10.15477/SZE.MMTDI.2013.004

Tancsics Ferenc

Virtuális kovácsolási technológiák alapvetően számítógéppel támogatott tervezési módszereinek továbbfejlesztése, gyakorlati implementációja

doktori értekezés

Témavezető:
Dr. Halbritter Ernő
Széchenyi István Egyetem

Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése
Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola
2013

10.15477/SZE.MMTDI.2013.004

A bemutatott kutatómunka a Széchenyi István Egyetem **JRET** *(Járműipari Regionális Egyetemi Tudásközpont)* kutatói és professzorai segítségével az **IJTTR** (*Integrált Járműipari Termék és Technológiafejlesztő Rendszerek)* (2005-2008) és az **NTP** (*Nemzeti Technológiai Program)* (2008-2012) projektek keretein belül valósult meg a **NIH** (*Nemzeti Innovációs Hivatal*) támogatásával.

10.15477/SZE.MMTDI.2013.004

Ezen értekezés a Széchenyi István Egyetem Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola Egyetemi Doktori Szabályzatában (EDSZ) leírtak szerint készült az **Informatikai Tudományok** tudományágában, PhD tudományos fokozat szerzése céljából.

Győr, 2013. június 27.

A jelölt aláírása

Tanúsítom, hogy **Tancsics Ferenc** doktor jelölt 2008-2013 között a fent megnevezett doktori iskola **Informatikai Tudományok** szakán irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult.
Az értekezés elfogadását javaslom.

Győr, 2013. június 27.

A témavezető aláírása

Tartalomjegyzék

Jelölések 6

1. Bevezetés 10

1.1. Motiváció, a kutatási téma aktualitása 10

1.2. Célkitűzés, kutatási célterületek 11

2. Előzmények 12

2.1. Melegalakító süllyeszték szerszámok kopásmechanizmusainak időszerű kutatási eredményei 12

2.2. A kopásvizsgálatokhoz kapcsolódó súrlódás-kutatások időszerű eredményei 16

2.3. A kovácsolási energia csökkentésére irányuló kutatások időszerű eredményei 20

2.4. Felhasznált eszközök 23

3. Új tudományos eredmények 25

3.1. Súrlódási tényező újszerű meghatározása egy kinematikailag megengedett sebességmező alapján 25

3.1.1. A hordósodás tribológiai és képlékenységtani alapösszefüggései 25

3.1.2. A hordósodó munkadarab profilgörbéjének közelítése másodfokú polinommal 29

3.1.3. A súrlódási tényező újszerű meghatározása egy lehetséges, kinematikailag megengedett sebességmező alapján 43

3.1.4. A matematikai modell alkalmazási korlátai 55

3.1.5. A matematikai modell algoritmusa 61

I. tézis 63

3.2. A matematikai modell megfogalmazása általánosabb alakban 63

II. tézis 68

3.3. Melegalakításnál használható új kopásvizsgálati eljárás fejlesztése 69

3.3.1. Kísérleti szerszámok kopáskép vizsgálata 69

3.3.2. Kopáskép vizsgálat a MathCAD program segítségével 75

3.3.3. A kopási lenyomat főbb paramétereinek meghatározása 86

3.3.4. A súrlódási és kopási tényezők kapcsolata 93

III. tézis 102

3.4. Közbenső alakok meghatározása a teljes kovácsolási energiaigény minimalizálására CAD-FVM környezetben 102

3.4.1. A térfogat-állandóság biztosítása korlátozott szélsőérték számítással 103

3.4.2. Kedvező felületű, állandó térfogatú modellek meghatározása az optimalizáló modul alkalmazásával 107
3.4.3. Az alakítási energia és kopásképek FVM analízise 111
3.4.4. Alakítási energia csökkentése térfogat és felület optimumok kombinációjával 118
IV. tézis 122
4. Összefoglalás, továbblépési lehetőségek 123
Irodalomjegyzék 125
A disszertáció eredményeinek rövid kivonata 135
Short abstract of the results of the thesis 137

Jelölések

A skalármennyiségek jelölésére a dőlt betűtípust (pl.: A, a), vektormennyiségek jelölésére a dőlt, irányított felülvonással ellátott kis- vagy nagybetűt (pl.: $\vec{v}$, $\vec{F}$), a tenzorok, mátrixok jelölésére dőlt kétszeres aláhúzással ellátott nagybetűt (pl.: $\underline{\underline{A}}$) használtam. Két vektor, vagy tenzor skaláris szorzását külön ponttal jelöltem (pl.: $\vec{v} \cdot \vec{u}$). Skalármennyiségeknél ez a művelet értelemszerűen elmaradt.

A disszertációban előforduló számozott összefüggések szövegkörnyezetében külön nem közöltem a jelölések magyarázatát.

Fontosabb matematikai jelölések és szimbólumok jegyzéke:

jelölés	**mértékegység**	**leírás**
A	[mm^2]	teljes érintkezési felület
dA	[mm^2]	elemi érintkezési felület
Ar	[mm^2]	felületi érdességet figyelembe vevő valós érintkezési (súrlódó) felület
b	-	deformációra jellemző faktor
C	[1/Pa]	energetikai kopási tényező
d_{max}	[mm]	hengeres próbatest legnagyobb zömített átmérője
d_{min}	[mm]	hengeres próbatest legkisebb zömített átmérője
d_{bmax}	[mm]	gyűrű alakú próbatest zömítés utáni legnagyobb belső átmérője
d_{bmin}	[mm]	gyűrű alakú próbatest zömítés utáni legkisebb belső átmérője
d_{kmax}	[mm]	gyűrű alakú próbatest zömítés utáni legnagyobb külső átmérője
d_{kmin}	[mm]	gyűrű alakú próbatest zömítés utáni legkisebb külső átmérője
D	[mm]	hengeres próbatest zömítés előtti átmérője
D_b	[mm]	gyűrű alakú próbatest zömítés előtti belső átmérője
D_k	[mm]	gyűrű alakú próbatest zömítés előtti külső átmérője
$\vec{F}$	[N]	erővektor
F	[N]	erővektor abszolút értéke
$\underline{\underline{F}}$	[N/mm^2]	feszültség tenzor
$\vec{F}_S$	[N]	súrlódási erővektor

Fs	[N]	súrlódási erővektor abszolút értéke
h	[mm]	próbatest zömített magassága
Δh	[mm]	zömített próbatest magasságcsökkenése
hn	[mm]	zömítési magasság az n. inkrementumban
h_S	[mm]	sorjahíd magassága
H	[mm]	próbatest zömítés előtti magassága
$\hat{H}$	[N/mm^2]	szerszámfelület folyáshatára a mért keménysége alapján
HBS	[N/mm^2]	szerszámfelület acélgolyóval mért Brinell keménysége
k	-	anyagáramlási tényező
k_f	[N/mm^2]	alakítási szilárdság
k_{f0}	[N/mm^2]	alakítási szilárdság kezdeti értéke (T=1000 °C, φ=0,1, $\dot{\varphi}$=10s^{-1})
K	-	fajlagos (dimenzió nélküli) kopási tényező
K_2	[N^2/mm^4]	feszültség deviátor tenzor második skalár invariánsa
K_T	-	hőmérséklet hatását kifejező faktor
K_φ	-	alakváltozás mértékét kifejező faktor
$K_{\dot{\varphi}}$	-	alakváltozás sebesség hatását kifejező faktor
dl	[mm]	elemi elmozdulás
m	-	*Kudo*-féle súrlódási tényező (szám)
$\vec{N}$	[N]	normál (felületre merőleges) erővektor
N	[N]	normál erővektor abszolút értéke
p	[N/mm^2]	pillanatnyi felületi nyomás
$p(r)$	[N/mm^2]	felületi nyomás függvény hengerkoordináta rendszerben
p_{max}	[N/mm^2]	legnagyobb felületi nyomás
p_{min}	[N/mm^2]	legkisebb felületi nyomás
P	[J/s]	deformáció teljesítményszükséglete
P_{ID}	[J/s]	deformáció tiszta teljesítményszükséglete
P_S	[J/s]	disszipációs (súrlódási) teljesítményszükséglet
r	[mm]	hengeres próbatest zömítés utáni elméleti sugara
Δr	[mm]	hengeres próbatest legnagyobb és legkisebb zömített sugarainak a különbsége

r_0	[mm]	hengeres próbatest letapadási határa
r_c	-	korrelációs együttható
r_{max}	[mm]	hengeres próbatest legnagyobb zömített sugara
r_{min}	[mm]	hengeres próbatest legkisebb zömített sugara
r_p	[mm]	pillanatnyi felületi nyomáshoz tartozó sugár
R	[mm]	hengeres próbatest zömítés előtti sugara
$\vec{R}$	[N/mm^2]	folyáshatár vektoriális alakban
$\vec{R}_P$	[N/mm^2]	egyezményes folyáshatár vektoriális alakban
s_{ij}	[N/mm^2]	feszültség deviátor tenzor mátrixa
t	[s]	idő
dt	[s]	elemi idő
Δt	[s]	időinkrementum
T	[°C]	hőmérséklet
$\underline{\underline{T}}$	[N/mm^2]	feszültség deviátor tenzor
u_r	[mm]	elmozdulás vektor sugárirányú koordináta függvénye
u_{rel}	[mm]	érintkező felületek relatív elmozdulása (abszolút érték)
v	[m/s]	lefelé mozgó (*-z irány*) szerszám sebességfüggvénye
$\vec{v}$	[m/s]	tömegpontok sebességvektora
dv/dh	[m^2/s^2]	*Newtoni*-folyadék sebesség-gradiense
dV	[mm^3]	deformált elemi térfogat
$\vec{w}$	[m/s]	tömegpontok sebességvektora hengerkoordináta rendszerben
w^*	[mm^3]	kopással levált anyagtérfogat
w_r	[m/s]	sebességvektor sugárirányú koordináta függvénye
w_z	[m/s]	sebességvektor tengelyirányú koordináta függvénye
w_{rel}	[m/s]	érintkező felületek relatív sebessége (abszolút érték)
Ws	[J]	súrlódási munka
z	[mm]	egyetlen zömítési ciklusra számított legnagyobb kopásmélység
$\bar{z}$	[mm]	mért legnagyobb kopásmélységek átlaga
z_1	[mm]	mért legnagyobb kopásmélységek átlaga egyetlen zömítési ciklusra

