos tudnunk a hengerlési erőt és a hengerlési nyomatékot. Ez nem csak a megfelelő gépcsoport vagy eszközök kiválasztását teszi lehetővé, hanem az automatizálás lehetőségeit is meghatározza. A hengerlési erőt és komponenseit a 8. ábra szemlélteti.



8. ábra. Hengerítő erő és komponensei

Ezek az erőkomponensek a szerszám – munkadarab érintkezési felületén értelmezhetők.

Mivel az alkatrész hengeres, az alakítási felület kúpos, így a tengelyszimmetria miatt áttérhetünk henger-koordináta rendszerre.

A szerszám és munkadarab érintkező felületei közötti csúszás elkerülése érdekében fontos paraméterként meg kell határozni a kritikus súrlódási tényezőt. [1] [2]

- Kritikus súrlódási tényező

A 9. ábra alapján:

$$T \cdot a \geq P \cdot b$$

Az általános összefüggés alapján:  $T = \mu \cdot P$

Ezekből következik:  $\mu \geq \frac{b}{a}$

Ahol:

$$a = (d_1 - D_1 \cdot \frac{1 - \cos \frac{\varphi}{2}}{\cos \frac{\varphi}{2}}) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}$$

$$b = (D_1 + d_1) \cdot \sin \frac{\varphi}{2}$$

Mivel  $\varphi$  relatíve kicsi, ezért:  $\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \sin \frac{\varphi}{2}$

Így:

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \sqrt{\frac{d_1 \cdot Z + Z^2}{D_1 \cdot (D_1 + d_1)}}$$

Ahol:

$$Z = \frac{d_0 - d_1}{2}$$

Ezekből  $\varphi$  számítható.

A fentebbi egyenleteket összegezve:

$$\mu^2 \geq \left(1 + \frac{d_1}{D_1}\right) \cdot \left[\frac{Z}{d_1} + \left(\frac{Z}{d_1}\right)^2\right]$$

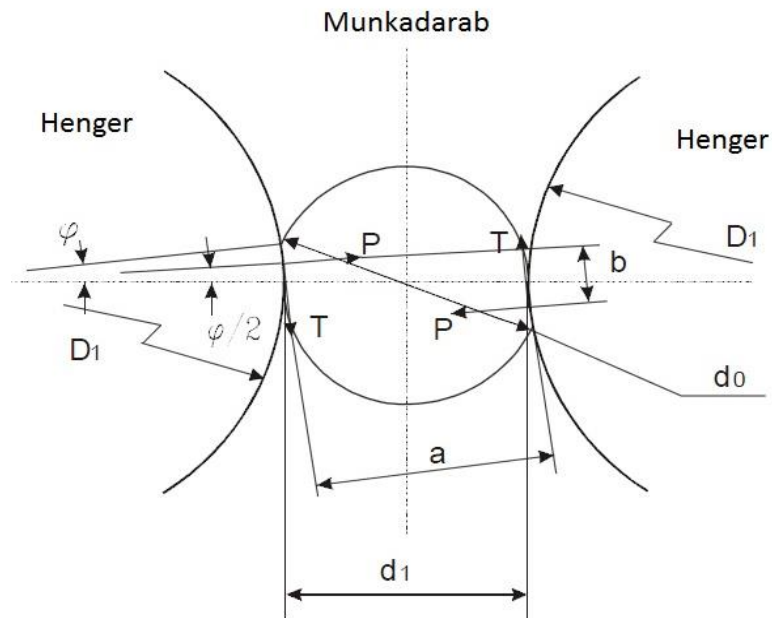
Mivel a „Z” összenyomódási érték a különböző keresztmetszetekben eltérő, ezért az alábbi módon is számítható az értéke:

$$Z = \frac{k}{2} \cdot \pi \cdot d_k \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \operatorname{tg}(\beta)$$

Ahol:

$$d_k = d_1 + 0,62 \cdot (d_0 - d_1)$$

k: relatív deformációs együttható ( $0 < k \leq 1$ ). A  $k=1$  azt jelenti, hogy a nyújtási zónában a munkadarab a teljes hosszára lesz húzva.



9. ábra. Szerszám-munkadarab viszonya alakítás közben

- A külső erő munkája a  $\Delta z_1$  távolságon:

$$W_z = Q_0 \cdot \Delta z_1 = q_m \cdot \sin(\alpha) \cdot \pi \cdot \frac{d_0^2 - d^2}{4} \cdot \Delta z_1$$

Ahol:

$Q_0$ : külső erő

$q_m$ : felületi nyomás

- A képlékeny alakítás teljes munkája:

$$W_p = \frac{\pi \cdot d_0^2}{2} \cdot \sigma_0 \cdot \ln \frac{d_0}{d} (\Delta z_1 - \Delta z_2)$$

Ahol:

$\sigma_0$ : folyási feszültség

$d_0$ : kiindulási átmérő

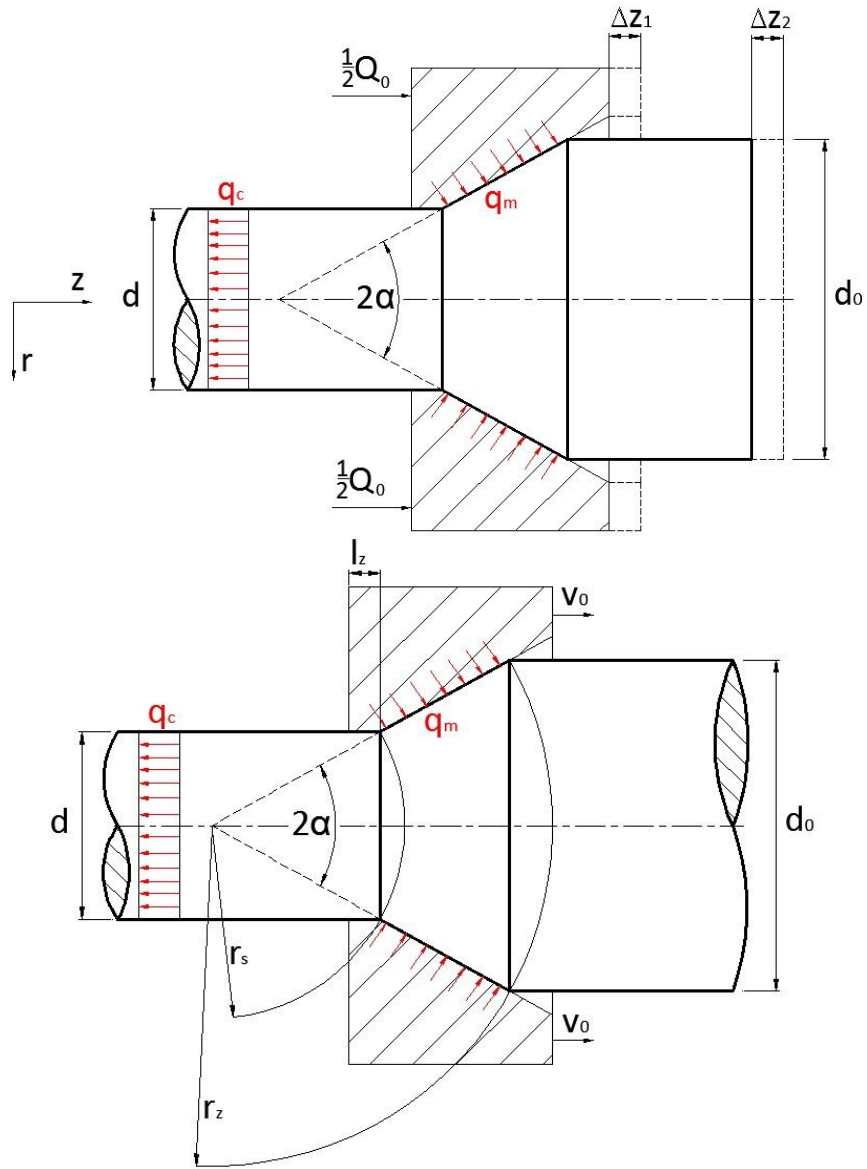
$d$ : alakítás utáni átmérő

- Nyúlás

$$\varepsilon = \alpha \cdot \beta \cdot \Delta A$$

$\Delta A$ : Keresztmetszet változás

$$\Delta A = \frac{A_0 - A}{A_0} = 1 - \left(\frac{d}{d_0}\right)^2$$



10. ábra. Rúd keresztmetszet csökkentése (extrudálás)

A felületi nyomás dimenziótlán alakja:

$$\frac{q_m}{\sigma_0} = \frac{1}{\delta_z^2 - 1} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ \left( \frac{f(\alpha)}{\sin^2(\alpha)} + \mu \cdot \operatorname{ctg}(\alpha) \right) \cdot \ln(\delta_z) + \frac{2\alpha - \sin(2\alpha)}{2 \cdot \sin^2(\alpha)} + 2 \cdot \mu \cdot \frac{l_z}{d} \right]$$

A húzófeszültség:

$$\frac{q_c}{\sigma_0} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ \left( \frac{f(\alpha)}{\sin^2(\alpha)} + \mu \cdot \operatorname{ctg}(\alpha) \right) \cdot \ln\left(\frac{d_0}{d}\right) + \frac{2\alpha - \sin(2\alpha)}{2 \cdot \sin^2(\alpha)} + 2 \cdot \mu \cdot \frac{l_z}{d} \right]$$

Ahol:

$$f(\alpha) = \frac{1}{2} [\sqrt{12} - \cos(\alpha) \sqrt{1 + 11 \cos^2(\alpha)} + \frac{1}{\sqrt{11}} \ln \left( \frac{\sqrt{11} + \sqrt{12}}{\sqrt{11} \cos(\alpha) + \sqrt{1 + 11 \cos^2(\alpha)}} \right)]$$

$$\delta_z = \frac{\delta + 1}{2}$$

$$l_z = \frac{\pi \cdot \frac{d_0}{2} \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot \lambda}{2 \cdot \delta}$$

Hengerlési együttható:

$$\lambda = (2,587 - 1,577 \cdot \delta^{0,3528}) \cdot (0,00355 \cdot \alpha + 0,927) \cdot \beta^{0,0568}$$

