

# A SÚRLÓDÁSI TÉNYEZŐ ÚJSZERŰ MEGHATÁROZÁSA ÉS FELHASZNÁLÁSA A PRO/ENGINEER ÉS MATHCAD SZOFTVEREK SEGÍTSÉGÉVEL

## AN ORIGINAL DETERMINATION AND APPLICATION OF FRICTION COEFFICIENT BY USING PRO/ENGINEER AND MATHCAD SOFTWARES

Tancsics Ferenc\*, Dr. Halbritter Ernő\*\*

### ABSTRACT

*The Axle Ltd. of RABA carried out remarkable modernization in the field of drop-forging last year. At multiple forging the moving of some pieces has been realized by robot technique.*

*This technique has made great demands on engineering development to be more precise. In most of the cases the Finite Element Method (FEM) is a useable solution to achieve this aim. According to the FEM it has become clear that more attention is needed to the upsetting between parallel flat surfaces than before.*

*During the upsetting the forging piece turns into barrel shape. The grain flow that is obtained by this way has an effect on the grain flow structure of the finished forged pieces as well. Turning into barrel shape during upsetting has close connection with the value of friction coefficient. Using the robot technique requires an extended knowledge of barrelling and the FEM demands to know the friction coefficient as well.*

*In our task we have finished a new method of strain modelling by an analytical way that can determine the friction coefficient fairly precise, or the shape of the barrel can be obtained by a theoretic friction coefficient as well.*

*The needed calculus and representation of the forging pieces in 3D we have accomplished by connecting MathCAD and Pro/Engineer softwares.*

### 1. BEVEZETÉS

Süllyesztékes kovácsoláskor a termelékenység fokozása és a munkadarab megbízható pozicionálása automatikus anyagmanipulációs rendszerekkel, robotokkal biztosítható.

\*doktorandusz, Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék, RÁBA Futómű Kft., Gyártásfejlesztés

\*\*témavezető, egyetemi docens, Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék

A gyártási képesség magasabb szintre emelése megkívánja, hogy a deformált munkadarabok geometriája közel állandó legyen.

A kovácsolási műveletek többsége revétlenítő zömítéssel (pl. tengelycsonk), vagy nagy alakváltozást igénylő zömítéssel (pl. tányérkerék) kezdődik. A párhuzamos nyomólapok között végzett zömítésnél a munkadarab hordósodik.

A hordósodás szoros összefüggésben van a súrlódási tényező értékével.

A cikk a súrlódási tényező egy egyszerűsített meghatározási módját mutatja be a zömített tömör hengeres test deformációja alapján, egy kinematikailag megengedett sebességmező felhasználásával, majd utal a módszer felhasználási lehetőségére.

### 2. ELŐZMÉNYEK

A zömített munkadarab alakjából következtetni lehet a súrlódási tényező értékére. A következtetési módszer két ismert, klasszikus képviselője [1]:

- a súrlódási tényező számítása a zömítés során mérhető alakítási szilárdság és az alakítási ellenállás összehasonlításával,
- súrlódási mérőszámok meghatározása zömített gyűrűk deformációjából.

A tömör hengeres testek párhuzamos nyomólapokkal végzett zömítésénél az alakítási ellenállás – a zömítés fajlagos erőszükségletének ( $\bar{p}$ ) – számítását Siebel dolgozta ki [2].

Egyszerűsítő képlekenységtani hipotézisek alkalmazásával az átlagfeszültség módszerével először a  $p(r)$  felületi nyomást határozta meg. A  $p(r)$  nyomás értéke az alakítási szilárdság ( $k_f$ ), a súrlódási tényező ( $\mu$ ) és a geometriai adatok ( $h$ ,  $R$ ,  $r$ ) ismeretében a következő összefüggéssel számítható:

$$p(r) = k_f e^{\frac{2\mu}{h}(R-r)} \quad (1)$$

A zömítés erőszükséglete:

$$F = \int_A p(r) dA = \int_0^R k_f e^{\frac{2\mu}{h}(R-r)} 2r\pi dr \quad (2)$$

Az erőszükséglet jó közelítéssel:

$$F = R^2 \pi k_f \left(1 + \frac{2\mu}{3h} R\right) \quad (3)$$

A zömítés fajlagos erőszükséglete:

$$\bar{p} = \frac{F}{A} = k_f \left(1 + \frac{2\mu}{3h} R\right) \quad (4)$$

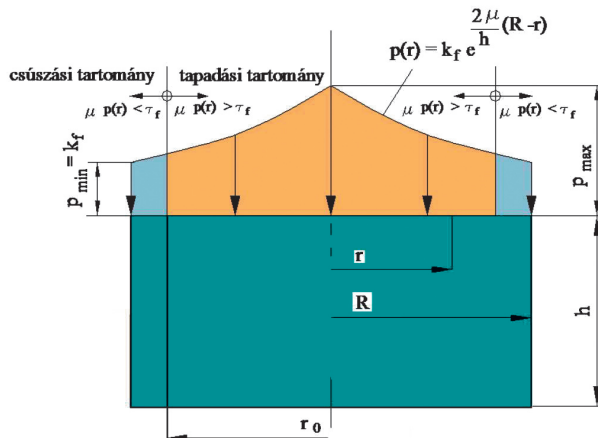
A súrlódási tényezőre vonatkozó összefüggés [3,5,6]:

$$\mu \equiv \frac{m}{\sqrt{3}} \equiv \left(\frac{\bar{p}}{k_f} - 1\right) \frac{3h}{2R} \quad (5)$$

Ahol:

- $\mu$  Coulomb-féle súrlódási tényező
- $m$  Kudo-féle súrlódási együttható
- $\bar{p}$  fajlagos alakítóerő (N/mm<sup>2</sup>)
- $k_f$  alakítási szilárdság (N/mm<sup>2</sup>)
- $h$  munkadarab magassága (mm)
- $r$  munkadarab közbenső sugara (mm)
- $R$  munkadarab külső sugara (mm).