α_{PT}	[1/°C]	próbatest hőtágulási együtthatója ($12x10^{-6}$)
α_{SZ}	[1/°C]	szerszám hőtágulási együtthatója ($10,37x10^{-6}$)
γ	-	kenési együttható
δ	[mm]	legkisebb távolság a zömített munkadarab és szerszám kontúrjai között
δ_{ij}	-	*Kronecker* szimbólum
Δ	[mm]	matematikai modell profilpontja és a másodfokú polinom azonos koordinátapontja közötti eltérés
η	[Pas]	dinamikai viszkozitás
κ	[1/Pa]	kopási tényező
μ	-	*Coulomb*-féle súrlódási tényező
ς	[kg/m^3]	kontinuum sűrűsége
$\varsigma\vec{v}$	[kg/m^{2}s]	tömegáram
σ_0	[N/mm^2]	hidrosztatikus feszültség
σ_N	[N/mm^2]	normál (felületre merőleges) feszültség
σ_{ij}	[N/mm^2]	feszültség tenzor mátrixa
τ	[N/mm^2]	folyáshatár nyírófeszültsége
τ_p	[N/mm^2]	egyezményes folyáshatár nyírófeszültsége
τ_S	[N/mm^2]	súrlódási feszültség
χ	[%]	fajlagos hiba
∇	-	*Hamilton* operátor
$\dot{\varepsilon}_r$	[1/s]	sugárirányú alakváltozási sebesség koordináta függvénye
$\dot{\varepsilon}_z$	[1/s]	tengelyirányú alakváltozási sebesség koordináta függvénye
$\dot{\varepsilon}_\Theta$	[1/s]	szögtorzulási sebesség koordináta függvénye
$\dot{\varepsilon}_{ii}$	[1/s]	alakváltozási sebesség tenzor átlós mátrixa
$\dot{\varepsilon}_{ij}$	[1/s]	alakváltozási sebesség tenzor mátrixa
$\dot{\varepsilon}_{red}$	[1/s]	egyenértékű alakváltozási sebesség koordináta függvénye

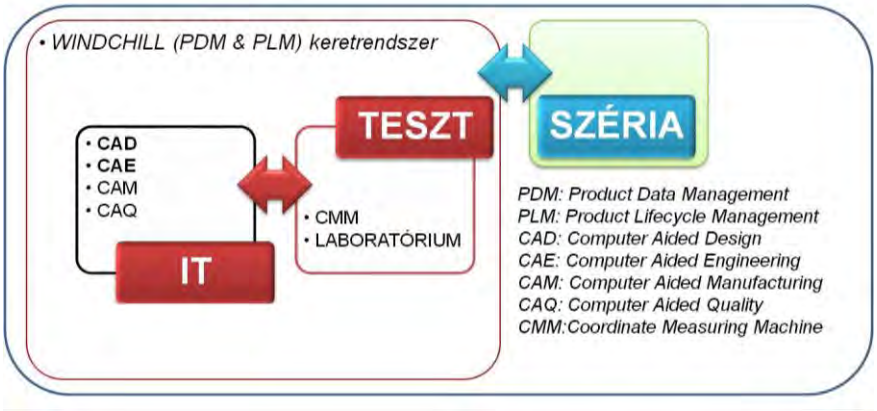
1. Bevezetés

1.1. Motiváció, a kutatási téma aktualitása

A magyar gazdaság egyik húzóágazata a járműipar. Járműalkatrészek gyártásánál gyakran alkalmazott térfogat-alakító eljárás a kovácsolás. A melegalakítási tartományban előállított versenyképes járműalkatrészek többsége nagy hozzáadott értékű, integrált, **NNS** (*Near Net Shape*) geometriai alakzat. A versenyképességet környezettudatos vállalati politikával, szűkebb értelemben vett tisztább termeléssel, értékáram (*Value Stream*) vezérelt folyamatokkal és az alkalmazott *high end* technológiák teljes gyártási vertikumra kiterjedő szinergiájával, tudományos megalapozottságával lehet biztosítani.

A Rába az ezredfordulón jelentős informatikai rendszerfejlesztést hajtott végre, lehetővé téve virtuális gyártási technológiák kifejlesztését és integrált alkalmazását. A rendszerfejlesztési folyamat résztvevőjeként nyilvánvaló volt számomra, hogy a kovácsolási technológia fejlett **IT** (*Information Technology*) rendszerekkel való támogatása kulcsfontosságú válasz a piaci kihívásokra, ezért kezdtem tanulmányozni a hagyományos, empirikus tervezési módszertan informatikai fejlesztési lehetőségeit.

Tanulmányaim során megismertem a virtuális tervezési módszereket illetve a virtuális tervezői megoldások alkalmazhatósági korlátait.



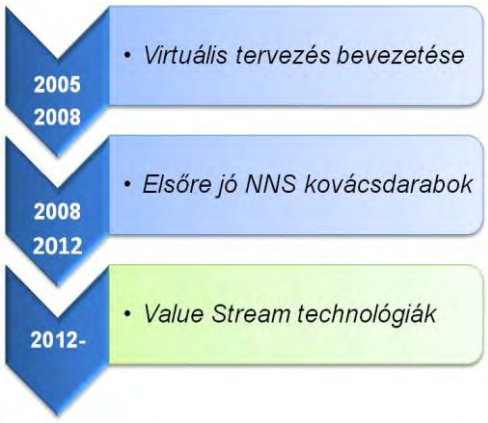
1. ábra: *A virtuális tervezői rendszer sematikus ábrája*

A kutatómunka eredményeként munkatársaimmal kidolgoztam a Rába informatikai rendszerére épülő virtuális tervezés módszertanát, és egy ISUZU portál tengelytest technológiai tervezésénél, sikerrel alkalmaztam (2005) (1. ábra).

További kutatásaimnak jelentős lökést adott és munkámat kiteljesítette a Széchenyi István Egyetem **JRET** *(Járműipari Regionális Egyetemi Tudásközpont)* kutatóival és professzoraival közös kutatómunka, melyet az **IJTTR** (*Integrált Járműipari Termék és Technológiafejlesztő Rendszerek)* (2005-2008) majd később az **NTP** (*Nemzeti Technológiai Program)* (2008-2012) projektek keretein belül végeztem.

1.2. Célkitűzés, kutatási célterületek

Az NTP projekt egy szűkebb tartománya képezte a **SZE MMTDI** (*Széchenyi István Egyetem Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola*) keretein belüli kutatómunkám területét. Munkám során kirajzolódott a technológiai tervezés fő fejlődési irányvonala (2. ábra), amely alapján megfogalmaztam kutatómunkám stratégiai célkitűzését, a kutatási célterületeket.



2. ábra: *A technológiai tervezés fő fejlődési iránya a Rábánál*

Stratégiai célkitűzésem: A kijelölt területeken olyan kutatási eredmények elérése, melyek hatékonyan integrálhatók egy komplex, virtuális technológiai tervezési rendszerbe, a rendszert megbízhatóbbá, pontosabbá és gyorsabbá teszik.

Kutatási célterületeknek a Rába európai üzleti politikája figyelembe vételével a többüreges kovácsolási és kovácshengerlési technológiákat választottam. Célkitűzésem kutatási részterületekre bontásakor kiemelten kezeltem a többüreges kovácsolási technológiákat a szélesebb körben érvényesíthető gazdasági és környezetpolitikai előnyök miatt. Az egyes részterületek konkrét feladatokra bontása éppen ezért a szerszámköltségek csökkentési lehetőségeire, az előredeformált munkadarabok geometriai vizsgálatára, az anyag- és energiatakarékos technológiai megoldásokra irányult.

2. Előzmények

2.1. Melegalakító süllyeszték szerszámok kopásmechanizmusainak időszerű kutatási eredményei

A szerszámozási költségek csökkentési lehetőségének vizsgálata, a szerszámélettartam pontos tervezhetőségének igénye elvezetett a kopásvizsgálatokhoz. Az alakadó szerszámfelületek kopási folyamatainak lassítási képessége mára jelentős tényezővé vált a kovácsiparban. Az alakadó felületelemek tönkremenetelét az agresszív mechanikus és termikus igénybevételek idézik elő. A folyamatot leíró állapotjellemzők bonyolult hatásmechanizmusa miatt többnyire speciálisan kezelhető (szűk tartományban érvényes) empirikus, numerikus, vagy **RE** (*Reverse Engineering*) módszerrel integrált numerikus megoldások állnak rendelkezésre.

A kopásmechanizmusok vizuális megjelenítésének elterjedt módszere a kopási térkép készítése, melyhez a szükséges adathalmazt többnyire *pin-on-disc* tribométeres vizsgálatokkal szolgáltatják. A részletes kopási térképek kétdimenziós metszetgörbéi alapján következtetnek a fajlagos kopási tényezőre [1]. A kopástérképek a mechanikus kopások (adhéziós, abráziós), a termikus kopások (különböző halmazállapotú felületi oxid rétegek koptató hatása) valamint a letapadási tartomány jól elkülöníthető fázishatárai közötti kapcsolatokat ábrázolják különböző részletességgel.

A kopási térképek átfogó, tribológiai szempontok szerinti rendszerezése *Lim* nevéhez fűződik (1998) [40]. Napjainkban a kopástérképek fejlettebb *Lewis-Olofsson* rendszerű, véges-elemes változatai használatosak (2004) [38].

Stahlberg és *Hallström* vizsgálatai (1999) rámutattak arra, hogy a szerszám tönkremenetelek 70%-a az alakadó felületek kopása, 25%-a a mechanikus kifáradás, 5%-a a képlékeny deformáció és hőkifáradás együttes hatása miatt következik be [65]. Ebből kiindulva egyszerű *ABC* elemzést végezve (az ismert *Pareto*-elv kiterjesztése) könnyen belátható, hogy költségmegtakarítás szempontjából kulcsfontosságú jelentősége a mechanikus kopásoknak van.

A mechanikus kopási folyamatok numerikus feldolgozásra is alkalmas matematikai leírását először *Archard* publikálta 1953-ban [5]. Feltételezte, hogy a kopással leválasztott anyag térfogata elsősorban az érintkező felületekre ható kontakt

nyomáseloszlás és a felületelemek relatív elmozdulásával valamint egy, a szerszámfelületek keménységét jellemző kopási együtthatóval arányos.

Ugyanezt a problémát 1965-ben *Matveesky* energetikai oldalról közelítette meg [44]. Az új energetikai kopásmodell arányosságot tételezett fel a kopással levált anyag térfogata és az elmozduló felületek között fellépő súrlódási energia valamint egy, az érintkező felületek kapcsolatára jellemző tényező között.

Az Archard féle dimenzió nélküli kopási együttható és a pin-on-disc tribométeres vizsgálattal meghatározott kopási tényező között a kapcsolatot *Podra* és *Andersson* határozták meg (1999) [51], lehetővé téve az elméleti modell **CAE** (*Computer Aided Engineering*) eszközökkel való pontosítását.

Pin-on-disc vizsgálatok eredményeit rendszerező tanulmányt elsőként *Masen* (2004) készített az Archard-féle kopásmodell különböző változatai felhasználásával [45]. Hasonló, rendszerelvű vizsgálatokat az energetikai modell fejlettebb változataival *Ramalho* és *Miranda* végeztek. (2006) [54].