- Relatív hengerlési emelkedés

$$c = \frac{\pi \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \lambda \cdot \delta}{\delta - 1}$$

- Az alakítandó felület nagysága:

**Ha  $C \leq 1$**

$$A_{xy} = \frac{2}{3} r_0^2 \frac{\cos(\beta)}{\operatorname{tg}(\alpha)} \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{r_0}{R}} \cdot \frac{\delta - 1}{\delta}} \left[ 1 + c \frac{\delta - 1}{\delta} \left( 1 + \sqrt{\frac{2 + c \cdot \delta - c}{2 \cdot \delta}} \right) - \sqrt{\left( \frac{1 + c \cdot \delta - c}{\delta} \right)^3} \right]$$

$$A_{xz} = \frac{2}{3} r_0^2 \cdot \cos(\beta) \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{r_0}{R}} \cdot c \cdot \frac{\delta - 1}{\delta}} \cdot \left( 1 - \sqrt{\left( \frac{1 + c \cdot \delta - c}{\delta} \right)^3} + c \frac{\delta - 1}{\delta} \right)$$

**Ha  $C > 1$**

$$A_{xy} = \frac{2}{3} r_0^2 \cos(\beta) \cdot \frac{\cos(\beta)}{\operatorname{tg}(\alpha)} \cdot \frac{\delta - 1}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{r_0}{R}}} \cdot \left( 1 + \frac{3}{2} \cdot (c - 1) + \sqrt{\frac{\delta - 1}{\delta}} \right)$$

$$A_{xz} = \frac{2}{3} r_0^2 \cdot \cos(\beta) \cdot \frac{\delta - 1}{\delta} \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{r_0}{R}} + \frac{\delta - 1}{\delta}}$$

- Az alakításhoz szükséges erő:

$$Q_z = q_m \cdot A_{xy} - \tau \cdot \sin(\beta) \cdot A_{xz}$$

Ahol:

$\tau$ : Nyíróerő

$$\tau = \mu \cdot \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$$

[1][2]

### 3.3 Számítások

A számításokat az első lépcsőre mutatom be részletesen, majd ezeket a különböző szögértékekre is megvizsgálom, és összehasonlító elemzést végzek.

Kiinduló tervezési adatok:

$$\alpha = 20^\circ$$

$$\beta = 8^\circ$$

- Átmérő viszonyok

$$\delta_1 = \frac{d_0}{d_1} = \frac{100 \text{ mm}}{79,4 \text{ mm}} = 1,259$$

- Nyúlás

$$\varepsilon = \alpha \cdot \beta \cdot \Delta A = 20^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot 8^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot (1 - (\frac{79,4}{100})^2) = 0,018$$

- Folyási feszültség

$$\sigma_0 = 12,305 \text{ MPa}$$

- $f(\alpha)$  állandó érték

$$f(\alpha) = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{12} - \cos(20) \sqrt{1 + 11 \cos^2(20)} \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{11}} \ln \left( \frac{\sqrt{11} + \sqrt{12}}{\sqrt{11} \cos(20) + \sqrt{1 + 11 \cos^2(20)}} \right) \right] \\ f(\alpha) = 0,203$$

- Hengerlési együttható

$$\lambda_1 = (2,587 - 1,577 \cdot 1,259^{0,3528}) \cdot (0,00355 \cdot 20^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} + 0,927) \cdot (8^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ})^{0,0568}$$

$$\lambda_1 = 0,727$$

- Kritikus súrlódási tényező

$$d_k = 79,4 \text{ mm} + 0,62 \cdot (100 \text{ mm} - 79,4 \text{ mm}) = 92,172 \text{ mm}$$

k=1

$$Z = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 92,172 \text{ mm} \cdot \operatorname{tg}(20^\circ) \cdot \operatorname{tg}(8^\circ) = 7,406 \text{ mm}$$

$$D_1 = 1120,6 \text{ mm}$$

$$\mu^2 \geq \left(1 + \frac{79,4 \text{ mm}}{1120,6 \text{ mm}}\right) \cdot \left[\frac{6,47 \text{ mm}}{79,4 \text{ mm}} + \left(\frac{6,47 \text{ mm}}{79,4 \text{ mm}}\right)^2\right]$$

$$\mu = 0,33$$

- Felületi nyomás

$$\delta_{z1} = \frac{\delta_1 + 1}{2} = \frac{1,259 + 1}{2} = 1,13$$

$$l_{z1} = \frac{\pi \cdot \frac{79,4 \text{ mm}}{2} \cdot \operatorname{tg}(20^\circ) \cdot 0,727}{2 \cdot 1,259} = 6,375 \text{ mm}$$

$$\frac{q_{m1}}{12,305 \text{ MPa}} = \frac{1}{1,13^2 - 1} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ \left( \frac{0,203}{\sin^2(20^\circ)} + 0,33 \cdot \operatorname{ctg}(20^\circ) \right) \cdot \ln(1,13) + \frac{2 \cdot 20^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} - \sin(2 \cdot 20^\circ)}{2 \cdot \sin^2(20^\circ)} + 2 \cdot 0,33 \cdot \frac{6,375 \text{ mm}}{79,4 \text{ mm}} \right]$$

$$q_{m1} = 31,485 \text{ MPa}$$

- Húzófeszültség

$$\frac{q_{c1}}{12,305 \text{ MPa}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ \left( \frac{0,203}{\sin^2(20^\circ)} + 0,3 \cdot \operatorname{ctg}(20^\circ) \right) \cdot \ln\left(\frac{100 \text{ mm}}{79,4 \text{ mm}}\right) + \frac{2 \cdot 20^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} - \sin(2 \cdot 20^\circ)}{2 \cdot \sin^2(20^\circ)} + 2 \cdot 0,3 \cdot \frac{6,375 \text{ mm}}{79,4 \text{ mm}} \right]$$

$$q_{c1} = 12,783 \text{ MPa}$$

- Relatív hengerlési emelkedés

$$C = \frac{\pi \cdot \operatorname{tg}(8^\circ) \cdot \operatorname{tg}(20^\circ) \cdot 0,727 \cdot 1,259}{1,259 - 1} = 0,567$$

- Alakítandó felületek nagysága

Mivel  $C < 1$ , ezért:

$$A_{xy1} = \frac{2}{3} (50 \text{ mm})^2 \frac{\cos(8^\circ)}{\operatorname{tg}(20^\circ)} \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{50 \text{ mm}}{39,7 \text{ mm}}} \cdot \frac{1,259 - 1}{1,259}} [1 + 0,567 \frac{1,259 - 1}{1,259} \left( 1 + \sqrt{\frac{2 + 0,567 \cdot 1,259 - 0,567}{2 \cdot 1,259}} \right) - \sqrt{\left( \frac{1 + 0,567 \cdot 1,259 - 0,567}{1,259} \right)^3}]$$

$$A_{xy1} = 842,965 \text{ mm}^2$$

$$A_{xz} = \frac{2}{3} (50 \text{ mm})^2 \cdot \cos(8^\circ) \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{50 \text{ mm}}{39,7 \text{ mm}}} \cdot 0,567 \cdot \frac{1,259 - 1}{1,259}} \cdot \left( 1 - \sqrt{\left( \frac{1 + 0,567 \cdot 1,259 - 0,567}{1,259} \right)^3} + 0,567 \cdot \frac{1,259 - 1}{1,259} \right)$$

$$A_{xz} = 160,944 \text{ mm}^2$$

- Nyírófeszültség

$$\tau_1 = 0,3 \cdot \frac{12,305 \text{ MPa}}{\sqrt{3}} = 2,182 \text{ MPa}$$

- Alakítás erőszükséglete

$$Q_{z1} = 31,484 \text{ MPa} \cdot 842,965 \text{ mm}^2 - 2,182 \text{ MPa} \cdot \sin(8^\circ) \cdot 160,944 \text{ mm}^2$$

$$Q_{z1} = 26,487 \text{ kN}$$

- A külső erő munkája a  $\Delta z_1$  távolságon:

$$\Delta z_1 = 55 \text{ mm}$$

$$W_z = 31,485 \text{ MPa} \cdot \sin(20^\circ) \cdot \pi \cdot \frac{(100 \text{ mm})^2 - (79,4 \text{ mm})^2}{4} \cdot 55 \text{ mm} = 1,719 \text{ kJ}$$

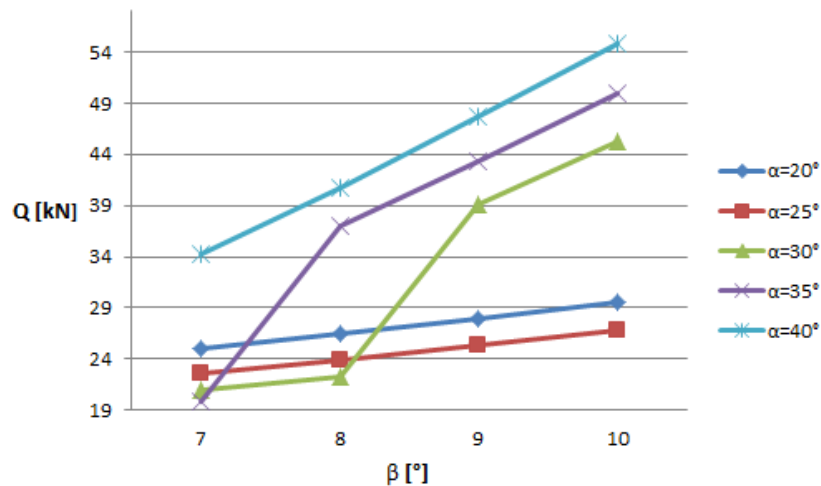
- A képlékeny alakítás teljes munkája:

$$\Delta z_2 = 34,67 \text{ mm}$$

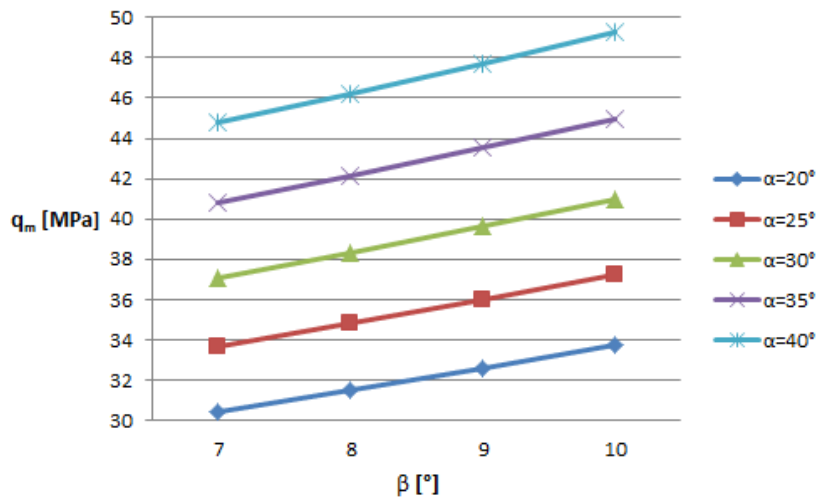
$$W_p = \frac{\pi \cdot (100 \text{ mm})^2}{2} \cdot 12,305 \text{ MPa} \cdot \ln \frac{100}{79,4} (55 \text{ mm} - 34,67 \text{ mm}) = 906,3 \text{ J}$$