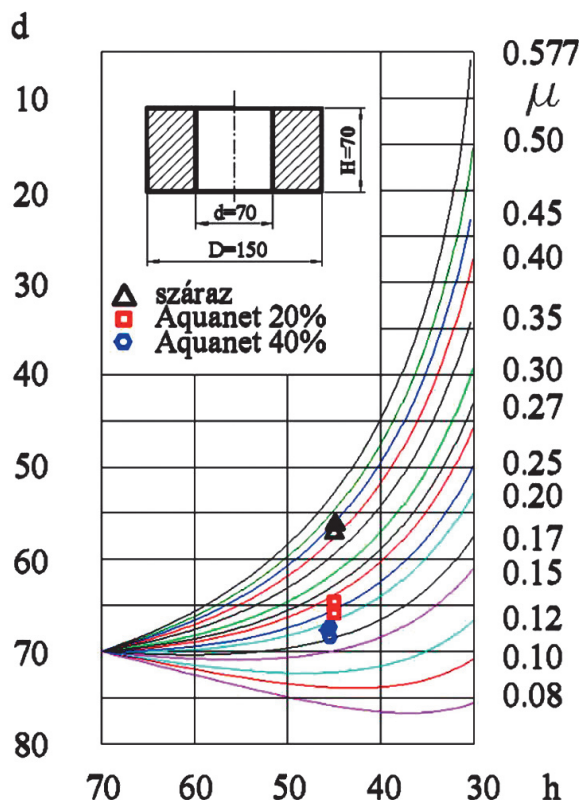
A ( $\mu$ ) Coulomb-féle súrlódási tényező értelmezési tartománya  $0 \leq \mu \leq 0,577$ , a Kudo-féle súrlódási tényező pedig  $0 \leq m \leq 1$ . A felületi nyomás változása az 1. ábrán látható.



1. ábra. A felületi nyomás változása párhuzamos nyomólapok között végzett zömítésnél.

Kovácsolásnál a zömítő erő mérése, az alakítási szilárdság megadása bonyolult feladat, így a súrlódási tényező meghatározásánál ezt a módszert elvetettük.

A Burgdorf-féle gyűrűzömítő vizsgálat [3] külön munkadarabokat, új geometria esetén új görbesereg felvételét igényli. Mindez költséges és nehézkes.

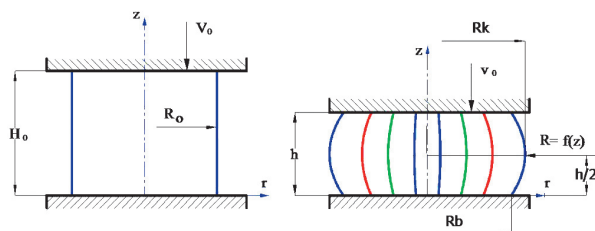


2. ábra. RÁBA kovácsüzemében gyűrűzömítő vizsgálatnál meghatározott súrlódási tényezők [9].

A 2. ábrán látható kiinduló geometriánál új görbesereget vettünk fel, a gyűrű zömítését 980 °C-on végeztük el különböző kenési viszonyok mellett. A gyűrűzömítés alkalmazását [4] korlátozza, hogy zömítés közben a súrlódási tényező nem változhat jelentősen. Melegalakításkor nagyobb súrlódási tényezővel kell számolni, ez előbb-utóbb a munkadarab 1. ábra szerinti részleges letapadásához vezet.

A közölt módszerek elmélete nem veszi figyelembe a munkadarab hordósodását, feltételezi a homogén alakváltozást.

Tömör hengeres test hordósodását szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra. A munkadarab zömítés előtt és után [7]

Az irodalmi utalások [7, 11] szerint a hordósodó munkadarab  $R=f(z)$  profilgörbéje jól közelíthető egy másodfokú polinommal.

A (3) összefüggés levezethető a felsőhatár módszer szerint is. Ekkor az alakítási erőt többnyire egy kinematikailag lehetséges sebességmező alapján határozzák meg.

Forgástesteknél a sebességmezőt célszerű hengerkoordináta rendszerben megadni.

A homogén alakváltozást eredményező sebességmező leírása több szakirodalomban is megtalálható [7, 10]:

$$w_z(z) = -\frac{v_0}{h} z \quad (6)$$

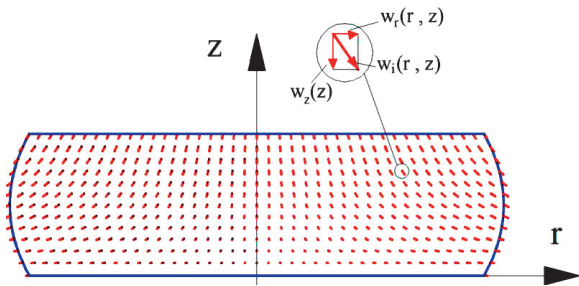
$$w_r(r) = \frac{1}{2} \frac{r v_0}{h} \quad (7)$$

A sebességkomponensek a (6, 7) összefüggéseknél lineárisan változnak.

Bebizonyosodott, ha a tengelyirányú sebességkomponenst  $w_z(z) = az^3 + bz^2 + cz + d$  harmadfokú polinommal fogalmazzák meg, akkor a kinematikailag lehetséges sebességmező hordósodó munkadarabot eredményez [7].

A hordósodó munkadarabnál az alkalmazott  $w_i(r, z)$  sebességvektor két komponense:

$$w_i(r, z) = [w_r(r, z); w_z(z)] \quad (8)$$



4. ábra. A hordósodást eredményező sebességmező képe [7].

A peremfeltételek figyelembevételével [7] a tengelyirányú sebességkomponens:

$$w_z(z) = \frac{z(-2z^2 kv_0 + 2z^2 v_0 + 3zkv_0 h - 3zv_0 h - kv_0 h^2)}{h^3} \quad (9)$$

A sebességmező  $w_r(r, z)$  sugárirányú komponense forrásmentes anyagáramlást feltételezve a

$$\operatorname{div} w = \frac{\partial}{\partial z} w_z + \frac{w_r}{r} + \frac{\partial}{\partial r} w_r = 0 \quad (10)$$

differenciálegyenlet megoldásával határozható meg:

$$w_r(r, z) = -\frac{1}{2} \frac{r(-6z^2 kv_0 + 6z^2 v_0 + 6zkv_0 h - 6zv_0 h - kv_0 h^2)}{h^3} \quad (11)$$

Ahol:

$w_r(r, z)$  sugárirányú sebességkomponens ( $ms^{-1}$ ),

$w_z(z)$  Tengelyirányú sebességkomponens ( $ms^{-1}$ ),

$k$  egyelőre ismeretlen, dimenziótlan paraméter, a továbbiakban anyagáramlási tényező.