Számos tanulmány foglalkozott és foglalkozik napjainkban is részletesen azzal, hogy milyen elméleti megközelítés [88] és mechanikus kopási modell használható a kopási tényezők matematikai közelítésére.

Napjainkban használatos Archard és energetikai kopásmodellek numerikus összehasonlító elemzését - forgásszimmetrikus kovácsdarab melegalakító szerszámainak kopási profilgörbéire - *Zamani* és *Biglari* készítették el (2005). A vizsgálathoz *MSC Superforge* szoftvert használtak. A numerikus megoldások közel azonos eredményre vezettek [87].

A süllyeszték szerszám felületi határrétegei az ismétlődő mechanikus és termikus igénybevételek hatására időtől és terhelési ciklustól függően diffúziósan átalakulnak. Ez a folyamat szintén hatással van a szerszám alakadó felületeinek a kopására.

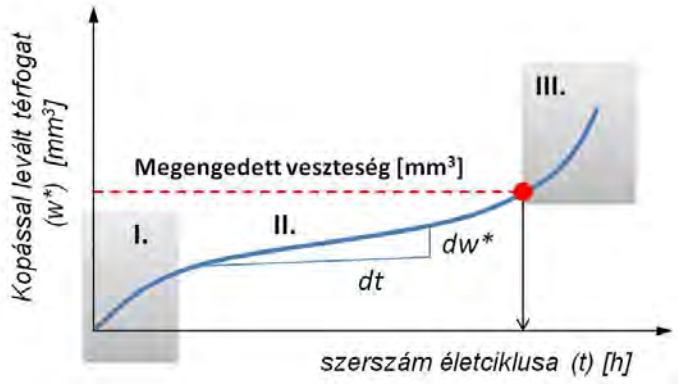
Barrau és munkatársai 20°C-1000°C hőmérséklet tartományban végeztek pin-on-disc kísérleteket (2002), **SEM** (*Scanning Electron Microscopy*) és **EDS** (*Energy Dispersive Spectrometry*) módszerekkel vizsgálták a szerszámfelületen lejátszódó kopási mechanizmusokat. Megállapították, hogy a szerszámok felületi oxidációs átalakulásai jelentős befolyással vannak a szerszámfelület súrlódási és kopási folyamataira. A szerszámfelületeken megjelenő megeresztett martenzit kialakulása felerősíti az abrazív kopási folyamatokat és kedvez a felületi deformációnak, kifáradásnak [7].

Behrens és *Schäfer* a diffúziós folyamatok figyelembe vételével pontosították (2008) az ismertetett kopási modelleket [9]. A pontosítás lehetőséget nyújt a mechanikus kopás és a felületi kilágyulás okozta deformáció elkülönítésére, illetve kopásvizsgálatok során a kilágyulási pontok elkerülésére.

A felületi rétegek diffúziós átalakulásai, a nagy nyomáson működő speciális termikus viszonyok valamint a munkadarab felületébe beágyazódott eltérő keménységű revecsomók speciális koptató hatását a pin-on-disc vizsgálatok korlátozott feltételekkel vehetik figyelembe. Az így meghatározott kopási együtthatók a szerszámüreg metszeti profilgörbéi mentén jelentősen eltérhetnek a kovácsolás során működő kopási együtthatóktól. A kopási tényezők meghatározásához minden esetben szükség van utólagos **CMM** (*Coordinate Measuring Machine*) vizsgálatokra [1][48].

A szerszámok kopási folyamata a szerszám életciklus görbéje alapján kisebb-nagyobb hangsúlybeli eltolódásokkal mindig három részből áll [1]:

- *kezdeti kopás* szakasza (I.), amely a szerszám „bekopása”,
- *állandósult kopás* szakasza (II.), viszonylag egyenletes, kis anyagveszteség,
- *túlkopás* szakasza (III.), rövid idő (a szerszám életciklusához viszonyítva) alatt hirtelen megnövő anyagveszteség, (3. ábra).



3. ábra: *A szerszám életciklusa különböző felülettípusok esetén*

Általános törekvés a kopási görbe degresszív tartományának időbeli kitolása, azaz a kopási sebesség (*dw*/dt*) alacsony szinten tartása. Ennek egyik lehetséges megoldása a hőkezelt szerszámok alakadó felületelemeinek kopásálló réteggel történő bevonása, melyre számos megoldás kínálkozik.

A legmodernebb megoldások egyikét a néhány mikron vastagságú (*4-6 μm*) **PVD** (*Physical Vapour Deposition*) vagy magyarul **FGB** (*Fizikai Gőzfázisú Bevonás*) bevonatok alkalmazása jelenti.

A *Rába* az IJTTR és az NTP projektek során, a világon elsők között kísérletezett PVD bevonattal ellátott Q10 melegfolyató és NK2 melegalakító süllyeszték szerszámokkal (2005-2012). A kísérletek célja egyrészt különböző összetételű bevonatok (*CrVN, nACRo®, ALCRONA PRO®*) szerszámélettartamot növelő hatásának vizsgálata, másrészt a gazdaságos alkalmazhatóság eldöntését segítő összehasonlító módszer kidolgozása volt [70][71].

Ko és *Kim* 2002-ben publikálta *Ti-N* PVD bevonattal ellátott szerszámok kopási tényezőjének numerikus meghatározására vonatkozó eredményeit. A tribológiai kísérleteket pin-on-disc módszerrel végezték el és a kapott kopási tényezőket használták fel **FEM** (*Finite Element Method*) analízishez, lyukasztótüskék kopásvizsgálatánál. A vizsgálat során kimutatták a hagyományos és PVD bevonattal ellátott szerszámfelületek közötti élettartam különbséget és a PVD bevonat tönkremeneteli ciklusait [35].

Tillmann és kutatócsapata Ti (*TiAlN*) és Cr (*CrAlN*) alapú PVD bevonatok viselkedését vizsgálta melegalakítási körülmények között (2008). A nitrid rétegvastagság függvényében, meghatározták a képlékeny deformáció szempontjából fontos alaprétegeket, rétegvastagságokat, valamint összehasonlították a különböző alaprétegű bevonatok súrlódási és kopási tényezőit. Megállapították továbbá, hogy 400 °C hőmérsékletig a bevonattal ellátott szerszámok felületi keménysége állandónak tekinthető [80]. Korábban, nemesített szerszámfelületek vizsgálatánál *Behrens* és *Schäfer* jutottak hasonló (450 °C) következtetésre [9].

Rubiniec és *Adamiak* Cr-N PVD bevonattal kombinált *plazma-nitridált* felületű melegalakító szerszámacélok kopással szembeni ellenállását vizsgálták. A vizsgálatokat pin-on-disc módszerrel szobahőmérsékleten, és emelt (500 °C) hőmérsékleten (2008) is elvégezték. Megállapították, hogy a kombinált megoldás jó kémiai kötésű felületi réteget biztosít. A mérések alátámasztották az új fedőréteg magasabb kopással szembeni ellenállását [58].

Napjainkban a melegalakító szerszámfelületek PVD bevonatai alapösszetételükben (milyen fémionok kerülnek felvitelre) nem változtak, a magas termikus és kopással szembeni ellenállás elérése érdekében a mátrix struktúra és a duplex rétegstruktúra irányába fejlődnek [57].

2.2. A kopásvizsgálatokhoz kapcsolódó súrlódás-kutatások időszerű eredményei

A kopásvizsgálatok fontos eleme a szerszám és munkadarab felületi rétegei közötti relatív elmozdulás és nyomáseloszlás vizsgálata. Kovácsolás szempontjából az adott nyomáseloszláshoz tartozó felületi rétegek mozgása, azaz a szerszám felületéhez közeli anyagáramlás, a legnagyobb kopásnak kitett felületelem meghatározása kulcsfontosságú a felületi gyűrődések kialakulása szempontjából (4. ábra).

4. ábra: *A szerszám felületi kopása által előidézett gyűrődés a kovácsdarabon*

A szerszám és munkadarab felületi rétegei közötti relatív elmozdulást az elmozdulás-mezők írják le. Az elmozdulás-mezők numerikus meghatározásához megkerülhetetlen a súrlódási tényező ismerete. A súrlódás akadályozza a felületi rétegek elmozdulását, hatással van a kovácsolási folyamat stabilitására.

Repalle és *Grandhi* kutatási eredményei szerint a kovácsolási folyamatok stabilitását homogén hőeloszlás esetén a súrlódási tényező jelentős mértékben befolyásolja (2005) [55].

A súrlódási tényező klasszikus, kovácsüzemekben is használatos zömítő-vizsgálatokon alapuló meghatározási módszerei két alapvető irányvonalat követnek.

Az egyik meghatározó irányvonal erőmérésen alapul, melynek alapvetéseit *Siebel* dolgozta ki. Egytengelyű feszültségállapot kísérleti előállítása közben vizsgálta a csúszási síkok helyzetét. Megállapította, hogy a legnagyobb csúsztatófeszültségek geometriai helyei körök, melyek átmennek a nyomószerszám végpontjain. Kapcsolatot mutatott ki a csúszási síkok terhelési iránnyal bezárt szögei és a súrlódási tényező között (1932) [60]. Alapvetéseit később a prizmatikus rudat terhelő nyomáseloszlás meghatározásánál *Geleji* ültette át a mérnöki gyakorlatban is használható, napjainkban ismert összefüggésekre (1967) [20].

A másik meghatározó irányvonal deformáció méréseken alapul, alapvetéseinek kidolgozása *Burgdorf* (1967) nevéhez fűződik, lényegi magyarázatára később kerül sor [12].

A súrlódási tényező zömítő-vizsgálattal történő meghatározási módszereinek egyik korai tribológiai összefoglalását *Horlacher* készítette el. Munkájában rendszerezte és jellemezte az erő- és deformációmérésen alapuló legismertebb eljárásokat (1989) [31].

A súrlódási tényező pillanatnyi értékének meghatározása - az anyagáramlási feszültségek egyenlőtlen eloszlása, a kenőanyagok paraméterfüggő hatásmechanizmusai, a termikus viszonyok egyensúlyi állapot körüli ingadozásai, mérési bizonytalanságok - miatt rendkívül bonyolult, ezért elfogadott közelítés, ha *állandósult (konstans)* értékével számolunk. Ezt a megállapítást erősítik a magas hőmérsékleten elvégzett tribológiai vizsgálatok eredményei is [84][8].

A második ezredfordulót követően, a numerikus módszerek gyors elterjedésével számos elméleti módszer született a konstans súrlódási tényező pontosabb meghatározására. Elterjedten alkalmazottak a sokszínű **UBET** (*Upper Bound Element Technique*) technikák **FEM** (*Finite Element Method*) módszerekkel kapcsolt változatai. Ezekkel a módszerekkel jellemzően a deformálódott geometria és a konstans súrlódási tényező közötti matematikai összefüggések írhatók le.