### 3.4 Kézi számítási eredmények összehasonlítása

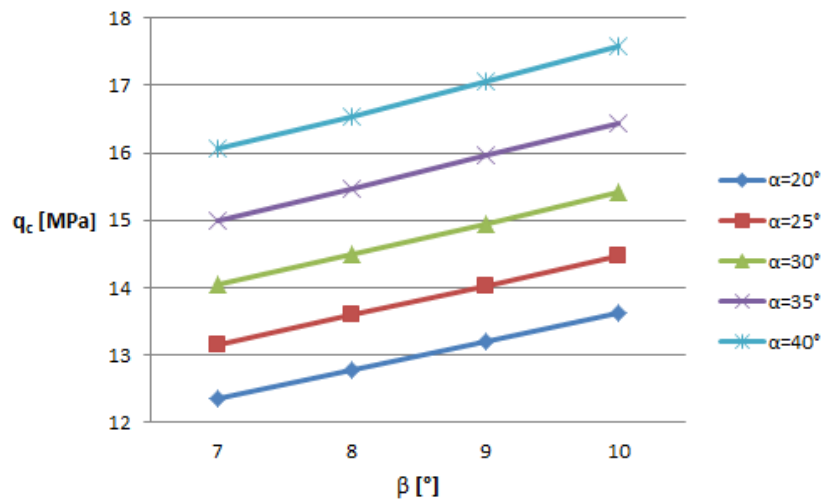
A számításokat elvégeztem különböző szögértékek esetén, melyek eredményei a 11. ábrán láthatók.



a.)



b.)



c.)

11. ábra. Erő (a.) és feszültségek (b,c) szögfüggése

Az ábrán jól látható, hogy ugyan azon alakítási szög esetén a nyújtási szöget növelve egyre nagyobb erő és feszültség keletkezik az alakítás során. Az  $\alpha=30^\circ$  és  $\alpha=35^\circ$  alakítási szög esetén az alakító erő rohamosan megnő  $\beta=9^\circ$ -től, ami annak köszönhető, hogy a relatív hengerlési emelkedés (c) nagyobb, mint egy, ezért az alakítandó felületet az ennek megfelelő feltétel szerint kell számolni.

## 4. A Szerszám modellezése

A feladat kidolgozása során a Creo 2.0 verziójú CAD tervezőprogram Parametric modulját használtam.

### 4.1 Modellezés

A szerszám megalkotásához szükséges paraméterek:

- $\alpha$ : alakítási szög =  $20^\circ$
- $\beta$ : nyújtási szög =  $8^\circ$
- $\Delta r$  [mm]: az egymást követő lépcsők átmérő különbségeinek a fele. Értékeit a 2. táblázat tartalmazza.

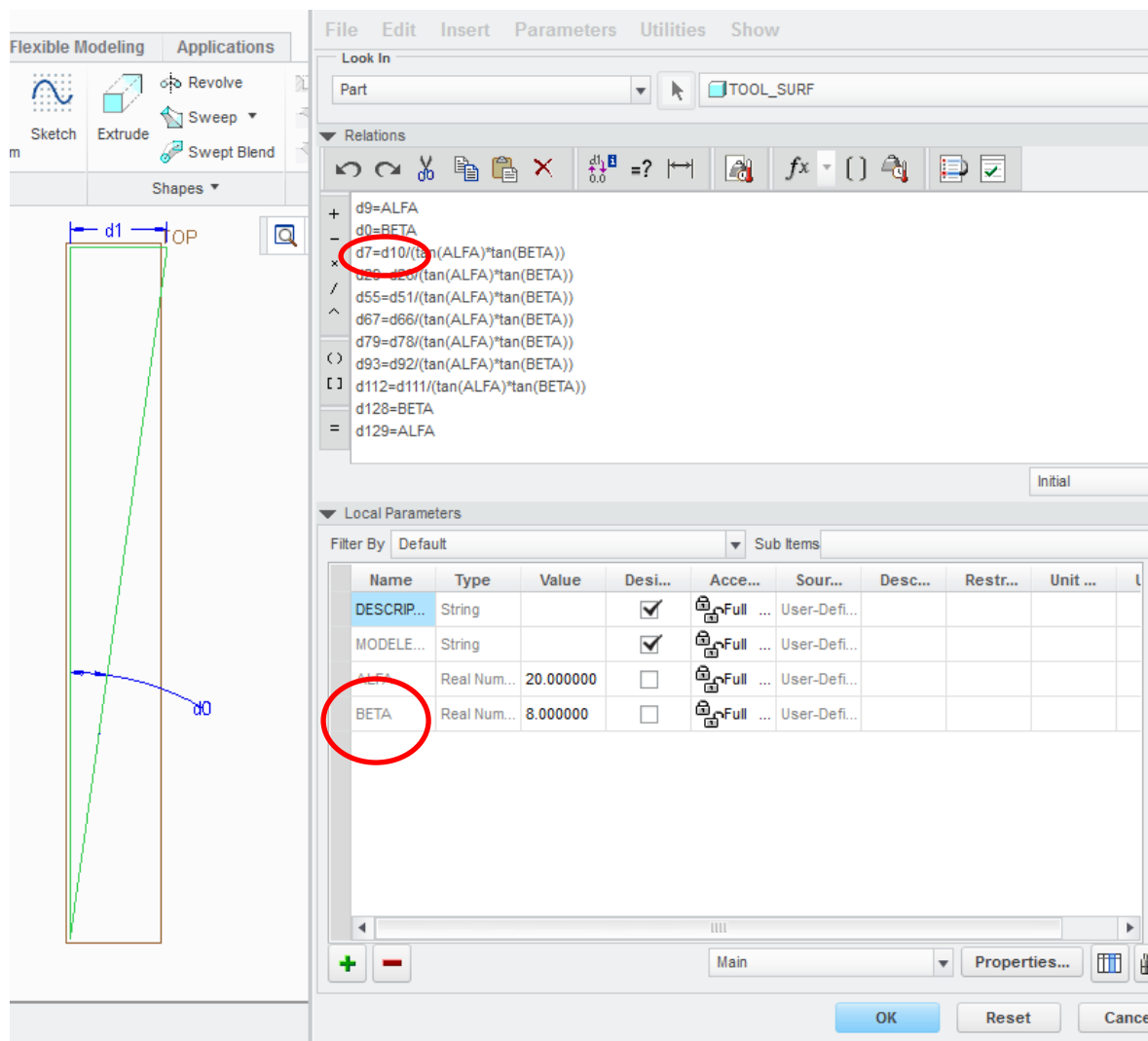
2. táblázat

| $\Delta r1$ | $\Delta r2$ | $\Delta r3$ | $\Delta r4$  | $\Delta r5$  | $\Delta r6$  |
|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 10,3        | 2,2         | 1,35        | 1,85         | 6,2          | 1,3          |
| $\Delta r7$ | $\Delta r8$ | $\Delta r9$ | $\Delta r10$ | $\Delta r11$ | $\Delta r12$ |
| 4,6         | 6,2         | 5           | 1,6          | 1,1          | 2,4          |

A modellalkotáshoz két elméleti részre osztottam a szerszámot. Először az egyik felét, majd a másik felét kezdtem el sorban felépíteni. A valósághoz képest elhanyagolásokat tettem, így az általam alkotott szerszám egy összefüggő test, míg a valóságban három szegmensből tevődik össze. Elhanyagoltam továbbá a rögzítéshez szükséges furatokat, az alsó szerszámon lévő munkadarab megfogó szerkezetet.

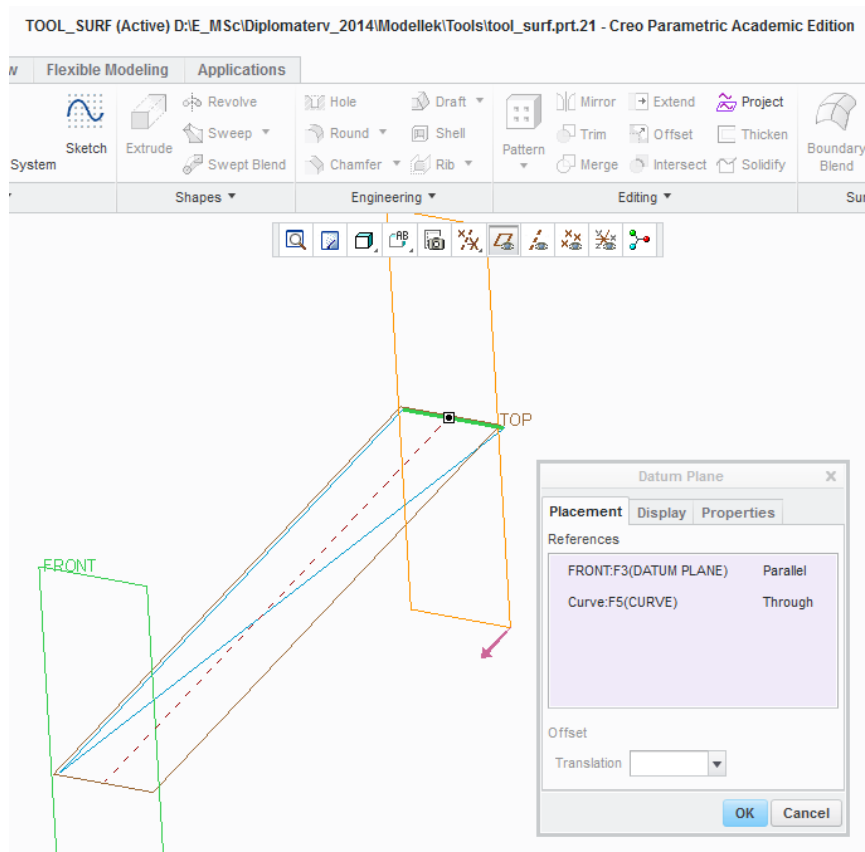
A modellt egy háromszög alakú vázlattal kezdtem a „Top” nevű síkon. Ez a háromszög lesz az alapja a szerszám egyik felének. A nyújtás szögét egyelőre tetszőlegesen választottam, a szerszám végének hosszát pedig geometriai összefüggésekből úgy határoztam meg, hogy az 5 mm-el szélesebb legyen, mint a kész alkatrész, hiszen az osztókésnek a fölösleget el kell távolítania a darabról. Ezt követően paraméterként felvettem az  $\alpha$  és  $\beta$  szögeket, és az alap vázlaton hozzárendeltem a  $\beta$  szöget a háromszög d0-val jelzett paraméteréhez szögéhez (12. ábra).