A feltételezett sebességmezőnél a ( $k$ ) dimenzió nélküli paraméter befolyásolja a hordósodás mértékét [7].

A ( $k$ ) pontos értéke az alakítás teljesítmény-szükségletének minimalizálásával határozható meg [7].

Ha a munkadarab és a nyomólapok érintkezési felületén

mindvégig a Kudo-féle súrlódás lép fel, akkor a zömítés teljesítményszükséglete két komponensből tevődik össze:

$$P(k) = P_{id}(k) + P_s(k) \quad (12)$$

Ahol:

$P_{id}$  a deformáció tiszta teljesítményszükséglete ( $Nms^{-1}$ ),

$P_s$  súrlódási teljesítmény ( $Nms^{-1}$ ).

A felsőhatár módszer szerint ( $k$ ) különböző értékeivel létrehozott sebességmezők közül az közelíti meg legjobban a valóságot, amelyiknél az alakítási teljesítmény minimalizálja a  $P(k)$  függvényt.

Ez alapján belátható, hogy a ( $k$ ) értéke összefügg a súrlódási tényező értékével, de a kapcsolat elemzése, felhasználása elmaradt a korábbi munkákban.

Egy ismert, állandó ( $k$ ) értékkel a kinematikailag megengedett sebességmező alapján az alakváltozás folyamata modellezhető. A modellezéshez a Széchenyi István Egyetem Anyagismereti és Járműgyártási Tanszékén AutoLisp programnyelven egy program készült [7].

A program indításakor meg kell adni ( $Rk_\rho$ ,  $Rb_\rho$ ,  $h_\rho$ ) kiinduló geometriai adatokat és tetszés szerinti sűrűséggel egy ponthálót. A program a kiinduló helyzethez képest a ( $h_\rho$ ) magasság értékét csökkenti  $v_\rho t = 0,1$  mm értékkel és a (9, 11) összefüggések felhasználásával kiszámítja a pontok új helyzetét. Ezután az új geometriát tekinti kiindulónak, és újabb magasságcsökkentéssel megismétli az előbbieket.

Mindent addig ismétli, amíg a kívánt magasságot el nem éri. Ezzel a ciklussal meghatározható a próbatest geometriájának zömítés közbeni változása. A 4. ábrán a zömítés utáni deformált pontháló és a pontháló pontjából kiinduló sebességvektorok láthatók.

A Rába Futómű Kft. évek óta használja a Pro/Engineer csúcskategóriájú CAD szoftvert, és az elmúlt évben megvásárolta a MathCAD matematikai szoftvert is. Az említett szoftverek között kétoldali asszociatív kapcsolat biztosítható.

### 3. A SÚRLÓDÁSI TÉNYEZŐ ÚJSZERŰ MEGHATÁROZÁSA

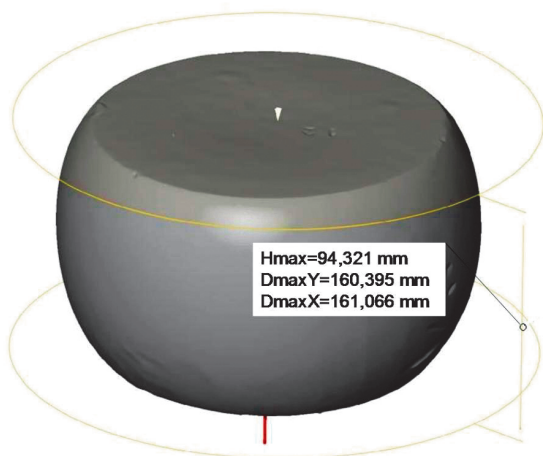
Mint már ismeretes, a hordósodó munkadarab  $R=f(z)$  profilgörbéje jó közelítéssel leírható egy másodfokú polinommal. A közelítés pontosságát az elvégzett kísérleteknél ellenőriztük.



5. ábra. Üzemi körülmények között zömített kovácsdarabok.

A kísérletnél a tömör hengeres testek (továbbiakban munkadarabok) anyaga 20MnCrS5, kiinduló mérete  $R_0=50\text{ mm}$ ,  $H_0=211\text{ mm}$ , az alakítás hőmérséklete  $1100-1210\text{ °C}$ , a kenőanyag Aquanet Ls (grafit 20%-os vizes szuszpenziója), a szerszámok felületi érdessége ( $Ra$ ) 6,3, a szerszámok felületi hőmérséklete (9)  $200-250\text{ °C}$ , az alkalmazott gép 40 MN Maxima kovácsajtó volt.

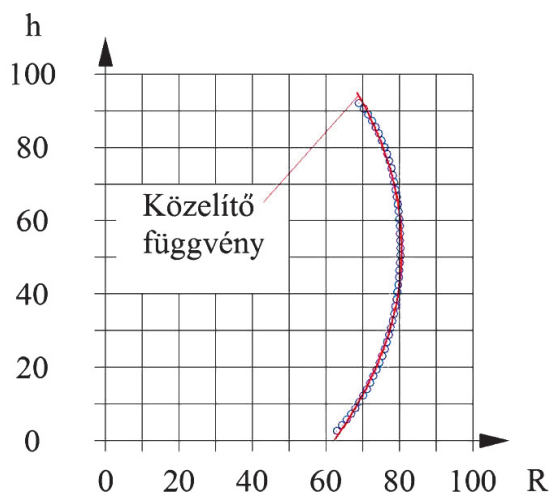
A munkadarabok profilgörbéjének ellenőrzéséhez először a zömített munkadarabok felületét leképeztük a Széchenyi István Egyetem tulajdonában lévő GOM optikai digitalizálóval.