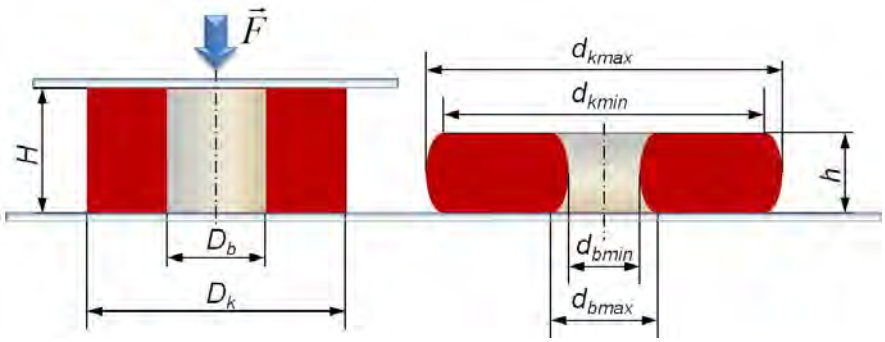
A hideg- és melegalakítás fizikai modellezéséhez a gyűrűzömítést [61][3], vagy egyszerű tömör hengeres test zömítését [18][3] alkalmazzák. A hidegalakítás fizikai modellezése többnyire ikerfolyatásos [13][3] és tüskefolyató [15] vizsgálatokkal történik.

A numerikus módszerek diszkretizált függvényeket használnak, ezért pontosságuknak határt szabhat a diszkretizálás szakszerűsége, a hardware teljesítménye, az alkalmazott FEM csomag [11][30].

A konstans súrlódási tényező meghatározható **ANN** (*Artificial Neural Network*) és FEM kapcsolt alkalmazásával is. Fizikai modellként tömör hengeres test zömítését szokás alkalmazni. Az ANN módszerek meghatározott algoritmus szerint az input adatok olyan kombinációit hozzák létre, melyek optimalizált hordósodott geometriát leíró függvényekhez vezetnek [42].

Napjainkban a meghatározó, melegalakítás modellezésére alkalmas eljárások az alábbi deformációs méréseken alapulnak:

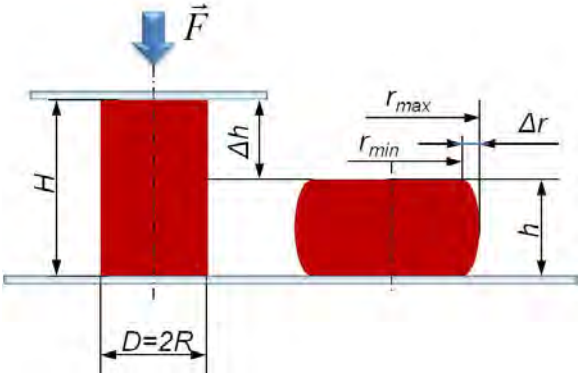
- **RCT** (*Ring Compression Test*), a klasszikus és legelterjedtebben alkalmazott *Burgdorf*-féle gyűrűzömítő eljárás [12][61] (5. ábra).



5. ábra: *A gyűrűzömítő vizsgálat elvi vázlata*

A zömítési magasság (h) és a belső átmérők (d_{min} - d_{max}) (érzékenyebb a deformációra) függvényében lehet meghatározni a súrlódási tényezőt egy nomogram (görbesereg) felhasználásával. Ilyen görbesereg látható a 25. ábrán. Ha a belső átmérők azonosak, azaz $d_{min}=d_{max}$, akkor a súrlódási tényező, $\mu=0$ $(m=0)$.

- **SU** (*Simple Upsetting*), síklapok közötti zömítés (6. ábra). Célszerűen választott hengeres (D) próbatestet H magasságról meghatározott h magasságra zömítenek. A súrlódási tényező arányos a hordósodással. A hordósodás mértékét deformációs faktorral (b) jellemzik: $b=4[(\Delta r/r)(h/\Delta h)]$ [39]. A súrlódási tényező a térfogat-állandóság törvénye felhasználásával a kiinduló geometria és a (b) faktor ismeretében meghatározható [18]. Ha $r_{min.}=r_{max.}$, akkor a próbatest megőrzi hengeres alakját, azaz $m=0$, $b=0$.



6. ábra: *A síklapok közötti zömítő vizsgálat elvi vázlata*

Han gyűrűzömítő (RCT) kísérletekkel kimutatta, hogy a deformációs vizsgálatok eredményét, a konstans súrlódási tényező meghatározási pontosságát az anyagszerkezet inhomogenitása, a hidegalakítási textúra jelentősen befolyásolja (2002) [29].

Narayanan és munkatársai, tömör hengeres testen (SU) végeztek hasonló vizsgálatokat, mint Han. A vizsgálat során kísérletet tettek a térbeli anizotrópia, a hidegalakítási textúra hatásának FEM (*Deform 3.0*) módszerrel történő leírására (2008) [47].

A fenti vizsgálatok közös jellemzője a hidegalakítási hőmérséklet tartomány és a jól alakítható próbatest alapanyag (többnyire alumínium ötvözet) megválasztása.

Li, *Onodera* és *Chiba* végezték el az első átfogó kísérletet hypoeutektoidos acél melegalakítási hőmérsékletén a Kudo-féle súrlódási szám konstans értékének meghatározására. A kísérleti eredmények alapján a SU matematikai modellel meghatározható konstans Kudo-féle súrlódási szám numerikus pontosítását javasolták (2010) [39].

Kutatásaim során a súrlódási tényezőt a lágyacélok kovácsolási hőmérséklet-tartományában (1050°C-1150°C), üzemi körülmények között kellett jó közelítéssel meghatározni. A célra hengeres próbadarab síklapok közötti zömítését (SU) választottam. A hengeres munkadarab párhuzamos nyomólapok között végzett zömítése klasszikus képlékenyalakítási feladat. Ismert, hogy a párhuzamos nyomólapok között végzett zömítésnél a munkadarab hordósodása szoros összefüggésben van a súrlódási tényező értékével.

A fizikai modell további előnye, hogy jól reprezentálja az elemi kovácsolásnál lejátszódó kopási viszonyokat is [78]. A melegalakítási hőmérséklet tartományában bizonytalansági tényezőkkel - termikus kölcsönhatások (inhomogén hőeloszlás), revésedés, az anyag szerkezeti átalakulásai - kell számolnunk. Ezek a bizonytalanságok hatással vannak zömítéskor a szerszám és munkadarab érintkező felületei között kialakuló tapadási tartományokra (letapadás jelensége) [26][39].

Valós alakváltozás folyamán a melegalakítási hőmérséklet tartományában változó kiterjedésű letapadás is felléphet. A jelenség következtében a hordós palástfelület és a sík homlokfelület (szerszámmal érintkező felület) változó sugarú lekerekítéssel is kapcsolódhat. Ez a jelenség azt eredményezi, hogy a minimális hordósodott sugár (r_{min}) meghatározása melegalakításkor problémába ütközik [72][46].

Melegalakítási tartományban végzett RCT és SU kísérletek során, a hordósodott geometria fenti jelenség okozta mérési problémáira világítottak rá *Shahriari* és kutatótársainak vizsgálati eredményei is (2011) [59].

További problémát jelent, hogy a bemutatott módszerek jelenlegi alkalmazási formái a hordósodás közvetlen **CAD** (*Computer Aided Design*) rendszeren belüli tervezhetőségéhez nem adnak kellő hatékonysággal felhasználható információt.

A súrlódási tényező kísérleti meghatározásánál tehát olyan módszer kidolgozására törekedtem, ami minimális előkészülettel elvégezhető, ami nem igényel külön gyártási költséget, ami elősegíti az előzetes célkitűzések mind szélesebb körű megvalósítását. A kiértékeléshez szükség volt egy olyan matematikai modell létrehozására, amely egyszerűen kezelhető input adatok megadásával lehetővé teszi a súrlódási tényező gyors, a mérnöki gyakorlat számára megfelelően pontos meghatározását, a CAD geometria közvetlen leképezését és kopásvizsgálatnál is felhasználható. Ehhez alapvetően analitikus módszert választottam [69]. Az analitikus modellnél, egy olyan kinematikailag megengedett sebességmezőt használtam fel, amellyel a valóságos deformáció igazoltan jól megközelíthető [23][73].

A zömítés matematikai modellezésénél a választott kinematikailag megengedett sebességmező a kontinuum minden pontjára érvényes, de csak egy elemi magasságcsökkenés esetén. A teljes alakítási folyamat matematikailag, *egymásra épülő elmozdulásokkal*, numerikusan jól modellezhető.

2.3. A kovácsolási energia csökkentésére irányuló kutatások időszerű eredményei

Az energiatakarékos, virtuális tervezői rendszerbe jól illeszthető többüreges kovácsolási technológiák alapvető igénye a megfelelő anyagáramlási mechanizmus biztosítása [28]. A szerszám alakadó felületén elmozduló rétegek helyes áramlását azonban nem csak a kopási mechanizmus, hanem az üreg geometriai felépítése (kovácsdarab alakja, felülete, térfogata) is befolyásolja. Az üreg geometriai vizsgálatánál a kovácsolási folyamat statisztikai állandósága, azaz stabilitása feltételezhető, az üregtöltést legjobban befolyásoló tényezők változása időben konstansnak tekinthető (termikus viszonyok, kenőanyag, alapanyag geometria, üregtöltő kényszerek, alakítógép pontossága, szerszám alakadó felületi rétegei).

A kovácsolási energia teljesítmény csökkentésének egy lehetséges módja az üregek geometriai optimalizálása. Az optimalizálás egy szélsőérték számítási feladat, matematikai értelemben egy vagy többváltozós függvény szélsőérték helyének és nagyságának a meghatározása. Az optimalizálás mindig csak a melegalakítási tartományban kovácsolt alkatrészek méret- és alaktűrésének, valamint a gyártósorra jellemző folyamatstabilitásnak a figyelembevételével végezhető el.

Többüregű süllyesztékes kovácsolásnál a szerszámüreg geometriai optimalizálására a szerszámüreg kopási viszonyainak, a súrlódási tényezők vizsgálati módszereinek fejlődésével egyidejűleg az utóbbi másfél évtizedben számos, a tudománynak új irányvonalat adó megoldás született.

Takematsu, Altan és munkatársai FEM (*Deform 2.0*) és **RE** (*Reverse Engineering*) kapcsolt alkalmazásán alapuló anyagkihozatal optimalizálási lehetőségeit vizsgálták egy hajtókar kovácsdarab üregtöltési viszonyainak modellezése során. Kidolgozták és bemutatták egy anyagtakarékos készre kovácsolást eredményező elméleti előgyártmány geometria meghatározási módját (1996) [66].