A későbbiekben  $\alpha$  és  $\beta$  bármelyike megváltoztatható, a szerszám pedig automatikusan felveszi a megfelelő geometriát.



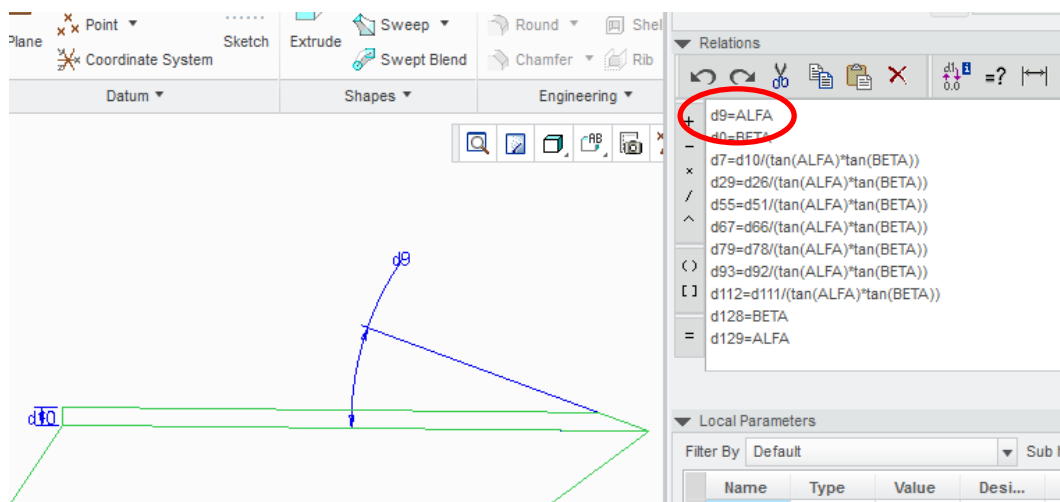
12.ábra. Alap vázlat és a paraméter hozzárendelése

A vázlatban a  $\beta$  szöggel szemben lévő élre felvettem egy segéd síkot (Tool End) a „Front” síkkal párhuzamosan kényszerítve, amelyre vázoltan minden egyes lépcső végének geometriáit.



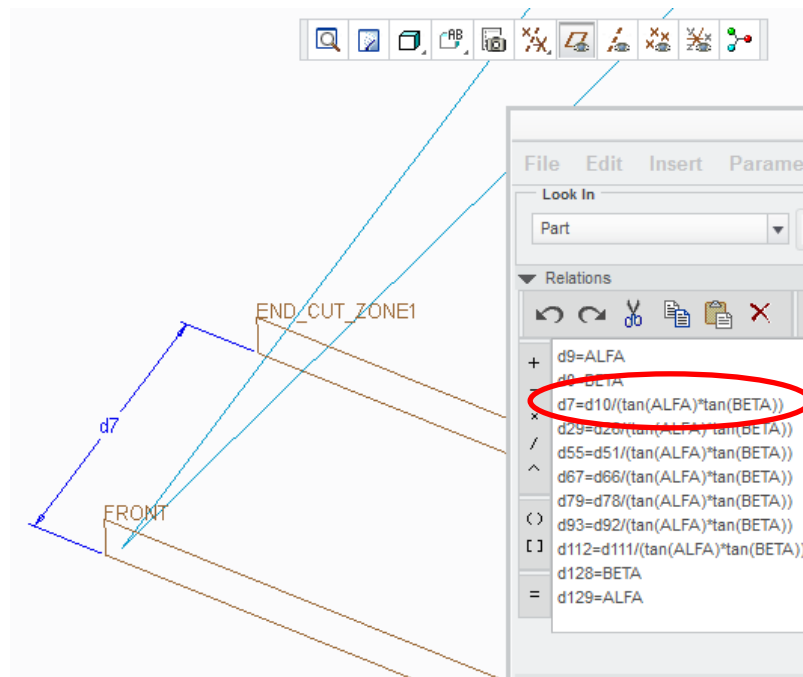
13.ábra. Segédsík felvétele

A „Tool End” síkon vázoltam az első lépcső geometriáját. Referenciaként az alap háromszög „Tool End” síkon lévő élét, valamint annak külső csúcspontját választottam. Erre azért van szükség, hogy ha  $\beta$  szög változik, akkor vele a geometria is meg fog változni. Ezekre a referenciákra elkészítettem a vázlatot, melynek magassága  $\Delta r_1$ , szöge pedig tetszőleges, majd ezt a szöget a korábban definiált  $\alpha$  paraméterhez rendeltem. Frissítés után a kívánt szögértéket veszi fel a geometria (14. ábra).



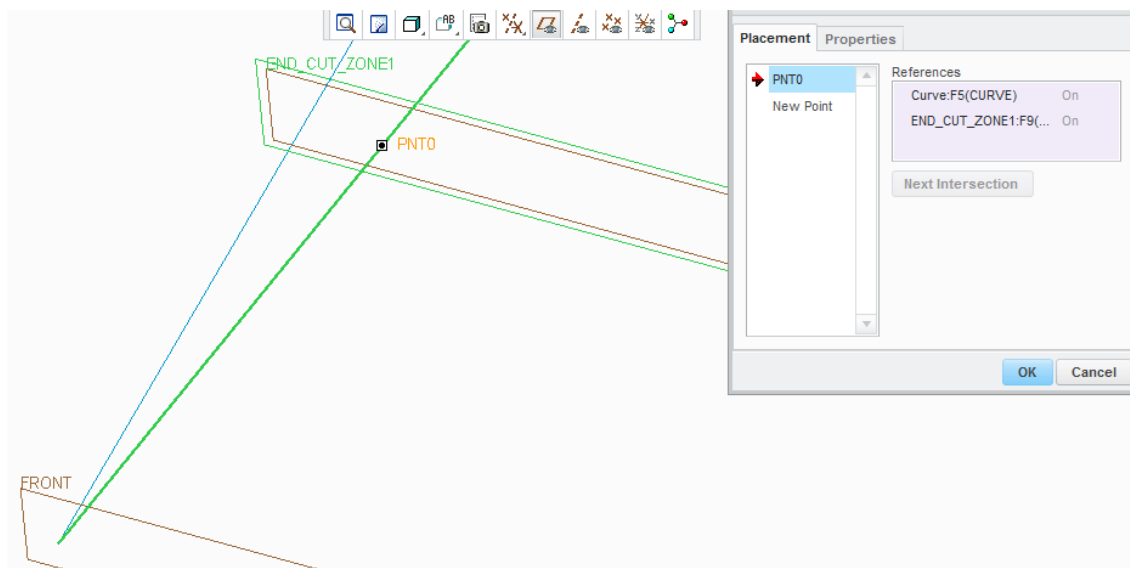
14.ábra. Véggeometria és paraméter hozzárendelés

A következő lépésben a vágási zóna végének geometriáját kell vázolni, amely egy háromszög lesz. Ehhez szükség van egy újabb segédsíkra. Ezt a síkot a Front síktól mérve, azzal párhuzamosan veszem fel tetszőleges távolságra. A vágási zóna vége ugyan olyan magas, mint maga a lépcső, hiszen onnantól már nincs átmérő változás. Ezzel egyidőben teljesülnie kell az  $\alpha$  szög állandóságának is, ezért a zóna végét jelző sík távolságát nehéz kezelni, főként, ha utólag a szögek módosulnak. Ennek érdekében geometriai egyenletet alkalmazok a sík távolságának automatikus meghatározására, melyhez szükség van  $\alpha$ -ra,  $\beta$ -ra és  $\Delta r_1$ -re is. Így a sík, és ezáltal a vágási zóna hossza a szögek változásával automatikusan frissül (15. ábra).



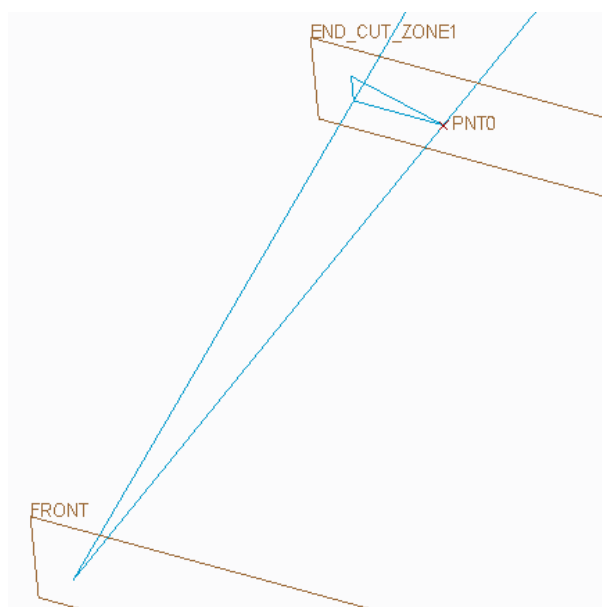
15. ábra. Reláció definiálás

Most már lehet a segédsíkra vázolni a geometriát. A vázlaton belül felveszek egy segédpontot, melynek referenciáit a 16. ábrán láthatjuk. Ez a pont szolgál majd a vázlat egyik referenciájaként.