6. ábra. Az egyik zömített munkadarab optikailag digitalizált képe.

A digitalizált felületet elmetszettük, a metszeti határoló görbe kijelölt részéhez tartozó pontok koordinátáit kimentettük, majd a pontokat másodfokú polinommal közelítettük [8].

A közelítő függvény adta értékek és a mérési adatok között az  $r=0,996$  korrelációs együttható szoros kapcsolatot mutatott.



7. ábra. A közelítő függvény és a mért értékek (pontok) grafikonja (zömített magasság  $h=95\text{ mm}$ )

A másodfokú polinom megfogalmazásánál feltételeztük, hogy a szerszám érintkezésénél ( $z=0$ , illetve  $z=h$  helyeken) az ( $R_b$ ) rádiuszok megegyeznek (lásd 3. ábrán), és a  $z=h/2$  helyen az ( $R_k$ ) rádiusz értéke maximális.

Ilyen peremfeltételek mellett az  $R(z)$  függvény:

$$R(z) = -\frac{4(Rk - Rb)}{h^2} z^2 + \frac{4(Rk - Rb)}{h} z + Rb \quad (13)$$

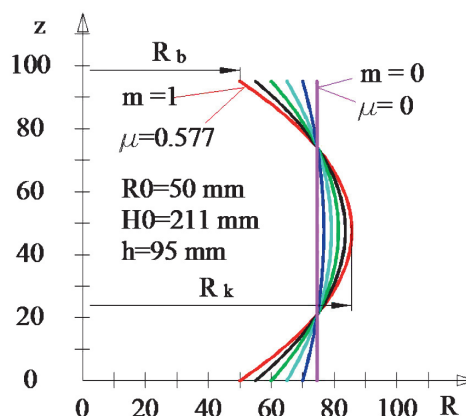
A térfogat-állandóság alapján:

$$R_0^2 \pi H_0 = \int_0^h R^2(z) \pi dz \quad (14)$$

A (13), (14) összefüggések felhasználásával az  $R(z)$  függvény a kívánt formában megadható:

$$R(z) = \frac{5z^2 R_b h - z^2 \sqrt{-5R_b^2 h^2 + 30hR_0^2 H_0} - 5zh^2 R_b}{h^3} + \frac{zh \sqrt{-5R_b^2 h^2 + 30hR_0^2 H_0} + R_b h^3}{h^3} \quad (15)$$

Ezzel ábrázolható az  $R(z)$  függvény a kiinduló ( $R_0$ ,  $H_0$ ) geometria ismeretében egy ( $h$ ) zömítési magasság és egy felvett ( $R_b$ ) rádiusz esetén.



8. ábra. A 95 mm-re zömített munkadarabok leegyszerűsített profilgörbéi azonos térfogat, és különböző ( $R_b$ ) rádiuszok esetén a (15) összefüggés felhasználásával.

A súrlódás nélküli ( $\mu=0$ , vagy  $m=0$ ) esetben a munkadarab nem hordósodik és a nem hordósodó munkadarab rádiusza a térfogat-állandóság felhasználásával számítható.

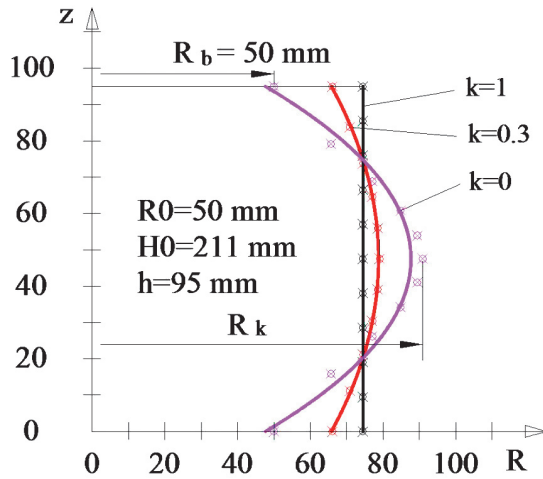
Teljes letapadás ( $\mu=0,577$ , vagy  $m=1$ ) esetén  $R_b=R_0$ . Az itt említett szélső értékek között az ( $R_b$ ), és ezzel együtt a munkadarabot határoló görbe alakja a súrlódási tényező értékétől függ.

A görbesereg felvételénél az egyszerűsítő feltételezések:

- a profilgörbe a párhuzamos nyomólapok között mindig és mindenhol jól közelíthető egy másodfokú polinommal

– a munkadarab és a szerszám két érintkezési felületénél ( $z=0$  és  $z=h$  helyen) a rádiuszok egyenlők ( $R(0)=R_b$ ,  $R(h)=R_b$ ), és a  $z=h/2$  helyen a rádiusz értéke maximális ( $R(h/2)=R_k$ ).

A görbesereg a 8. ábrán lévőhöz hasonlóan felvehető az anyagáramlás matematikai modellezésével is, a (9, 11) sebességkomponensek felhasználásával (9. ábra).



9. ábra. A 95 mm-re zömített munkadarabok profilgörbéi a (9, 11) anyagáramlási sebességkomponensekkel modellezve különböző ( $k$ ) értékek esetén.

A 9. ábra elkészítésénél a kiinduló henger alkotóján pontokat vettünk fel, és az említett matematikai modell felhasználásával ábráztuk a pontok deformált képét különböző ( $k$ ) értékek mellett, majd a pontokat másodfokú polinommal közelítettük.

Megállapítható, hogy  $k=1$  esetén az alakváltozás homogén lesz, a munkadarab hengeres marad, a (9, 11) összefüggések a szakirodalomban jól ismert (6, 7) alakot veszik fel.

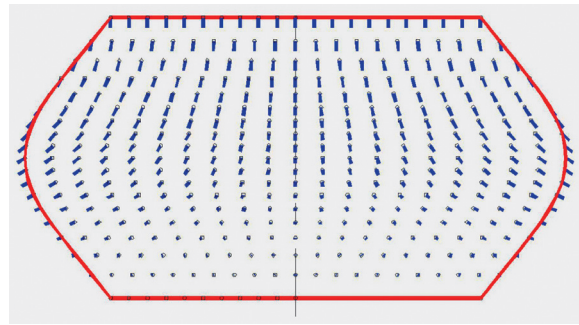
A 9. ábra és a (11) összefüggés alapján is érzékelhető, hogy  $k=0$  esetén a munkadarab és a szerszám érintkezésénél a sugárirányú sebesség értéke 0. Ez megfelel a teljes letapadásnak [9].