Biglari, O'Dowd és Fenner többüregű süllyesztékes kovácsolásnál a szerszámgeometriát optimalizálták az anyagáramlás disszipációs energiavesztéségének csökkentésére, FEM és **FA** (*Fuzzy Algorithm*) kapcsolt alkalmazásával. Inverz technikával modellezték az üregtöltést, a node pontok mozgását fuzzy algoritmus vezérelte. A megoldást egyszerű geometriájú kovácsdaraboknál megfelelő pontossággal alkalmazták. A pontosságot a peremfeltételek helyes megadása jelentősen befolyásolja. Az energetikai kopási modell alkalmazásakor figyelembe vették az üregméretek megengedett eltéréseit is. (1998) [10].

Halbritter, Molnárka az UBET és a **MAPLE** algoritmus alkalmazásával hengerszimmetrikus szerszámüregnél egy független paraméter bevezetésével optimalizálta a szerszámprofil görbéjét az alakítási teljesítményszükséglet minimalizálásával. A variációs módszerrel meghatározott anyagáramlási sebességmezőnél a tengelyirányú sebesség-komponens a súrlódási tényező értékétől függően parabolikusan változott (1999) [25].

Srikanth, Zabaras a **CSA** (*Continuum Sensitivity Analysis*) módszerrel felület közeli kontinuumok mozgását befolyásoló tényezők deformációra gyakorolt hatását vizsgálták, különböző konfigurációban. Az érzékenység vizsgálatára létrehoztak egy algoritmust, mellyel az **FDM** (*Finite Deformation Method*) és **DDM** (*Direct Deformation Method*) módszerekkel leírható alakváltozások összehasonlító vizsgálatán

keresztül csökkentették a **CPU** (*Central Processing Unit*) műveleti igényeket (2000) [63].

Antonio, Dourado FEM és **GA** (*Genetic Algorithm*) módszereket kapcsoltak össze és kihasználva a GA sajátosságát - konvergál az optimumhoz - olyan célfüggvényeket kerestek melyek alkalmasak a kovácsolási folyamatot egy összetett paraméter rendszer alapján optimalizálni. Az optimalizáló algoritmusnál inverz matematikai eljárást alkalmaztak (2001) [4]. Az eljárást később *Antonio* és munkatársai tovább fejlesztették UBET összefüggéseket alkalmazó önálló GA algoritmus alkalmazására (2006) [52].

Tomov és *Radev* RE segítségével egy geometriai komplexitást jellemző faktort **SCF** (*Shape Complexity Factor*) határoztak meg, melynek segítségével az előalakítások száma optimalizálható. Az eljárás FEM módszerrel kiegészítve komplex optimalizálási lehetőséget biztosít (2004) [82].

Thiyagarajan, Grandhi a FEM és **RBT** (*Reduced Basis Technique*) módszereket integráltan alkalmazta többüreges süllyesztékes előalakok tömeg-optimalizálására. Az új algoritmussal a lehetséges felületkombinációk közül iteratív módon azt választották ki, amely a lehető legegyszerűbb és megfelelő üregtöltést biztosít készre kovácsoláskor. A módszert sikerrel alkalmazták egy irányzókar kovácsdarabon (2005) [79].

Yanhui és munkatársai FEM (*Deform 2D*) és **RSM** (*Response Surface Method*) integrálásával optimalizálták egy hengeres zömített munkadarab szerszámmal érintkező felületének előalakját. Az eljárás folyamán egyszerű összefüggéseket használva a szerszámüreg geometria optimális kombinációit határozták meg a folyamatjellemzők legvalószínűbb kombinációira. Az új előalakító szerszámfelülettel az alakváltozások homogenitása 88,05% volt a készüreg teljes térfogatában, teljes kitöltöttség mellett (2008) [86].

Castro, Antonio és *Sousa* FEM és GA módszerekkel kimutatták a komplex kovácsolási folyamat bizonytalanságát meghatározó változók költségekre és minőségre gyakorolt hatását. A vizsgálatnak összetettsége miatt inkább tudományos értéke van. Jelentősen hozzájárul a kész kovácsdarab végső geometriáját és minőségét meghatározó folyamatok megértéséhez, felhívja a figyelmet az optimalizálási módszereknél alkalmazható fizikai korlátokra (2008) [14].

Jolgaf és munkatársai **IE** (*Inverse Engineering*) és FEM (*ANSYS*) módszerekkel a kiinduló buga geometriáját optimalizálták az alakítási energia és erőszükséglet minimalizálása érdekében [33] (2008).

A megoldások közös jellemzője, hogy **DOE** (*Design Of Experiment*) modellből indulnak ki, azaz a *re-engineering* módszerét alkalmazzák, ami az optimalizációt piaci léptékkel időigényessé teszi. Jobb megoldásnak mutatkozik a közvetlen tervezői folyamatba beépíthető optimalizálás.

Jhala és munkatársai CAD (*Pro/E WildFire 2*) környezetben *közvetlenül* végezték el egy integrált tengelycsukló konstrukciós optimalizálását. Az optimalizáló algoritmus a célfüggvényeket (anyag- és megmunkálási költségek minimalizálása, maximális élettartam) vetette össze a konstrukciós változókkal (anyag, geometria, megmunkálási folyamat) és kereste az optimumot. Az optimális geometriát FEM vizsgálattal minősítették élettartamra (2010) [32].

Kapcsolódva a közvetlen optimalizációt előtérbe helyező irányvonalhoz, a többüreges kovácsolás optimalizálási vizsgálataimnál a mérnöki tervezői rendszerekkel jól kezelhető dinamikus programozási elveket alkalmaztam. A fokozatos alakadású többüregű süllyesztékes kovácsolás alapelvét követve, a szerszámkopások és az alakítás energiaszükségletének csökkentését *közvetlen CAD–CAE környezetben* végeztem el, többváltozós, korlátozott szélsőérték számítással. Az optimalizálás során figyelembe vehető a térfogat-állandóságon kívül a közbenső alakok felületének nagysága is, ezzel hatékony módszer biztosítható az azonos térfogatú, eltérő méretkombinációjú előalakok minősítésére.

2.4. Felhasznált eszközök

A fizikai kísérletek elvégzéséhez, kiértékeléséhez a rendelkezésre álló eszközök széles körét vettem igénybe:

- A profilgörbék (hordósodás) matematikai értékelése a MAPLE és MathCAD programok, az új algoritmusok tesztelése pedig a Pro/Engineer, AutoCAD CAD rendszerek és MathCAD kapcsolt alkalmazásával történt [69][72].
- A kísérleti eredmények és az új algoritmusok numerikus igazolására alapvetően Simufact 11.0 **FVM** *(Finite Volume Method)* szoftvert használtam [70][71].
- A munkadarab felületi hőeloszlásának, hőmérsékletének elemzését nagyfelbontású VarioCAM hőkamerával végeztem el [71] [78],

- A zömített próbatestekről és a gyártási folyamat mintáiról digitális felvételek készültek. A képkiértékeléseket MathCAD matematikai, valamint AutoCAD/AutoLISP CAD szoftverek segítségével végeztem el [73] [78],
- Az eredmények kiértékelésénél felhasználtam a Széchenyi István Egyetem **GOM** *(General Outcome Measurement)* optikai digitalizáló és Mahr PMC 800 **CMM** *(Coordinate Measuring Machine)* berendezésein mért adatokat [72][78].
- A mintadarabok melegzömítési kísérletei 10 MN nyomóerejű LASCO-III típusú elektro-olajhidraulikus melegfolyató-sajtón (7. ábra), 25 MN és 40 MN nyomóerejű MAXIMA kovácssajtókon történtek [70][78][76][72].

7. ábra: *Lasco-III melegfolyató-sajtó*

3. Új tudományos eredmények

3.1. Súrlódási tényező újszerű meghatározása egy kinematikailag megengedett sebességmező alapján

A RÁBA Futómű Kft-nél a kovácsdarabok többségét többüregű süllyesztékes kovácsolással állítják elő (8. ábra).

8. ábra: *Egy süllyesztékben kovácsolt egyszerű geometria alakítási fázisai*

A párhuzamos nyomólapok között végzett zömítésnél (8. ábra első alakadó művelete) a munkadarab és a nyomólapok érintkezésénél jelentős súrlódás lép fel, ami a munkadarab szabad szélesedését akadályozza, és ennek következtében a munkadarab palástfelülete hordó alakot vesz fel.

3.1.1. A hordósodás tribológiai és képlékenységtani alapösszefüggései

A hordósodás kialakulásának megértéséhez szükséges néhány tribológiai összefüggés áttekintése. A képlékenyalakító technológiák súrlódási mechanizmusai alapvetően a Coulomb- és Kudo-féle súrlódási modellekkel írhatók le.

Kis felületi nyomások esetén az elmozdulás az érdességcsúcsokon megy végbe. Ilyen érdességcsúcsok alkotta felület az *Ar* súrlódó felület. Kis felületi nyomással járó alakításoknál ez a felület figyelmen kívül hagyható. A mechanizmust a Coulomb-féle súrlódási modell írja le, melynek matematikai alakja:

$$\mu = \frac{\vec{F}_S}{\vec{N}} = \frac{\tau_S}{\sigma_N}. \tag{1}$$

A Coulomb-féle súrlódási tényező értelmezési tartománya: $0 \leq \mu \leq 0{,}577$ **HMH** *(Huber-Mieses-Hencky*) illetve $0 \leq \mu \leq 0{,}5$ **MT** (*Mohr-Tresca*) összefüggései szerint.