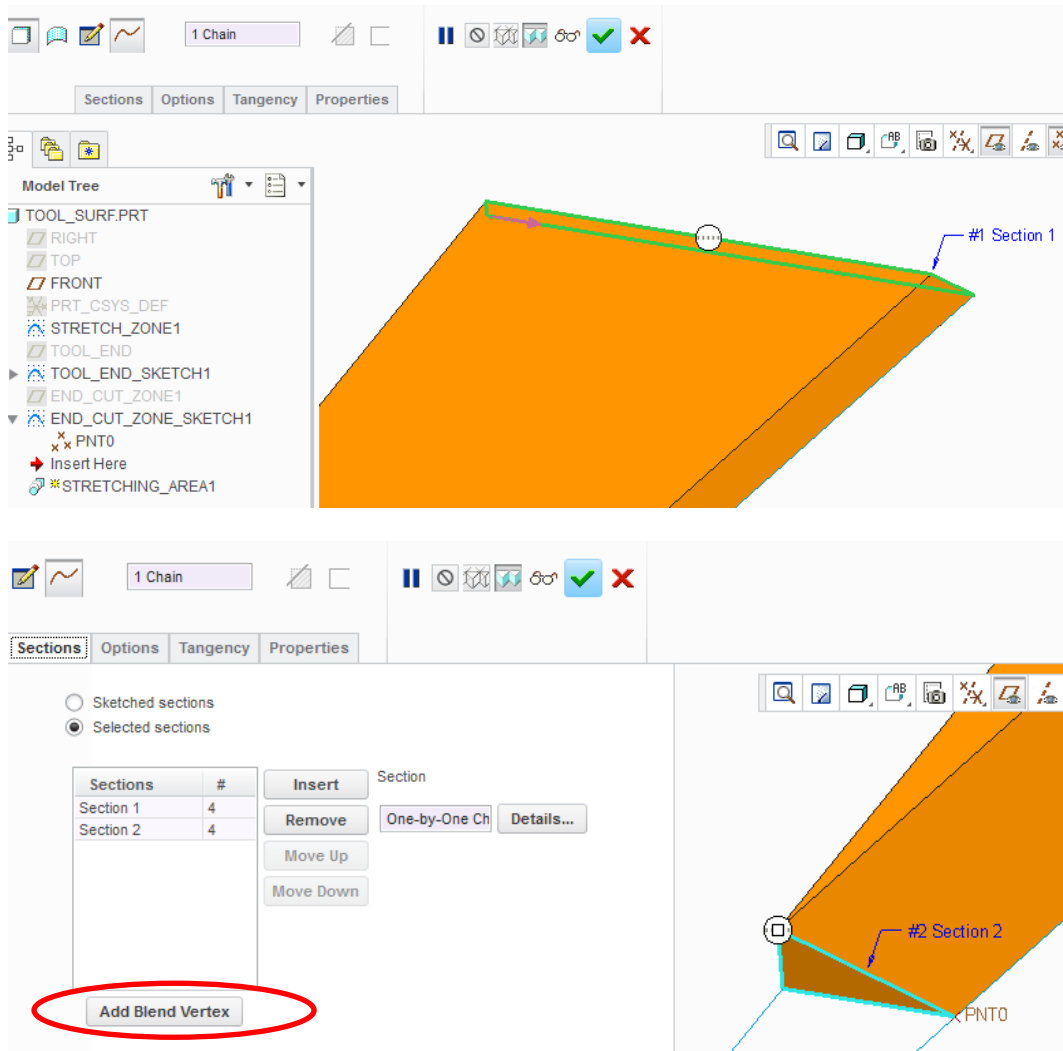
16.ábra. Segédpont definiálás

A vázlat másik referenciája a „Tool End” síkra vázolt geometria függőleges és felső éle. Ezek egyértelműen meghatározzák a geometriát (17. ábra).



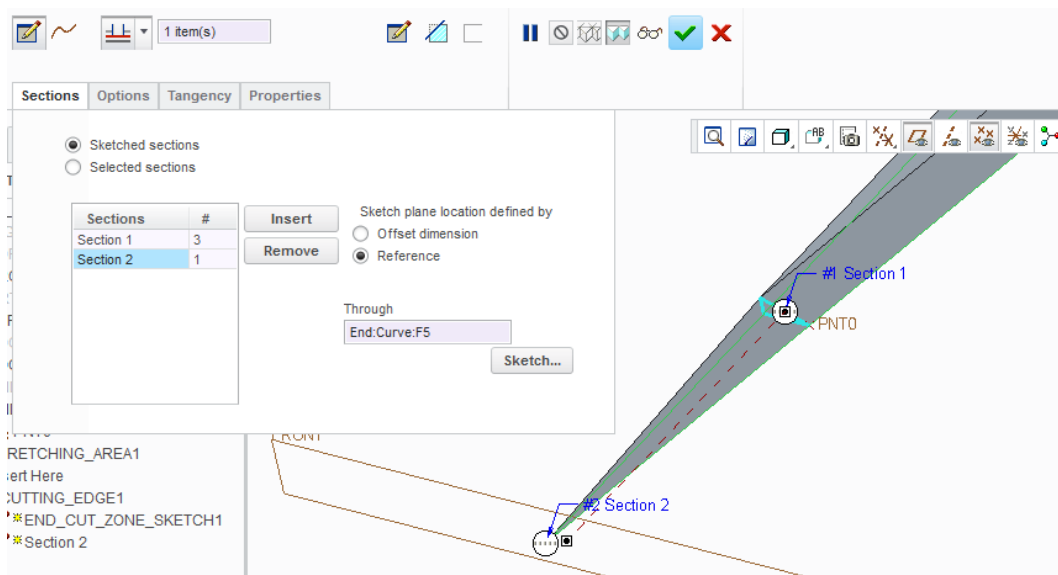
17.ábra. Vágási zóna vége

A „Blend” nevű paranccsal összekötöm a geometriákat. Az első keresztmetszet a lépcső vége, a másik pedig a vágási zóna vége. Ez utóbbi azonban 3 csúcsponttal rendelkezik, míg az első keresztmetszet 4-el, így nem tudja ezeket összekötni a szoftver. Ennek kiküszöbölése érdekében egy új csúcspontot kell felvenni az „add blend vertex” nevű paranccsal, melyet be kell húzni a megfelelő csúcspontba, ahová a negyedik él be fog futni. Ügyelni kell rá, hogy a körüljárás irányának kezdőpontja ne olyan helyen legyen, ahol a negyedik él fut majd be.

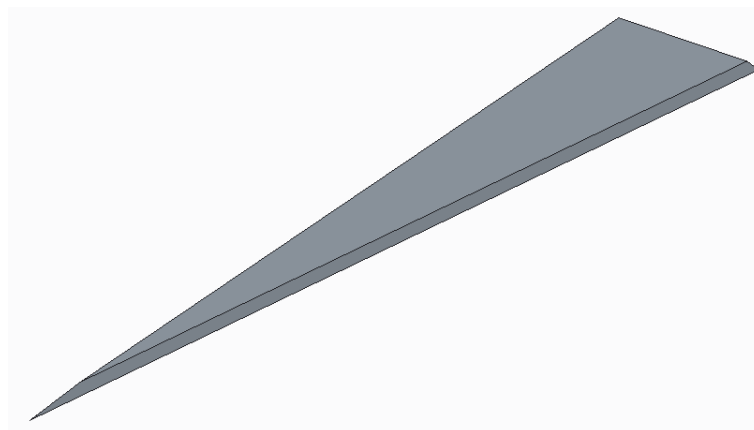


18.ábra. Kihúzás keresztmetszeten keresztül

Végül a vágási zóna végét kell össze kötni a szerszám csúcsával. Hasonlóan kell eljárni, mint előzőleg, annyi eltéréssel, hogy vázlatot is kell készíteni. Miután kijelöltem a keresztmetszetet, felugrik egy sík, amelyet a front síkig húzok el, ugyanis a szerszám csúcspontja ott helyezkedik el. (19. ábra), majd a vázlatban egyetlen pontot helyezek el. Ezt elfogadva a 3 élt behúzza a csúcspontba, és kész az első lépcső geometriája (20. ábra).



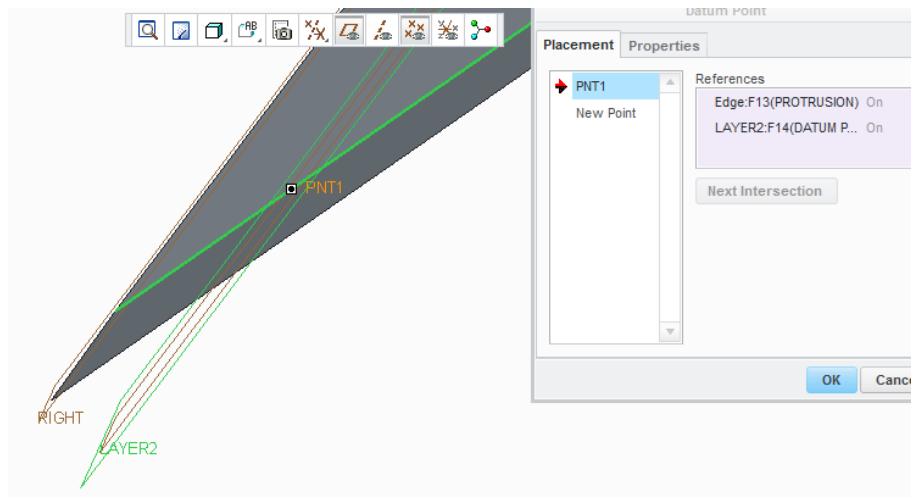
19. ábra. Vágó él kihúzás.