Ebben az esetben a (9, 11) sebességkomponensek az alábbi alakot veszik fel:

$$w_z(z) = \frac{z(2z^2 v_0 - 3zv_0 h)}{h^3} \quad (16)$$

$$w_r(r, z) = -\frac{1}{2} \frac{r(6z^2 v_0 - 6zv_0 h)}{h^3} \quad (17)$$

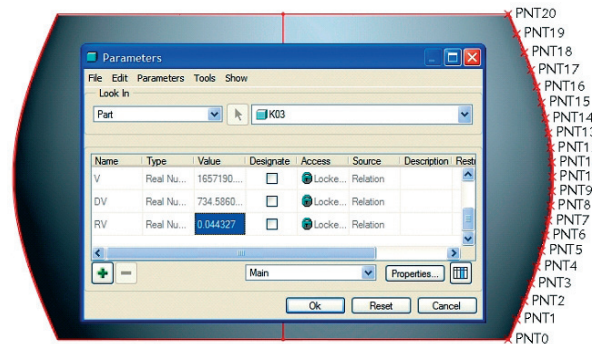
Ilyenkor a munkadarab úgy hordósodik, hogy a munkadarab és a szerszámlap érintkezésénél nem változik az átmérő, a szerszámlapok és a munkadarab érintkezésénél csak tengelyirányú sebességkomponens létezik (10. ábra).



10. ábra Az anyagáramlás képe teljes letapadás esetén a (9, 11) sebességkomponensekkel értelmezett anyagáramlásnál.

A súrlódás nélküli állapot és a teljes letapadás a gyakorlatban nem fordul elő, de ezeket a határeseteket a későbbiekben felhasználtuk.

Felmerült, hogy az anyagáramlás matematikai modellezésével meghatározott geometriai adatok mennyire felelnek meg a térfogat-állandóságnak.



11. ábra. A térfogat-állandóság ellenőrzése a matematikai modellnél.

A (9) tengelyirányú sebességkomponens felhasználásával a (11) sugárirányú sebességkomponens úgy lett meghatározva [7], hogy a sebességmező divergenciája zérus legyen (10).

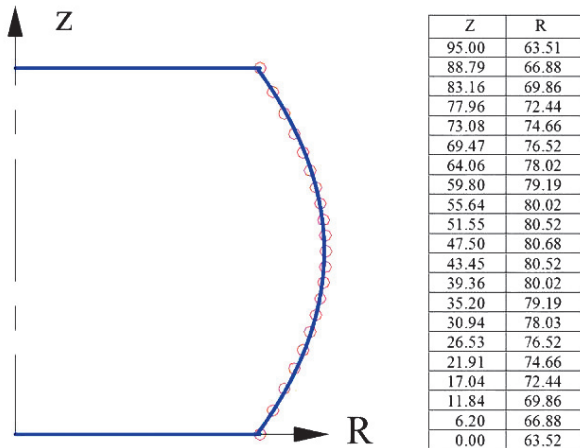
Ez elvileg biztosítja a térfogat-állandóságot. Az esetleges eltérés abból adódik, hogy zömítésnél az anyagáramlás időben állandóan változó, a modellezésnél pedig a  $v_0=0,1$  mm elmozdulásokon belül állandóságot feltételeztünk.

Az ebből adódó hibát úgy ellenőriztük, hogy a közelítő számítással kapott határoló pontok koordinátáit a Pro/Engineer szoftverrel ábráztuk és azokat spline görbékkel kötöttük össze. Az így kapott profilgörbével elkészítettük a forgatáshoz szükséges vázlatot, majd azt megforgatva a hordós munkadarab geometriai modelljét. A geometriai modell birtokában a térfogat a Pro/Engineer szoftver segítségével már meghatározható. A Pro/Engineer szoftverrel kiszámítottuk a térfogat eltérésének százalékos értékét, ami 0,044%-ra adódott (11. ábra).

A vizsgálat alapján kijelenthető, hogy a kis lépésekkel alkalmazott matematikai anyagáramlási modell biztosítja a térfogat-állandóságot.

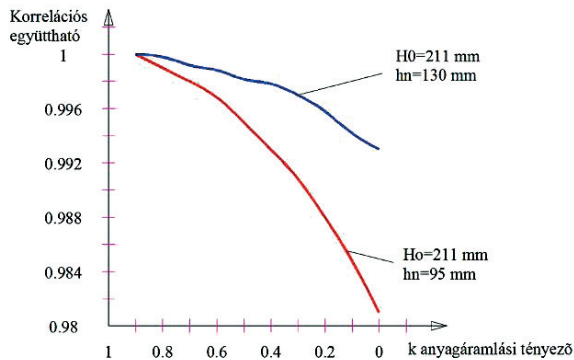
Az anyagáramlás matematikai modellezésénél megvizsgáltuk a határoló pontok parabolával való közelítésének pontosságát is.

A tetszőleges sűrűségű pontok ábrázolására és azok koordinátáinak kigyűjtésére egy korábbi AutoLISP programot fejlesztettünk tovább. A korrelációs együtthatók értékét a táblázatosan kigyűjtött koordináták alapján a MathCAD szoftverrel határoztuk meg. A 12. ábrán látható táblázat adatai és a közelítő függvény adta értékek között a korrelációs együttható értéke  $r=0,997$ , ami szoros kapcsolatra utal.



12. ábra. A határoló pontok kigyűjtése, ábrázolása, ( $k=0,3$ ,  $H_0=211$  mm,  $R_0=50$  mm,  $h=95$  mm geometriai adatokkal)

Ezt a vizsgálatot  $k=0$  és  $k=1$  között 0,1-es lépésközzé végeztük el.



13. ábra A közelítés pontosságát befolyásoló tényezők.