Nagy felületi nyomásokat igénylő alakító műveleteknél az *Ar* súrlódó felületek nagysága már nem hagyható figyelmen kívül. Az érintkező felületek kiálló érdesség-csúcsain a nagy nyomás következtében helyi összehegedések jönnek létre, melyeket a két felület elcsúszása során el kell nyírni. Az elmozdulás a felület alatti rétegekben következik be a lágyabbik anyag folyáshatárán az anyag folyását előidéző csúsztató feszültség hatására [22]. Ezt a súrlódási mechanizmust a Kudo-féle súrlódási modell írja le.

$$m = \frac{\vec{F}_S}{\vec{R}} = \frac{\tau_S}{\tau}. \tag{2}$$

A Kudo-féle súrlódási szám (továbbiakban súrlódási tényező) értelmezési tartománya: $0 \leq m \leq 1$. A Kudo-féle súrlódási modell esetén figyelembe kell venni az anyagban meginduló képlékeny alakváltozást kiváltó folyási feszültséget. Egytengelyű feszültségállapotban, zömítésnél a feszültségtenzor:

$$\underline{\underline{F}} = \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \tag{3}$$

A hidrosztatikai feszültségállapot figyelembe vételével a deviátorfeszültség a következő módon adódik:

$$\underline{\underline{T}} = s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_0 \cdot \delta_{ij} = \frac{\sigma_3}{3} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

A feszültségdeviátor tenzor második skalár invariánsa:

$$K_2 = \frac{1}{2}\left(s_1^2 + s_2^2 + s_3^2\right) = \frac{1}{2} s_{ij} \cdot s_{ij}. \tag{5}$$

A (4) összefüggést behelyettesítve az (5) összefüggésbe valamint felhasználva, hogy egytengelyű feszültségállapotban $|\sigma_3| = k_f$, kapjuk:

$$K_2 = \frac{1}{2} s_{ij} \cdot s_{ij} = \frac{1}{2} \frac{k_f^2}{9} (1 + 1 + 4) = \frac{k_f^2}{3}. \tag{6}$$

A folyási feszültség elérésekor a zömítő próbatest minden krisztallitjában megindul a képlékeny alakváltozás. Az acélanyagok többnyire nem rendelkeznek (lágyacélok kivételével) jól definiálható folyáshatárral, ezért a folyási feszültség jellemzésére elfogadott a terhelt állapotban mérhető folyáshatár, amely fizikai tartalmában azonos az anyag folyását előidéző csúsztató feszültséggel. A HMH szerinti folyási feltétel általános alakja a feszültségdeviátor tenzor második skalár invariánsa és a folyást előidéző csúsztatófeszültség függvényében:

$$f = K_2 - \tau_p^2 = 0\,. \tag{7}$$

A (7) összefüggésből következik:

$$\tau_p^2 = \frac{k_f^2}{3} \rightarrow \tau_p = \frac{k_f}{\sqrt{3}}\,. \tag{8}$$

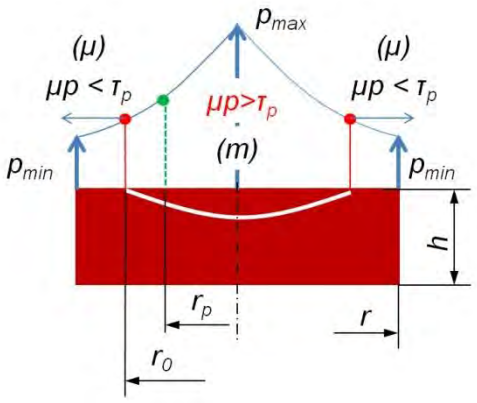
Siebel szerint a felületi nyomás az alakítási szilárdság és a hengeres geometria ismeretében, elhanyagolhatóan kismértékű súrlódási tényező esetén (9. ábra), a következőképpen fejezhető ki:

$$p(r) = k_f e^{\frac{2\mu}{h}(r-r_p)}\,. \tag{9}$$

A Coulomb-féle súrlódási modell érvényességi tartománya *Schey* szerint [64][3]:

$$\tau_S = \mu p \le \frac{k_f}{\sqrt{3}}\,. \tag{10}$$

Ahol μp értéke kisebb, mint a nyírási feszültség ott csúszási tartomány, ahol azt meghaladja, tapadási tartomány alakul ki (9. ábra). A két tartomány r_0 határa a teljes letapadás kezdetét jelöli.



9. ábra: *A nyomás változása párhuzamos nyomólapok között végzett zömítésnél*

A letapadás r_0 határa a (9) és (10) összefüggésekből r figyelembe vételével (9. ábra) meghatározható:

$$r_0 = r + \frac{h\ln(3) - 2h\ln\left(\frac{1}{\mu}\right)}{4\mu}. \tag{11}$$

A (11) összefüggésből következik, hogy $r_0=r$ esetén teljes letapadás lép fel:

$$0 = \frac{h\ln(3) - 2h\ln\left(\frac{1}{\mu}\right)}{4\mu}. \tag{12}$$

A (12) összefüggés értéke akkor zérus, amikor $\mu=0{,}577$. Az (1) és (2) összefüggés segítségével a Coulomb modell érvényességi tartományát felhasználva ($\sigma_N \leq k_f$), a Coulomb- és Kudo-féle súrlódási modellek közötti kapcsolat meghatározható [22]:

$$\mu k_f = m\frac{k_f}{\sqrt{3}} \rightarrow \mu = \frac{m}{\sqrt{3}} \tag{13}$$

A képlékenyalakító technológiák különböző kenőanyagokat használnak, melyek befolyásolják az érintkező felületek súrlódási mechanizmusát, a működő súrlódási tényező értékét. A súrlódási határállapotok értelmezésére, elvi jellemzésére alkalmas a következő összefüggés [22]:

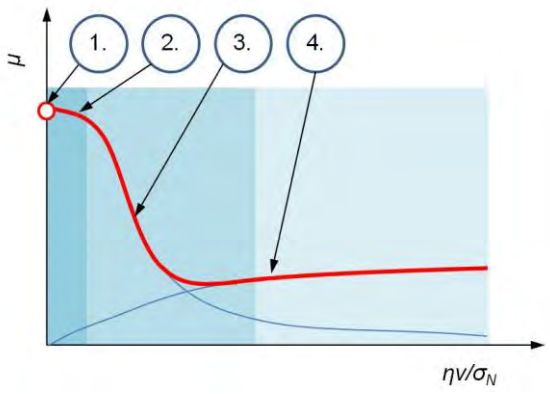
$$\tau_S = \mu\sigma_N(1-\gamma) + \eta\frac{dv}{dh}\gamma \tag{14}$$

Az összefüggés második tagja a hidrodinamikai kenési állapotot leíró tag, mely a kenőanyag felületek közötti dinamikus viselkedését írja le a kenőanyag belső súrlódása (dinamikai viszkozitás), sebesség-gradiense és a felületek fedettsége (kenési együttható) függvényében. Hidrodinamikai kenési állapot esetén nem érintkeznek a felületi érdesség csúcsok, azaz $\gamma=1$. Az első tag értelemszerűen kenés nélküli súrlódást (száraz súrlódás) leíró tag, $\gamma=0$ esetén lép fel. Az összefüggés a kenési határállapotokat ábrázoló diagramon [3][22] is megjeleníthető (10. ábra).

A diagram négy részből áll:

- *teljes letapadás* tartománya (1.), amikor a felületi rétegek egymáshoz képest nem tudnak elmozdulni. Az elmozdulás a felületi rétegek alatt, az anyagban történik,

- *kenés nélküli (száraz) súrlódás* tartománya (2.), amikor a felületek döntő hányada az érdességi csúcsokon keresztül érintkezik, az anyagáramlás a felületi rétegek alatt valósul meg,
- *vegyes súrlódás* tartománya (3.), a felületek egy részét kenőanyag választja el,
- *hidrodinamikai kenés* tartománya (4.), a felületek között összefüggő kenőanyagréteg található.



10. ábra: *A súrlódás határállapotai*

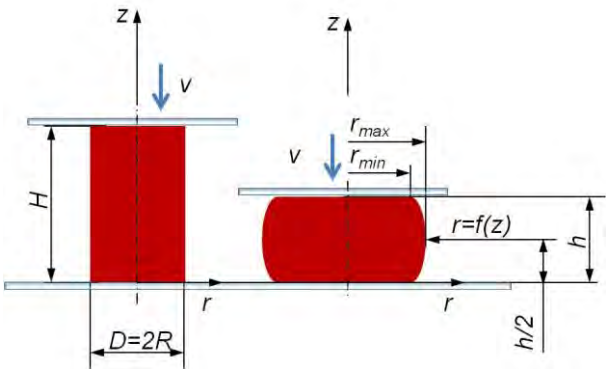
3.1.2. A hordósodó munkadarab profilgörbéjének közelítése másodfokú polinommal

A SU profilgörbék közelítő leírásai megegyeznek abban, hogy kisméretű próbatestek, reveképződés káros hatásától mentes, laboratóriumi körülmények között végezett kísérleti eredményein alapulnak.

Célkitűzésem alapján, nagyméretű próbatesteken, revésedésnek kitett, valós (üzemi) körülmények között kellett meghatározni r_{max} vagy r_{min} alapján (11. ábra) a súrlódási tényező várható értékét. Először azt vizsgáltam, hogy a hordósodott palástfelület egyszerű matematikai függvénnyel, a lehető legalacsonyabb fokszámú, azaz másodfokú polinommal milyen pontosan közelíthető.

3.1.2.1. A hordósodó munkadarab profiljának leírása parabolával

Zömítés közben a súrlódás hatására az r_{min} rádiuszok a munkadarab és a szerszámlapok érintkezésénél a súrlódás nélküli állapothoz képest kisebbek, középen pedig az r_{max} rádiuszok nagyobbak (11. ábra). A zömítés alatt a test térfogata állandó, miközben hordó alakot vesz fel (hordósodik).



11. ábra: *A zömített munkadarab a kezdeti és pillanatnyi konfigurációban*

A hordósodó munkadarab palástfelületét határoló vonal az *r=f(z)* függvénnyel írható le. A függvény várható alakja parabolikus közelítés esetén:

$$r(z) = az^2 + bz + c \tag{15}$$

Súrlódás nélküli esetben a nem hordósodó munkadarab ideális *r* sugara a zömített munkadarab *h* magassága és a kiinduló geometria (*D, H*) alapján a térfogat-állandóság felhasználásával számítható:

$$r = R\sqrt{\frac{H}{h}} \tag{16}$$

Súrlódásos állapotban a hordósodott alak parabolikus közelítéséhez a (15) függvény *a, b, c* együtthatóinak a meghatározása szükséges. A közelítés megfogalmazásakor feltételezhető, fogy a szerszám és a munkadarab érintkezésénél *z=0* és *z=h* helyeken a rádiuszok a legkisebbek (r_{min}) és egymással megegyeznek, valamint *z=h/2* helyen a rádiusz értéke maximális (r_{max}) (12. ábra). A peremfeltételeket kielégítő *r(z)* függvény:

$$r(z) = -\frac{4(r_{max} - r_{min})}{h^2} z^2 + \frac{4(r_{max} - r_{min})}{h} z + r_{min} \tag{17}$$

A térfogat-állandóság törvénye alapján:

$$R^2 \pi H = \int_0^h r^2(z) \pi \, dz \tag{18}$$

Behelyettesítve a (17) összefüggést, r_{max} rádiusz kifejezhető:

$$r_{max} = \frac{-2r_{min}h + 2\sqrt{-5r_{min}^2 h^2 + 30hR^2 H}}{8h} \tag{19}$$

A (19) értékét visszahelyettesítve a (17) összefüggésbe az *r(z)* függvény a kívánt formában megadható:

$$r(z) = \frac{5z^2 r_{min} h - z^2 \sqrt{-5r_{min}^2 h^2 + 30hR^2 H}}{h^3} + \\ + \frac{-5zh^2 R + zh\sqrt{-5r_{min}^2 h^2 + 30hR^2 H} + r_{min} h^3}{h^3} \tag{20}$$

A (20) összefüggés már ábrázolható egy *h* zömítési magasságnál megadott r_{min} rádiusz és a kiinduló *R, H* geometria ismeretében. A (18) összefüggésből r_{min} értéke is kifejezhető, ekkor az *r(z)* függvény egy *h* zömítési magasságnál megadott r_{max} rádiusz és a kiinduló *R, H* geometria ismeretében írható fel. A függvény együtthatói:

$$a = \frac{-20hr_{max} + 4\sqrt{5}\sqrt{h\left(-4hr_{max}^2 + 9R^2 H\right)}}{3h^3} \\ b = \frac{20hr_{max} - 4\sqrt{5}\sqrt{h\left(-4hr_{max}^2 + 9R^2 H\right)}}{3h^2} \\ c = \frac{-2hr_{max} + \sqrt{5}\sqrt{h\left(-4hr_{max}^2 + 9R^2 H\right)}}{3h} \tag{21}$$

Súrlódás nélküli esetben ($\mu=0$, $m=0$) a (20) összefüggés is a nem hordósodó geometriához vezet (*r(z)=áll*).