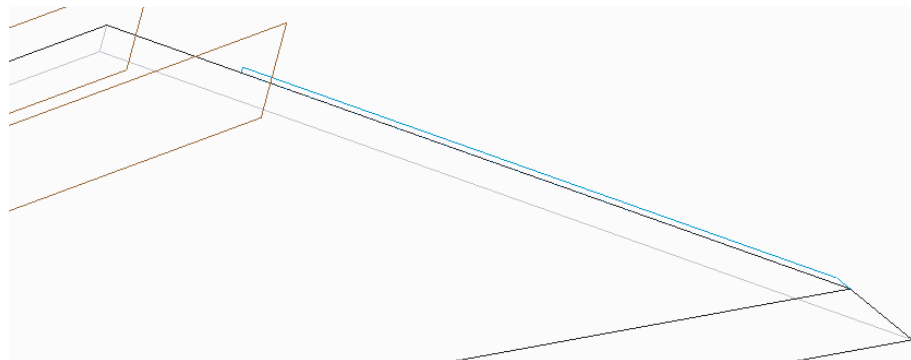
20. ábra. Első lépcső

A második lépcső kialakítás ugyan ezen az elven működik. Fel kell venni egy segéd síkot a „Right” síktól olyan távol, amekkora az első lépcső szélessége. A sík és a szerszám ferde élének találkozásához felveszek egy segéd pontot (21. ábra). A „Tool End” síkra elkészítem a második lépcső végének vázlatát (22. ábra). A felvett segédpontba a „Front” síkkal párhuzamosan felveszem a vágási zóna kezdetét jelölő síkot, majd ettől a síktól tetszőleges távolságra felveszem a vágási zóna végét jelző síkot. Amint ezt elvégeztem, a két sík távolságát a fentebb említett módon relációval vezérlem. Vázlatot készítek a vágási zóna végéről, majd a „Blend” paranccsal kihúzom a második lépcsőt is.

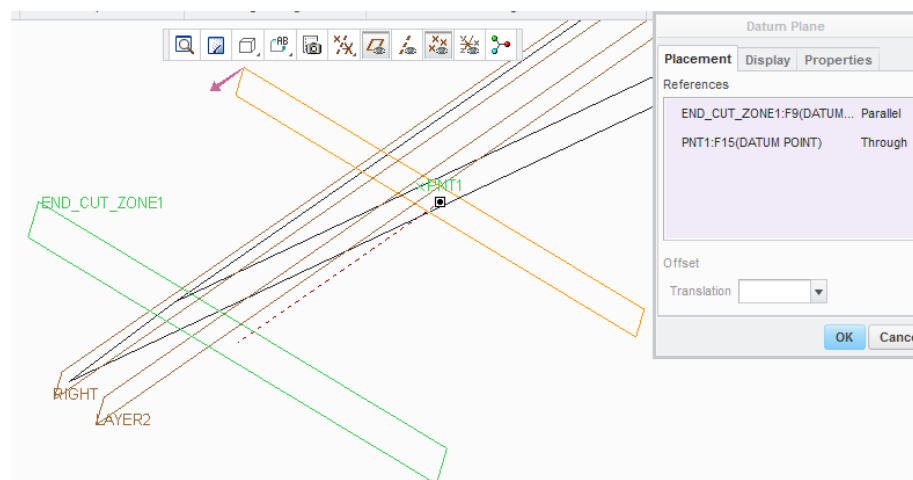
Ezeket a lépéseket minden lépcsőre elvégeztem, így relációval és paraméterekkel vezérelt a szerszám.



21. ábra. Segédsík és segédpont felvétele

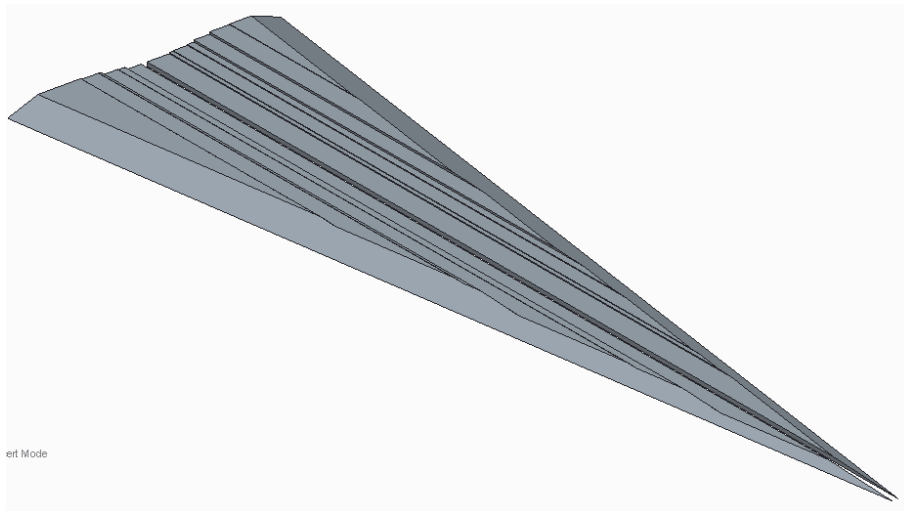


22. ábra. Véggeometria 2. lépcső



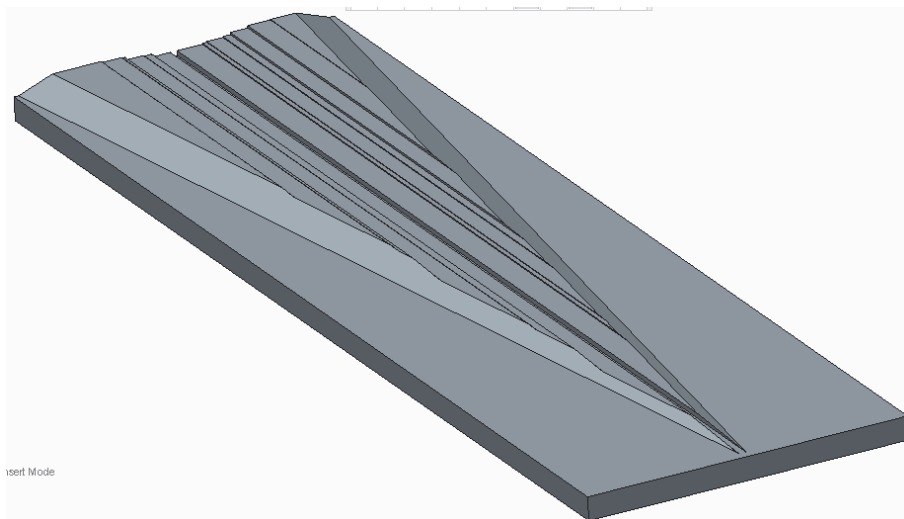
23. ábra. Vágási zóna kezdetét jelző sík felvétele

Ha elvégeztem a lépéseket minden lépcsőre, akkor a 24. ábrán látható szerszámfelületet kapom.



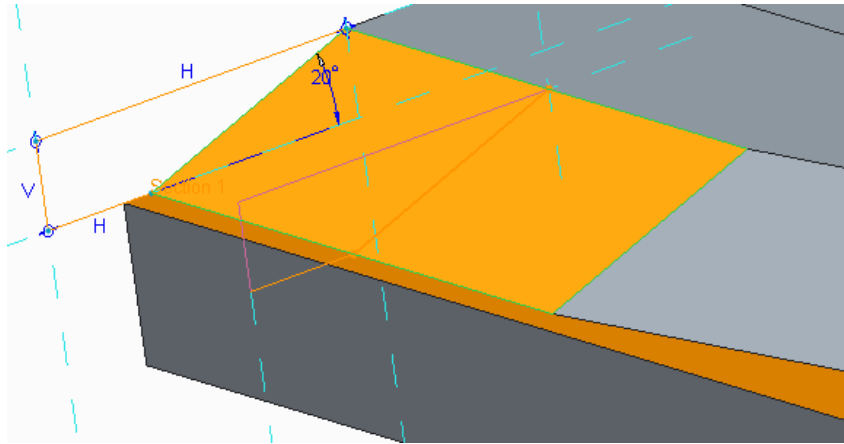
*24. ábra. Kész szerszámfelület*

Ezután ráteszem a szerszám alját, amelyen keresztül felfekszik majd a szerszám a hengerre (25. ábra).



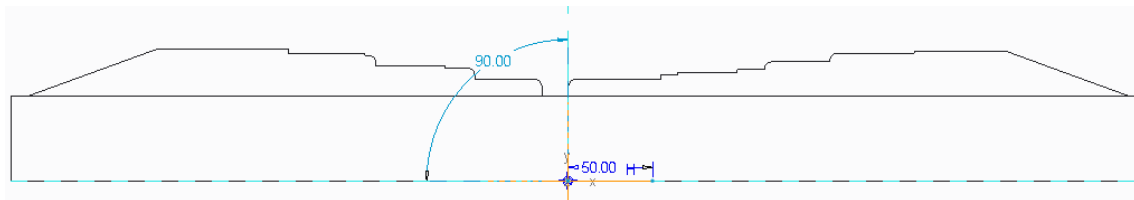
*25. ábra. Szerszám alj*

A gyártandó alkatrészen találhatók oldalferdeségek, lekerekítések, ezeket ráhelyezem a szerszám megfelelő felületeire, éleire. A szerszám bal oldala jóval szélesebb lett, mint amennyire szükség lenne, ezért a fölösleges részét az  $\alpha$  szöggel megegyező szögben levágom (26. ábra).