Megállapítható, hogy a közelítés pontossága a hordósodás mértékétől függ. Egy adott kiinduló geometriánál a hordósodás annál nagyobb, minél nagyobb a zömítés és minél kisebb a(k) anyagáramlási tényező.

A 9. ábra is szemlélteti növekvő hordósodásnál a határoló pontok fokozott eltérését a közelítő függvénytől.

A vizsgálat alátámasztja, hogy a matematikai modellnél a gyakorlatban ténylegesen előforduló esetekre ( $k > 0,2-0,3$ ) a határoló pontok parabolával való közelítésének pontossága megfelelő.

A 8. ábra és a 9. ábra hasonlósága szembevetendő, az ábrák alapján könnyen feltételezhető a (k) anyagáramlási tényező és az (m) Kudo-féle súrlódási tényező kapcsolata.

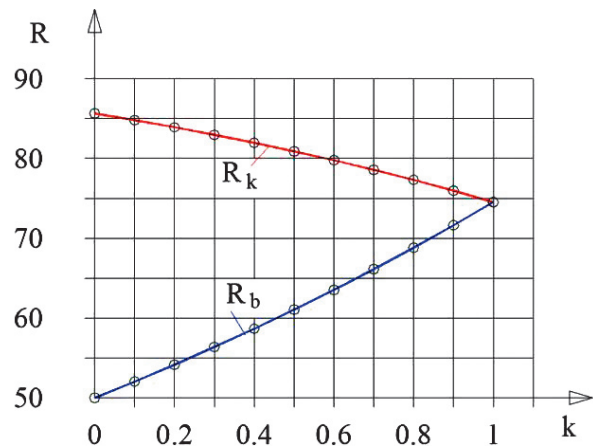
Mindkét ábrán megtalálható a súrlódás nélküli állapot és a teljes letapadásnak megfelelő állapot. A 8. ábrán a súrlódás nélküli állapot az  $m=0$  Kudo-féle súrlódási tényezővel értelmezhető, a 9. ábrán pedig a  $k=1$  anyagáramlási tényezővel. A teljes letapadásnál pedig  $m=1$  és  $k=0$ .

Az általunk javasolt módszer kiemelt egyszerűsítő feltételezése, hogy a Kudo-féle súrlódási tényező számítható az  $m=1-k$  összefüggéssel. Ettől minden bizonnyal létezik pontosabb összefüggés is, de véleményünk szerint a javasolt közelítés a mi célunknak megfelelő.

Munkánkban feltételeztük még, hogy az (m) Kudo-féle súrlódási tényező értéke a zömítés során végig állandó marad. A súrlódási tényező állandóságát a közismert gyűrűzömítésnél és FEM vizsgálatoknál is feltételezik [3, 4].

Az  $m=1-k$  feltételezés után még ki kellett dolgozni a súrlódási tényező hatékony meghatározásának módját.

A módszer kidolgozásához először különböző (k) értékekkel vizsgáltuk a 9. ábrán látható geometriai adatok mellett előforduló ( $R_b$ ) és az ( $R_k$ ) értékeket.



14. ábra. Az ( $R_b$ ) és az ( $R_k$ ) értékek változása a (k) függvényében.

A vizsgálatokat MathCAD szoftver segítségével  $h=130$  és  $h=95$  magasságoknál a teljes sorozatra /  $0 \leq k \leq 1$  / elvégeztük.

Az adatok elemzése alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a sugarak és a (k) tényező között funkcionális összefüggés van, és az összefüggés regressziós görbével (egy másodfokú polinommal) bármilyen zömítési feladatnál meghatározható.

Ez a megállapítás, hogy a kapcsolat törvényszerűsége jól kifejezhető egy másodfokú polinommal, felhasználható arra, hogy az  $R_k=f(k)$ , vagy a  $k=f(R_k)$  közelítő függvényt 3-3 értékpár alapján állítsuk elő (1. táblázat).

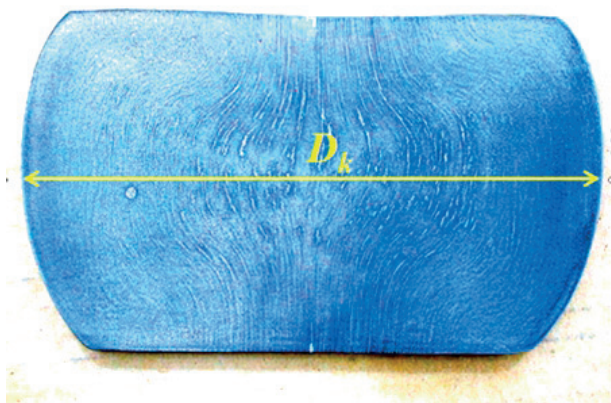
k	$R_b$	$R_k$
1	$R_b \text{ max}$	$R_k \text{ min}$
0,5	$R_b \text{ (m)}$	$R_k \text{ (m)}$
0	$R_b \text{ min}$	$R_k \text{ max}$

1. táblázat. Az  $R_k=f(k)$  függvény felvételéhez szükséges adatok.

Mint ismeretes,  $k=1$  esetén a munkadarab nem hordósodik, így  $R_b=R_k$ . Ezek az értékek a térfogat-állandóság alapján könnyen meghatározhatók. A  $k=0$  értéknél  $R_{b \text{ min}}=R_0$ , és  $(R_k \text{ max})$  értéke a (15) összefüggéssel kiszámítható a  $z=h/2$  behelyettesítéssel. Tehát a matematikai modellezésnél a számítási ciklust egyedül egy célszerűen megválasztott közbenső helyen (pl.  $k=0,5$ ) kell alkalmazni.

A (15) összefüggés alkalmazása az  $(R_b)$  ismeretét igényli. Belátható, hogy a  $k=f(R_k)$  közelítő összefüggés meghatározásához a számítási ciklust nem kell egy egész pontháló adataival elvégezni, elegendő csak a sarokpont sugárirányú elmozdulásait figyelembe venni. Ha már meghatároztuk a  $k=f(R_k)$  függvényt, akkor az felhasználható egy kísérlet kiértékeléséhez.