Teljes letapadásnál ($\mu=0{,}577$, $m=1$) $R=r_{min}$ és r_{max} a legnagyobb értéket éri el. Az említett szélső értékek között az *r(z)* görbe alakja és r_{min} illetve r_{max} értékek csak a súrlódási tényezőtől függenek.

A (20) sz. összefüggés és a térfogat-állandóság törvénye alapján, különböző elméleti súrlódási tényezők esetén a geometriailag lehetséges, idealizált profilgörbék MathCAD vagy MAPLE programok segítségével meghatározhatók.

Az idealizált profilgörbéknél alkalmazott egyszerűsítő feltételezések:

- homogén hőeloszlás a munkadarab belsejében
- a felületek között működő súrlódási tényező értéke állandó
- a munkadarab tengelyszimmetrikus
- a munkadarab és szerszámok érinkező felületein r_{min} értékek azonosak
- az r_{max} rádiusz a $z=h/2$ helyen található

Egy profilgörbe felvételéhez csupán *R, H, h* és r_{min} vagy r_{max} ismerete szükséges.

3.1.2.2. A parabolikus közelítés geometriai elfogadhatósága [19][20][75]

Az elméleti feltevés alátámasztására fizikai kísérleteket végeztem a Rába kovácsüzemében az alábbi paraméterekkel (1. sz. táblázat) (12. ábra):

1 sz. táblázat:

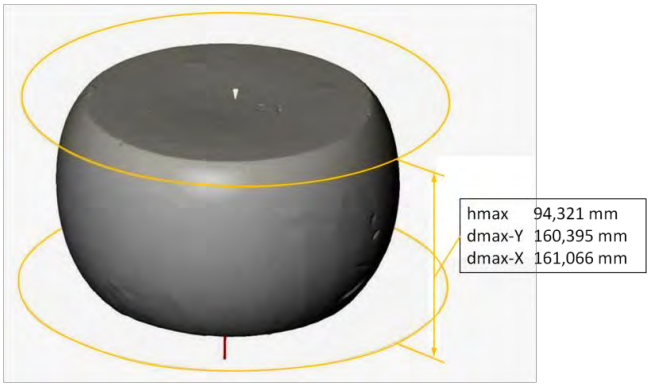
db	*zömítési magasság h [mm]*	*kenőanyag keverési aránya*	*zömítési hőmérséklet T (°C)*
1	95	1:4	1150
2			1210
3			1240
4		2:3	1210
5			1208
6	130	1:4	1120
7			1170
8			1180
9		2:3	1100
10			1180

- anyagminőség: 20MnCrS5,
- darabolási méret: Ø100x211 (L/D=2,1),
- tömeg: 13 kg,
- kenőanyag: Aquanet LS grafit alapú vizes szuszpenzió,
- szerszámfelület érdessége: Ra ≈ 1,6
- gyártósor: 40 MN MAXIMA kovácssajtó.

12. ábra: *Zömítési kísérletek - I*

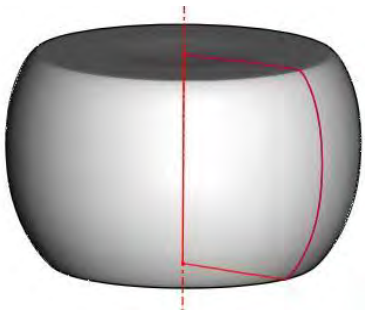
A profilgörbék ellenőrzéséhez a próbatestek felületének digitalizálására volt szükség. A feladat elvégzésére a Széchenyi István Egyetem GOM optikai digitalizáló berendezésén került sor.

A digitalizált felület elmetszését követően, a metszeti határoló görbe kijelölt részéhez tartozó pontok koordinátái kimentésre kerültek. A digitalizált felület jellegzetes befoglaló méreteit mutatja a 13. ábra.



13. ábra: *A 2. zömített minta optikailag digitalizált képe*

A kimentett pontok (195 db.) koordinátáit (14. ábra) MathCAD és Pro/Engineer szoftverek segítségével dolgoztam fel.



14. ábra: *A 4. zömített minta kimentett pontjainak a képe*

A regresszió-számításnál nem lettek figyelembe véve a profilgörbe azon pontjai, amelyek közvetlenül a munkadarabot határoló síklapok közelében voltak, mert a hordósodó palást és a síklapok találkozásánál egy külön rádiusz volt megfigyelhető.

A pontokat a MathCAD szoftver segítségével, másodfokú polinommal közelítettem (zömített magasság: h=95 mm) (15. ábra) [37][75].

A közelítő függvény (a),(b),(c) együtthatói a 2. minta esetén:

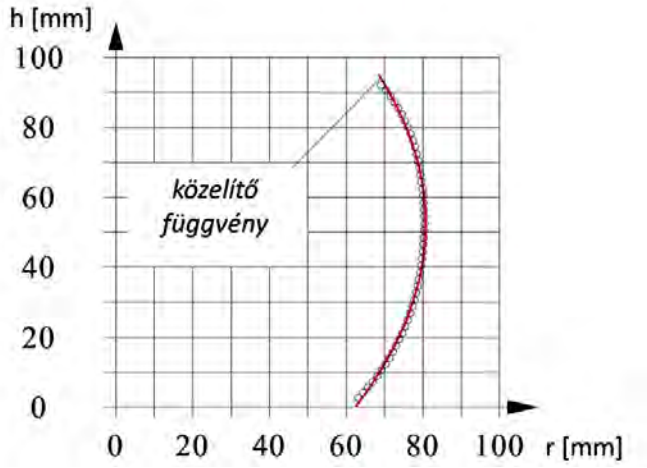
$a = -6{,}692 \times 10^{-3}$,

$b = 0{,}701$,

$c = 62{,}087$.

A közelítő függvény és a mérési pontok közötti korrelációs együttható értéke (r_c):

$$\mathrm{corr}\left(\overrightarrow{g1(H)}, R\right) = 0.996 .$$



15. ábra: *A* közelítő függvény és a mért értékek (pontok) grafikonja

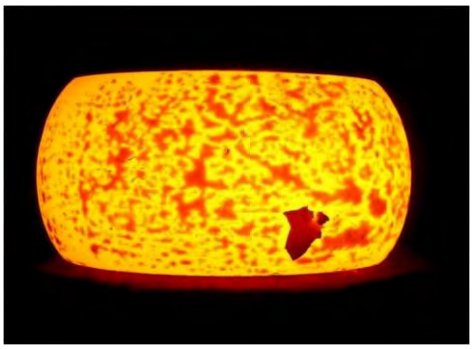
A közelítő függvény értékei és a mérési adatok között az $r_c=0,996$ korrelációs együttható szoros kapcsolatra utal, ami azt jelenti, hogy a 2. sz. mintadarab deformált profilja valóban közelíthető másodfokú polinommal.

Az optikai digitalizálás *előnye*, hogy a munkadarabot nagy pontossággal lehet leképezni, a kapott háromdimenziós pontfelhő alapján akárhány metszetnél meghatározható a profilgörbe. A módszer *hátránya*, hogy a vizsgált darab a gyártási folyamatba már nem kerülhet vissza, a mintavételi lehetőség korlátos, a vizsgálat időigényes.

A megállapítás megerősítésénél szükség volt egy olyan módszerre, költségkímélő eljárásra, amely a hordósra zömített munkadarab megfigyelését folyamatos gyártás közben is képes biztosítani. A zömített munkadarab alakjának megfigyeléséhez két alakítási fázis közötti pillanatnyi időt lehet felhasználni. Ez nagymértékben korlátozza az alkalmazható módszereket. A rendelkezésre álló idő alatt reálisan csak egy fényképfelvétel készíthető. A fényképfelvétel készítését megkönnyíti, hogy a kovácsolás hőmérsékletén az izzó acélnak jellegzetes színe van. Ez a jellegzetes szín jól elkülöníthető a környezet színétől, speciális fényforrás nem szükséges [43] (16. ábra).

A fényképfelvétel szűkített információval való leképezést jelent. A kiértékelésre a munkadarab vetületi képét használtam. A vetítési sugarak nem párhuzamosak, így a zömített munkadarab képén a határoló vonal csak közelíti a profilgörbét [17].

A vizsgálat szempontjából ez egy elfogadható közelítés. A fénykép csak egyetlen nézőpont szerint képezi le a munkadarab alakját, de ha feltételezzük a hordósodó munkadarab tengelyszimmetrikusságát, akkor ez a szűkítés is elfogadható [49].



16. ábra: *A zömített kovácsmeleg próbatest fényképe*

Az elkészített digitális képet különböző módszerekkel értékeltem ki. A kiértékelések újszerűségét az adja, hogy a gyártási folyamat megszakítása nélkül, a rendelkezésre álló eszközökkel, a melegalakítás körülményei között is alkalmazható.

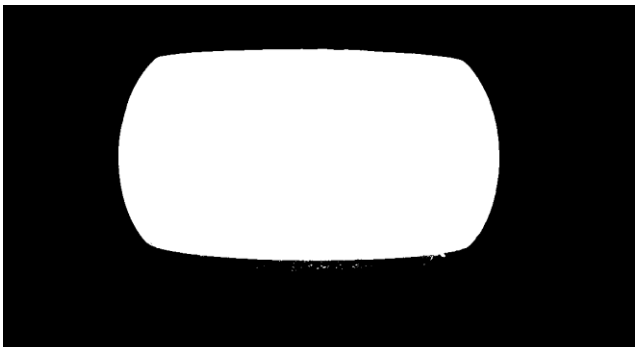
Kiértékelés pixelszámok alapján

A MathCAD matematikai szoftver bizonyos fokig támogatja a képpontok feldolgozását. A kovácsolási hőmérsékleten lévő munkadarabról készült színes kép (16. ábra) behívható, kicsinyíthető, nagyítható. A kiértékelésnek az a kritériuma, hogy a munkadarab jól elkülöníthető legyen a környezetétől [43].