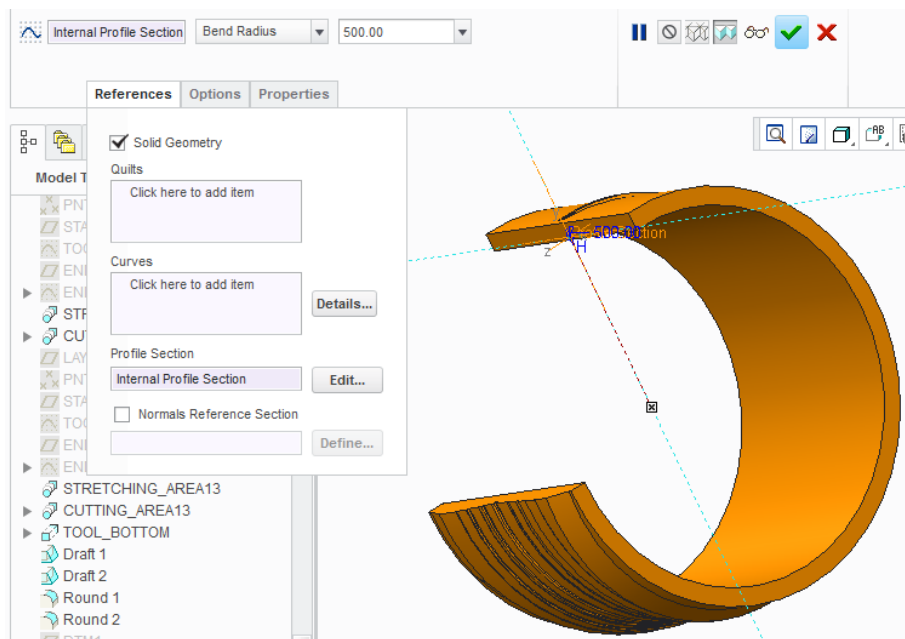


26. ábra. Vágás

A legutolsó lépésben a szerszámot ráhajlítom a hengerre. Erre a „toroidal blend” parancsot használom. Először vázlatban megadom az hajlítás profilját. Mivel keresztirányban nem történik hajlítás, így egy tetszőleges hosszúságú egyenest rajzolok, valamint felveszek egy koordináta rendszert is, majd jóváhagyom (27. ábra). Végül megadom a hajlítás sugarát, ami egyenlő a henger sugarával, vagyis 500 mm (28. ábra).

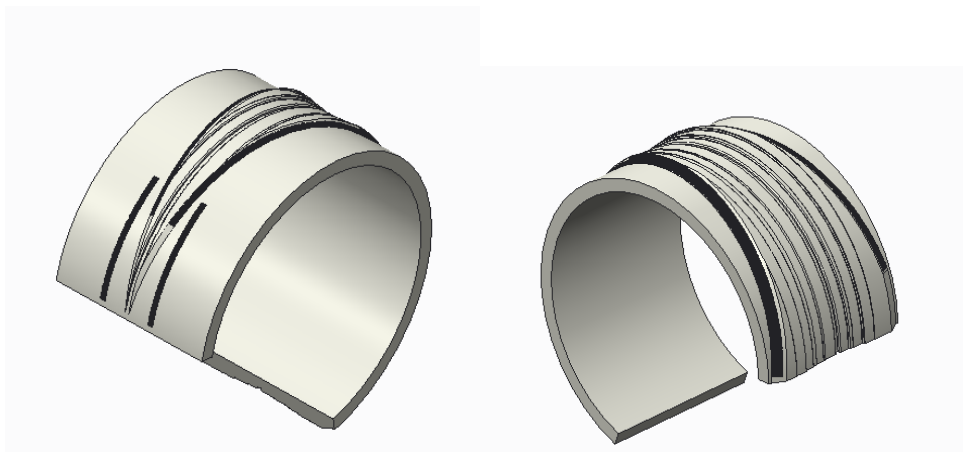


27. ábra. Keresztirányú hajlítás vázlata



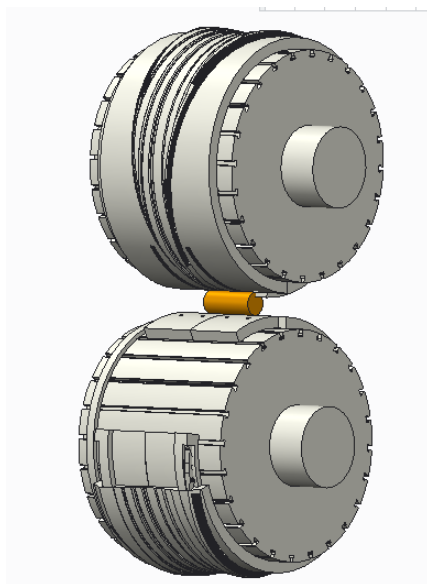
28. ábra. Hajlított szerszám

A kész szerszám némely felületére bordákat készítek, amely elősegíti a munkadarab forgását alakítás közben, biztosítva a csúszásmentességet (29. ábra).



*29.ábra. Felület bordázás*

A 30. ábrán láthatjuk az összeszerelt egységet. A felső hengeren található a munkadarab ütköző. Ennek ütközik az oldalról érkező darab, amikor a munkatérbe érkezik. A szerszám végeinél találhatók az osztókések, ezek távolítják el a véghulladékot. A munkadarab helyén tartásához két darab, görgős keresztvas szolgál, melyek a munkadarabot oldalról tartják.

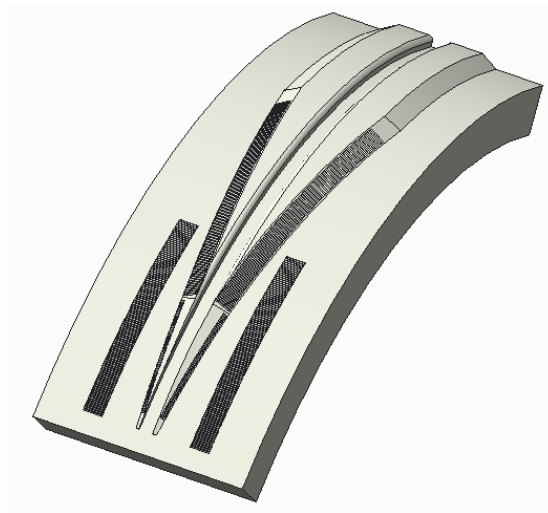


*30.ábra. Az összeszerelt egység*

#### **4.2 A folyamat vizsgálata Deform 3D végeselemes szoftver segítségével**

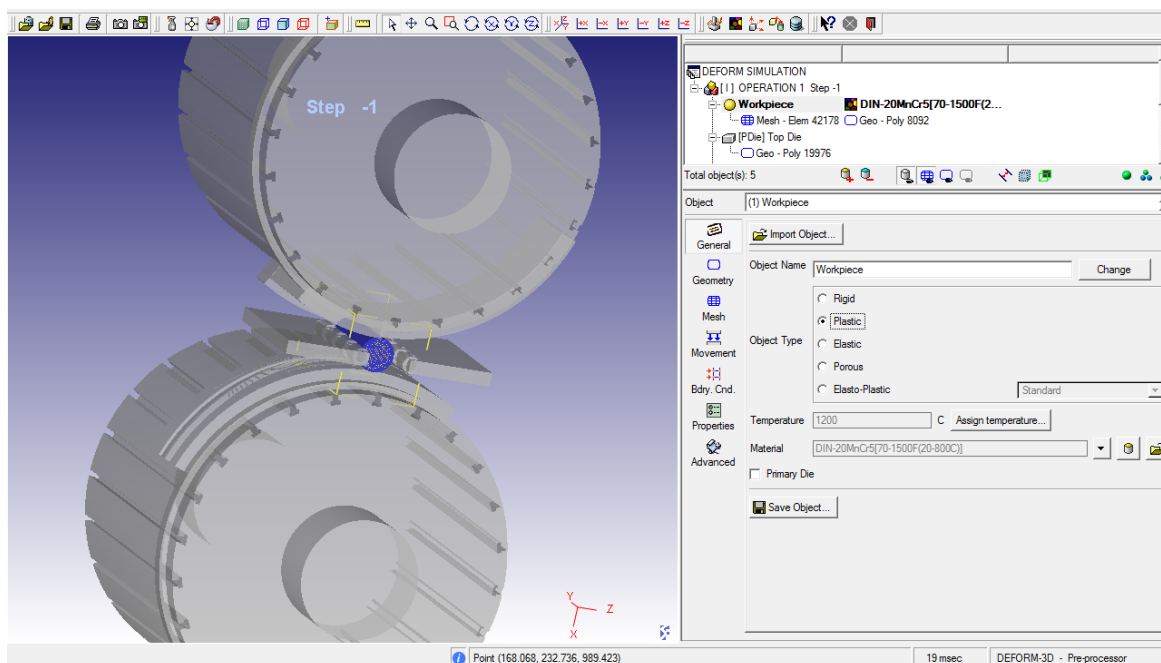
Az előzőekben lemodellezett szerszámon látszik, hogy igen bonyolult geometriát képvisel, ezért a vizsgálathoz csak a munkadarab első lépcsőjének kialakításához szükséges szerszámréteget használok fel (31. ábra). Ez részben idő és erőforrás csökkentő megoldás,

ugyanis a végelelemes számítás ezen folyamat vizsgálatára napokat vesz igényben, továbbá a kézi számításokat is csak erre a műveletre végeztem el, így könnyebben össze tudom hasonítani a kapott eredményeket.



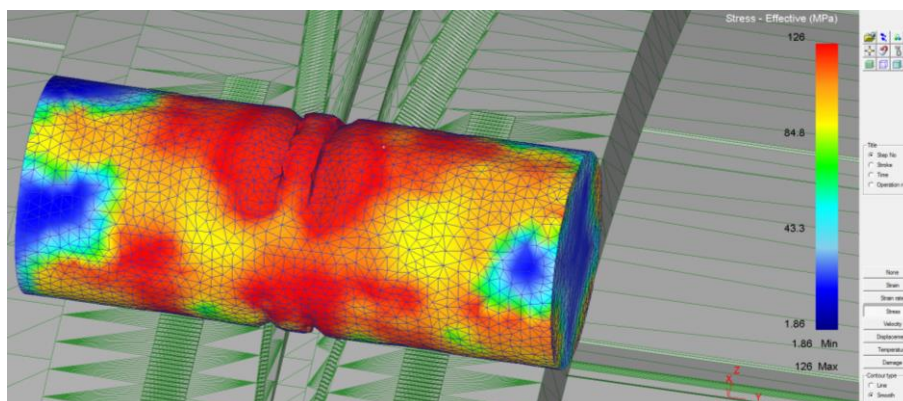
31. ábra. Szerszám

A 32. ábrán látható az összeállított szerszám a keresztvasakkal. A 3.4-es pontban megvizsgált szögértékek közül az  $\alpha=30^\circ$  és  $\beta=8^\circ$ -ot választottam a szerszámhoz, mert ezen értékeknél az alakító erő és a feszültség értékek kielégítőek, nyakképződés és csúszás sem várható. A hengerek forgási sebességét 0,1 rad/sec szögsebességre állítottam be. Az munkadarab anyag megtalálható az anyagkönyvtárban (20MnCr5), hőmérsékletét pedig a 1200°C-ra állítottam.