A kiértékelésnél meg kell adni a kiinduló  $(R_{k_0}, R_{b_0}, h_0)$  geometriai adatokat, a zömített munkadarab  $(h)$  magasságát és a zömített munkadarab  $(R_k)$  legnagyobb sugarát.



15. ábra. A zömített kovácsdarab  $D_k$  mérete.

A MathCAD matematikai szoftverrel elkészített program elvégzi a számítási ciklust, meghatározza a  $k=f(R_k)$  függvényt, abba behelyettesíti az  $(R_k)$  értékét. A számítás eredménye a zömítést jellemző  $(k)$  anyagáramlási tényező lesz. A  $(k)$  anyagáramlási tényező ismeretében már az  $m=1-k$  összefüggéssel adódik a súrlódási tényező értéke.

A 15. ábra egy kísérleti munkadarab szálelrendeződését szemlélteti. A szálelrendeződés alapján megállapítható, hogy a tényleges zömítést az 1. ábrán értelmezett letapadás jellemzi. A matematikai modellnél a letapadás jelensége nincs értelmezve, a kapott súrlódási tényező egy közelítő, átlagos értéként kezelhető.

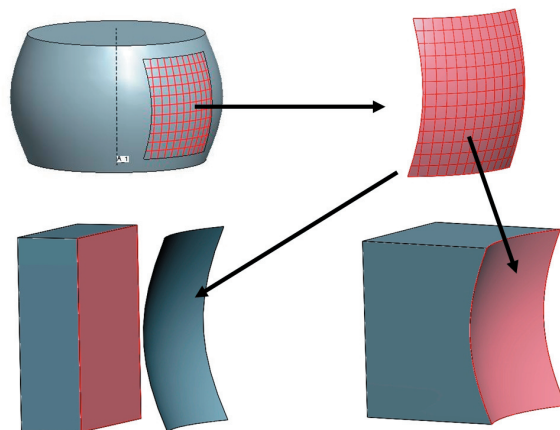
#### 4. ÜZEMI ADAPTÁCIÓ

A fejlesztést azért végeztük el, mert a kísérletileg meghatározott súrlódási tényező értékét a manipulációt végző robot munkadarab befogó pofájának tervezésénél kívántuk felhasználni.



16. ábra. Robotkar fogófelülete.

Az ilyen célzatú felhasználás során a Pro/Engineer szoftvernél a bemenő adatok az  $(R_{k_0}, R_{b_0}, h_0, h)$  és az  $(m)$  értékek. A MathCAD program ezen adatokkal határozza meg a zömített munkadarabnál az  $(R_k)$  sugarat, majd ezt az  $(R_k)$  értékét visszaadja a Pro/Engineer számára, a Pro/Engineer szoftver pedig elkészíti a zömített munkadarab várható háromdimenziós geometriai modelljét. A háromdimenziós geometriai modell lehetővé teszi, hogy a zömített munkadarab várható alakjának megfelelően tervezzük a robot munkadarabot befogó pofáját. A tervezés elvi menetét szemlélteti a 17. ábra.



17. ábra. A 3D-s geometriai modell felhasználásának elvi lehetősége a robot munkadarab befogó pofájának tervezésénél.

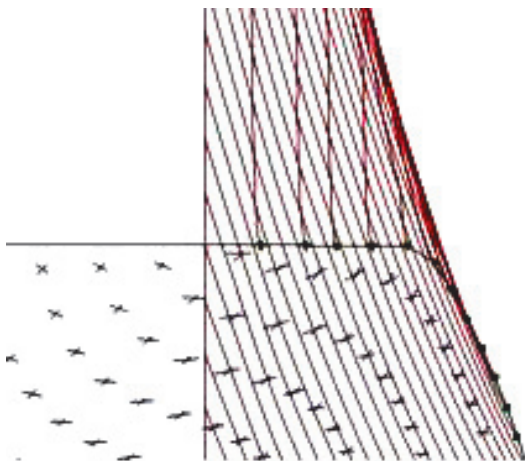
Vizsgáltuk az  $(R_k)$  sugarak  $(z)$  irányú eltolódási lehetőségeit is különös tekintettel a gyártási folyamat stabilitására. Megállapítottuk, hogy az eltolódás mértéke valós gyártási körülmények között csak rendszerhiba (pl. inhomogén hőmérséklet eloszlás a munkadarab  $(z)$  tengelye mentén, eltérő érdességű zömítő felületek, kenési zavarok) esetén számottevő. Az eltérést a rendszer ér-

zékeli és korrigálja, ezért az aszimmetrikus hordósodás részletes vizsgálatát nem tartottuk indokoltnak.

A súrlódási tényező meghatározásának általunk javasolt módszerét a Rába Futómű Kft. a kísérleti mintadarabok jó eredményei alapján be fogja vezetni.

## 5. FÉM VIZSGÁLATOK

A  $k=f(R_k)$  függvény végeselemes meghatározását is célul tűztük ki. A vizsgálatoknál megfigyelhető volt a részleges letapadás jelensége [9].



18. ábra. NODE pontok elmozdulása és a letapadás.

A részleges letapadás az  $(R_b)$  rádiusz értelmezését befolyásolja, így közvetlenül a végeselemes módszerrel nem tudtuk egyértelműen alátámasztani az általunk javasolt egyszerűsített módszer helyességét.

## ÖSSZEFOGLALÁS, KÖVETKEZTETÉSEK

A kutatómunka során felismerhetővé vált, hogy a választott, kinematikailag megengedett, hordósodást eredményező sebességmező ( $k$ ) anyagáramlási tényezője összefüggésbe hozható a Kudo-féle súrlódási tényezővel. Méréssel, korrelációs számítással igazolható, hogy a zömítésnél a hordósodó munkadarab profilgörbéje jól közelíthető egy másodfokú polinommal. A másodfokú polinom együtthatói meghatározhatók a geometriai adatok segítségével, ami lehetővé teszi a zömített munkadarab háromdimenziós geometriai modellezését. Ugyancsak megvizsgálva a választott sebességmezőnél a zömített munkadarab profilgörbéjét, megállapítható, hogy az leírható másodfokú polinommal. Ezzel is alátámasztható a választott sebességmező alkalmazhatósága.