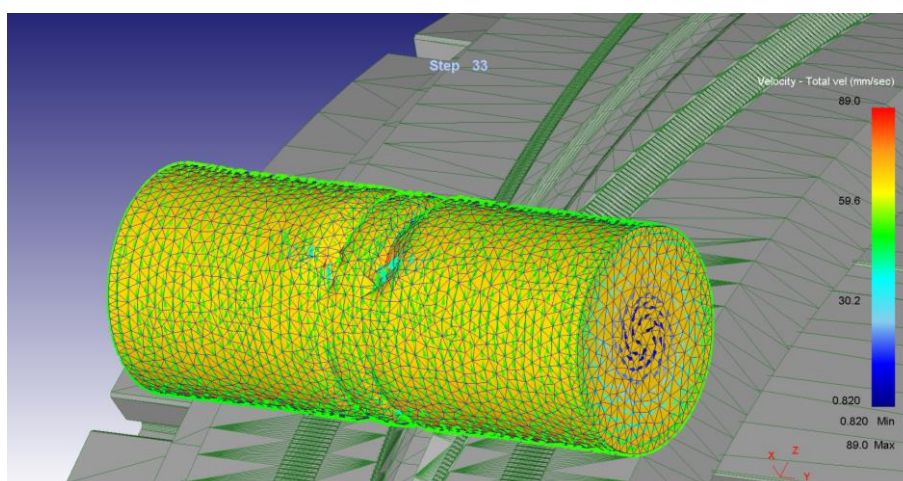


32. ábra. Összeállítás szimulációs környezetben

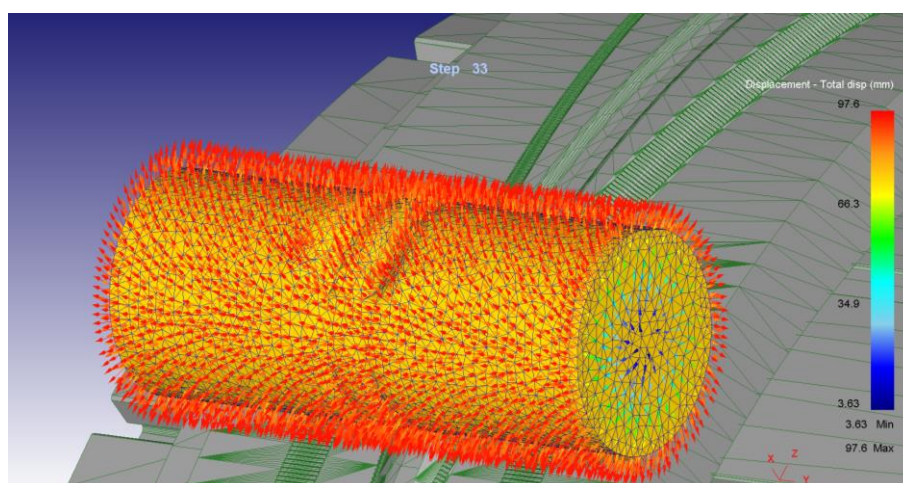
A következő képeken a munkadarabot láthatjuk alakítás közben, pontosabban a vágási zónában. Azért, hogy láthassuk mi is zajlik éppen, csak a felső szerszámot hagytam megjelenítve.



33.ábra. Feszültség mező

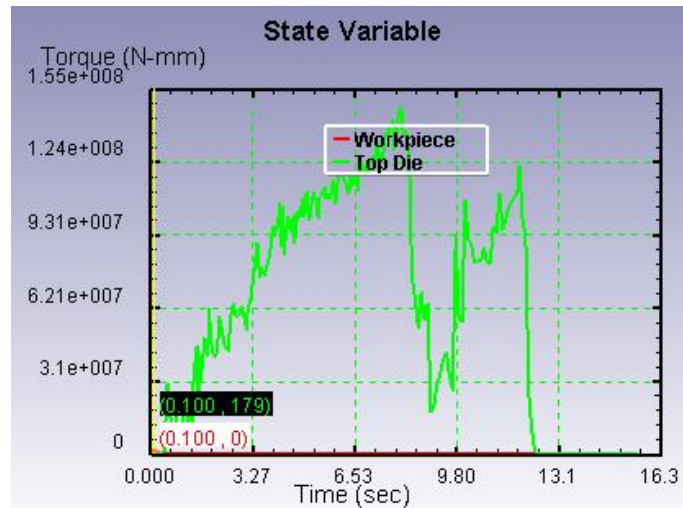


34.ábra. Sebesség mező

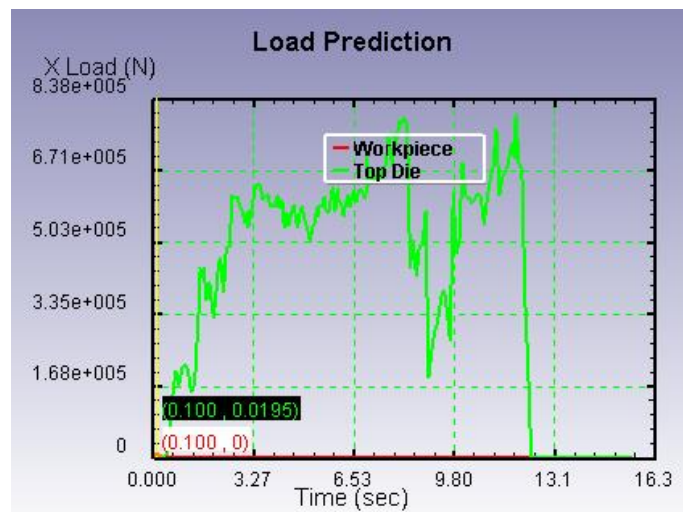


35.ábra. Elmozdulás mező

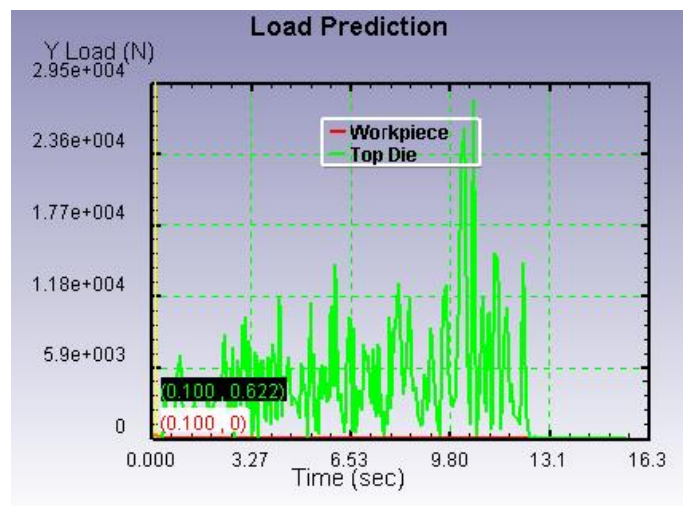
A szimuláció eredményei a következő képeken láthatóak. A diagramokon szereplő irányok közül az y irányú terhelés felel meg az általam is számított  $Q_z$  értékkel.



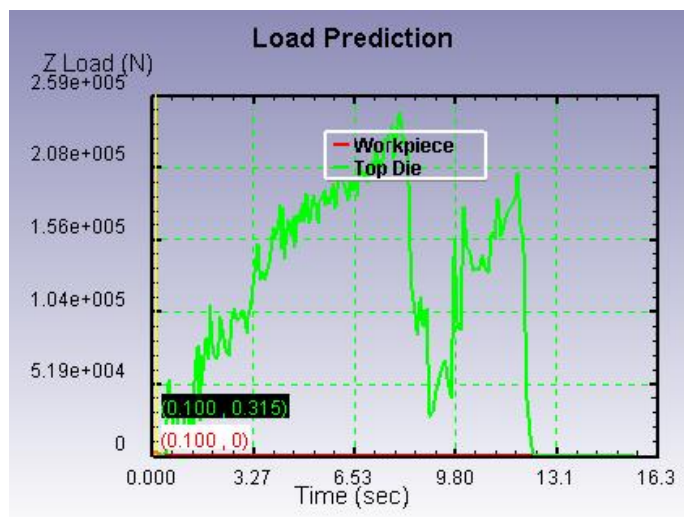
36.ábra. A folyamat nyomaték igénye



37.ábra. x irányú alakító erő



38.ábra. y irányú alakító erő



39.ábra. z irányú alakító erő

### 4.3 Következtetés

Ahogy a 38. ábrán is látható, alakítás közben az y irányú erő kissé ingadozik az nyújtási zónában, ami 9,8 másodpercig tart a diagram szerint. A maximális érték a diagramról leolvasva 14,3 kN, az  $\alpha=30^\circ$  és  $\beta=8^\circ$  esetén kiszámított érték a 11.a. ábráról szintén leolvasható, azaz 22,3 kN. A két érték közötti eltérést az okozza, hogy a számításnál az Upper-Bound módszert választottam, amely kissé felülméretezi a folyamatot, így a számított érték mindig nagyobb lesz, mint a szimulációban kapott érték.

Az x és z irányú erők valamint a nyomaték folyamatosan növekednek, ahogy az átmérő csökkenés és a nyújtás zajlik.

Mindent összegezve, a kapott eredmények alapján a szerszám helyesen lett megtervezve, a várt végeredményt kaptam. Továbbá a Deform 3D alkalmas a folyamat vizsgálatára, mind az egyszerű, mind pedig a bonyolult geometriát szimulálva.

## **5. Irodalomjegyzék**

- [1]: Z. Pater, „A study of cross wedge rolling process” Journal of Materials Processing Technology, 1998.
- [2]: Li. Q., M. R. Lovell and Z. Deng – Analysis of interfacial slip in two-roll cross wedge rolling process, 2001.
- [3]: <http://www.metalravne.com/selector/steels/zf7b.html>