Javasolt a Kudo-féle súrlódási tényező közelítő számítására az  $m=1-k$  összefüggés alkalmazása. Az összefüggés hatékony alkalmazására egy módszer került bemutatásra. A módszer felhasználásával, a Pro/Engineer és a MathCAD szoftverek összekapcsolásával egy program

készült a Kudo-féle súrlódási tényező meghatározására, valamint a zömített munkadarab várható geometriájának háromdimenziós modellezésére.

Végző soron fejlesztésre került a munkadarab befogó-pofák betéteinek tervezési módja a súrlódási tényező várható értékének figyelembe vételével.

A súrlódási tényező újszerű meghatározása, a módszer alkalmazása a kísérleti befogó-pofák tervezésénél megfelelő eredményt hozott.

A módszer általános használhatósága további vizsgálatot igényel.

## SUMMARY, CONCLUSIONS

*In the process of research it became recognizable that the material stream coefficient ( $k$ ) of the chosen kinematically regulated velocity field which results in barrelling shape can correlate with the Kudo friction coefficient. During upsetting the profile curve of barrelling shape of the working piece can be well approached by a polynomial of the second degree. This can be proved by measuring and correlation calculus. The factors of polynomial of the second degree can be determined by means of geometrical data which allows of the geometrical modelling of the upsetted working piece in 3D. Also analyzing the profile curve of barrelling shape of the working piece at the chosen velocity field it can be stated that the profile is describable by a polynomial of the second degree. The application of a chosen velocity field can be supported by this way as well.*

*The application of context  $m=1-k$  for approximate calculating of Kudo friction coefficient is suggested. A new method was presented for an efficient application of the context. Using this method connecting Pro/Engineer and MathCAD with each other has made a program for the calculation of Kudo friction coefficient and for modelling the expected 3D geometry of the upsetted working piece.*

*In the long run the construction method of working piece holder adapters have been developed with respect for the expected rate of friction coefficient. The original determination of friction coefficient and using this method at designing the pilot holder adapters have brought an adequate result.*

*The general applicability of this method needs more inspection.*

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A győri Széchenyi István Egyetemen működő Integrált Járműipari Termék – és Technológia Fejlesztő Rendszer IJTTR\_08 jelű támogatását ezúton köszöni a szerző.



- [1] DR. HORVÁTH L.: Képlékenyalakító technológiák elméleti alapjai, kézirat, Bánki Donát Műszaki Főiskola Anyag- és Alakítástechnológia Tanszék, Budapest, 1966.
- [2] SIEBEL, E.: Die Formgebung im bildsamen Zustand, Düsseldorf: Verlag Stahleisen 1932.
- [3] BURGDORF, M.: Über die Ermittlung des Reibwertws für Verfahren der Massivumformung durch den Ringstauchversuch.Essen, Industrie-Anzeiger Nr. 5 1967.
- [4] Cristina Maria Oliveira Lima Roque, Sérgio Tonini Button: Application of the Finite Element Method In Cold Forging Processes, J. Braz. Soc. Mech. Sci. vol.22 n.2 Campinas 2000, Print ISSN 0100-7386.
- [5] Z.Y. CHEN, S.Q. XU, X.H. DONG: Deformation Behavior of AA6063 Aluminium Alloy after Removing Friction effect under hot Working Conditions, Acta Metall. Sin.(Engl. Lett.)Vol.21 No.6 pp451-458 Dec. 2008.
- [6] E. TANAKA, S. SEMOTO, Y. SUZUKI: Effects of Lubricants on Compressive Deformation, The Research Institute for Iron, Steel and Other Metals, 1965.
- [7] HALBRITTER, E.: Modeling of Material Flow During Upsetting Between Parallel Pressure Plates, Hungarian Electronic Journal of Sciences, <http://heja.szif.hu/MET/MET-990617-A/met990617a/met990617a.html>, Széchenyi István University of Applied Sciences, ps. 11 Győr, Hungary , 1999.
- [8] TANCSICS F., DR. HALBRITTER E., KISS B.: Implified determination of Friction Coefficient by Upsetting, Műszaki Szemle különszám 2009, pp.384-387.
- [9] DR. HALBRITTER E., DR. SOLECKI L., TANCSICS F.: The Effect of the Pressing Plat's Surface Roughness on Sticking, Technical Review, pp. 155-159, Kolozsvár, 2008. ISSN 1454-0746.
- [10] LANGE, K.: Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 2, Massivumformung, Springer Verlag, Berlin, 1988.
- [11] BARTOŇ S., HŘEBÍČEK J.: Heat Flow Problems, in Solving Problems in Scientific Computing using MAPLE and MATLAB., edited by Gander W. & Hřebíček J., Springer, Berlin, Heidelberg, 2004, ISBN 3-540-21127-6, pp. 191-200.

An original determination and application of friction coefficient by using Pro/Engineer and MathCAD softwares.

In the process of research it became recognizable that the material stream coefficient /  $k$  / of the chosen kinematically regulated velocity field which results in barrelling shape can correlate with the Kudo friction coefficient. During upsetting the profile curve of barrelling shape of the working piece can be well approached by a polynomial of the second degree. This can be proved by measuring and correlation calculus. The factors of polynomial of the second degree can be determined by means of geometrical data which allows of the geometrical modelling of the upsetted working piece in 3D. Also analyzing the profile curve of barrelling shape of the working piece at the chosen velocity field it can be stated that the profile is describable by a polynomial of the second degree. The application of a chosen velocity field can be supported by this way as well.

The application of context  $m=1-k$  for approximate calculating of Kudo friction coefficient is suggested. A new method was presented for an efficient application of the context. Using this method connecting Pro/Engineer and MathCAD with each other has made a program for the calculation of Kudo friction coefficient and for modelling the expected 3D geometry of the upsetted working piece.

In the long run the construction method of working piece holder adapters have been developed with respect for the expected rate of friction coefficient. The original determination of friction coefficient and using this method at designing the pilot holder adapters have brought an adequate result.

The general applicability of this method needs more inspection.