A szürkeárnyalatos kép egyszerűsíti a képfeldolgozást, mert egy képponthoz csak egy színkód tartozik. A színkód értéke 0 és 255 között változik. A 0 érték megfelel a feketének, a 255 pedig a fehérnek. A MathCAD szoftver a képpontokra vonatkozó kódokat egy mátrixban tárolja. A mátrixnál a képpontok kódja lecserélhető. Először célszerű a munkadarab körvonalán belül minden képpont kódját 1-re cserélni, azon kívül pedig 0-ra. Ehhez a cseréhez meg kell adni olyan 0 és 255 közé eső számot (kódot), amivel elválasztható a munkadarab a környezetétől [50].

A szűrés utáni állapot megtekintéséhez a csak 0 és 1 értékeket tartalmazó mátrixot szorozzuk meg 255-tel. A műveletek elvégzése után egy elsődlegesen szűrt kép áll rendelkezésre. Ha az elsődleges szűrés nem tökéletes, a munkadarab kontúrja néhány helyen “zajos”, lehetőség van a hibás helyeken, a mátrix értékeinek javítására, másodlagos szűrésre. A részmátrix színkódjait megfelelőre állítva a kijelölt folt módosítható az eredeti mátrixnál.

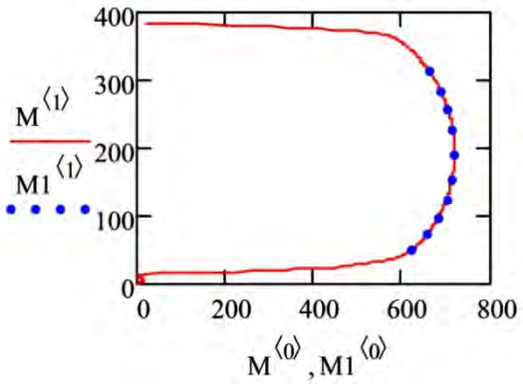
Megfelelő szűrés után a 17. ábrán látható kép nyerhető. A kiértékelés céljától függően lehet szükség a munkadarabon kívüli fehér foltok szűrésére is.



17. ábra: *A megfelelő szűrés eredménye*

A szűréssel elérhető, hogy a képpontoknak megfelelő mátrixnál a fehér szín helyén 1, a fekete szín helyén 0 érték szerepeljen. A munkadarabra eső képpontok száma, eloszlása a mátrix feldolgozásával már kimutatható. A hordósodó alak a mátrix kiértékelése után csak akkor kapható vissza, ha a kiértékelést a kép felére végezzük el. A munkadarab profilgörbéjére eső pontok a mátrixból elkülöníthetők, az elkülönített pontok alapján regresszió-számítással a másodfokú polinom együtthatói meghatározhatók, a másodfokú közelítés jósága korreláció-számítással kimutatható.

A MathCAD szoftverrel elvégezve a regresszió- és a korrelációszámítást a 18. ábrán látható esetre, a korrelációs együttható értéke: $r_c=0.998$, ami szoros kapcsolatra utal.

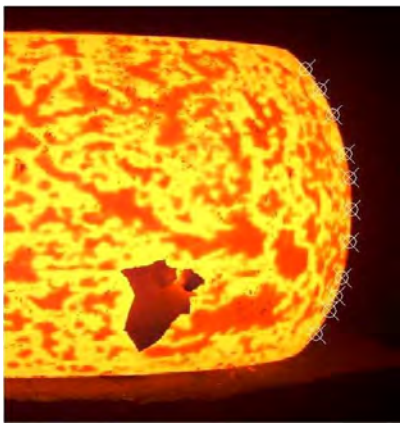


18. ábra: *A határoló görbe ábrázolása képpontok alapján MathCAD környezetben (folytonos vonal a munkadarab kontúrvonala, pontvonal a közelítő görbe)*

A 18. ábra alsó részén megfigyelhető, hogy a határoló görbe alatt, közel az origóhoz egy kis piros folt látható. Ez abból adódik, hogy a munkadarabon kívüli fehér foltok nem lettek kiszűrve. Az ábra vízszintes tengelyén az *r* értékeket tároló mátrixok ($M^{<0>}$, $M1^{<0>}$), függőleges tengelyén a *z* értékeket tároló mátrixok ($M^{<1>}$, $M1^{<1>}$) szimbólumai láthatók.

Kiértékelés CAD szoftver felhasználásával

Az AutoCAD szoftver támogatja a raszter képek behívását. A behívott kép egy háttérképnek felel meg, de a háttérkép alapján kijelölhetők a határoló pontok (19. ábra).



19. ábra: *A határoló pontok kijelölése AutoCAD környezetben*

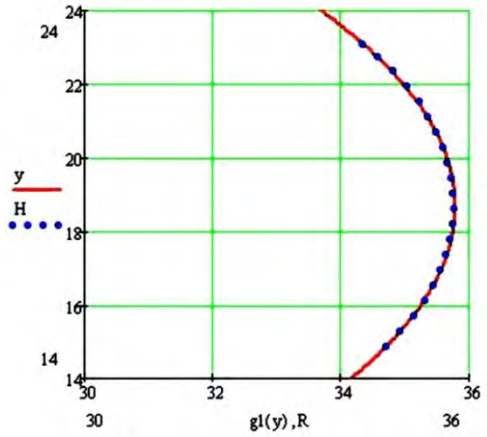
A határoló pontok kijelölését segíti, hogy a behívott kép, tetszés szerint nagyítható. A későbbi adatfeldolgozás érdekében a kijelölt pontok koordinátáit célszerű összegyűjteni, kimenteni. Az adatok rögzítésére, kimentésére, program készült AutoLISP programnyelven.

2 sz. táblázat:

sorszám	*r (sugárirány)*	*z (tengelyirány)*
0	34.325	23.073
1	34.764	22.453
2	35.181	21.643
3	35.575	20.428
4	35.706	19.689
5	35.758	18.692
6	35.701	17.678
7	35.463	16.563
8	35.273	15.995
9	35.076	15.536
10	34.651	14.809

A 19. ábrához kapcsolódó kimentett értékeket a 2 sz. táblázat mutatja. A 2. sz. táblázatnál az értékek egy hengerkoordináta rendszerben vannak megadva, ahol *r* a sugárirányú, *z* pedig a magasság (tengely) irányú méretek oszlopa. A kimentett értékek feldolgozása, a pontokat közelítő függvény meghatározása MathCAD szoftverrel

történt. Ugyancsak MathCAD szoftverrel történt a közelítő függvény és a mért értékek kapcsolatának vizsgálata. A korreláció-számítást a 2. sz. táblázat adataival elvégezve a korrelációs együttható értéke: $r_c=0.999$. A kapcsolatok szorossága jól érzékelhető a pontok és pontokat közelítő függvény grafikonja alapján is (20. ábra).



20. ábra: *AutoCAD szoftverrel definiált határoló görbe ábrázolása MathCAD környezetben (pontvonal a munkadarab kontúrvonala, folytonos vonal a közelítő görbe)*

A 20. ábra vízszintes tengelyén az *r* értékeket tároló vektorok (g1(y), R), függőleges tengelyén a *z* értékeket tároló vektorok (y, H) szimbólumai láthatók. Megállapítottam, hogy a két egymástól teljesen eltérő képkiértékelési módszer, gyakorlatilag azonos eredményre vezet, ezért bármelyik módszer használható a parabolikus közelítés jóságának vizsgálatára.

Egyik kiértékelési módszer sem automatizálható teljesen, mindkettőnél szükség van egyéni döntésekre. A pixelszámok szerinti kiértékelésnél további problémát okozhatnak a kiszámíthatatlan helyen megjelenő revedarabok. Az esetlegesen felmerülő kiértékelési nehézségeket mérlegelve szerencsésebb az AutoCAD szoftver használata AutoLISP program-kiegészítéssel.

A hordósodás parabolikus közelítésének statisztikai léptékű igazolása

A Rába kovácsüzemében ismételt, *kenés nélküli* zömítési kísérleteket végeztem konstans gyártási körülmények között.

A kísérlet során különböző **L/D** (*Length / Diameter*) viszony mellett, eltérő magasságra és mértékben zömített munkadarabokról, rögzített kamerával azonos távolságról és pozícióban, vakuval készültek digitális fényképek.

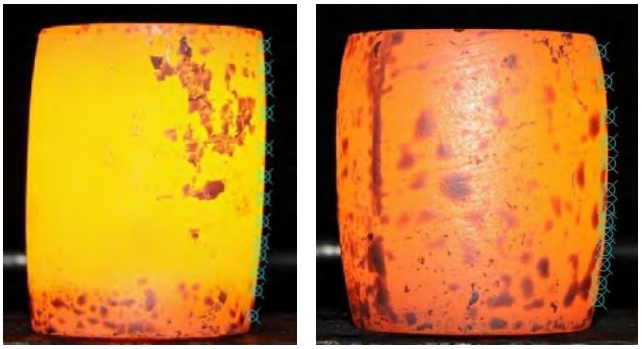
A felvételek készítéséhez szükséges beállítások megválasztásakor törekedtem a perspektivikus torzulás és a lencse torzító hatásának csökkentésére [17][50]. A korábban kiválasztott AutoCAD/AutoLISP módszerrel ellenőriztem a profilgörbék másodfokú polinommal való közelíthetőségét. A kísérletet jellemző paramétereket és adatokat a 3. sz. táblázatban foglaltam össze:

3 sz. táblázat:

1 sz. zömített munkadarab							
kovácsolás					fotó		
H	D	$T_{zömítés}$	h	d_{max}	f-stop	exp	f
150	90	1130	128.1	99.8	f/8	1/200	52
5 sz. zömített munkadarab							
kovácsolás					fotó		
H	D	$T_{zömítés}$	h	d_{max}	f-stop	exp	f
150	90	1150	114.8	107	f/10	1/125	52
7 sz. zömített munkadarab							
kovácsolás					fotó		
H	D	$T_{zömítés}$	h	d_{max}	f-stop	exp	f
100	90	1110	65.8	118.2	f/10	1/60	50
10 sz. zömített munkadarab							
kovácsolás					fotó		
H	D	$T_{zömítés}$	h	d_{max}	f-stop	exp	f
100	90	1158	28.8	175.1	f/10	1/60	50
14 sz. zömített munkadarab							
kovácsolás					fotó		
H	D	$T_{zömítés}$	h	d_{max}	f-stop	exp	f
150	90	1147	78.2	131.9	f/10	1/80	50

- kiinduló magasság (darabolási hossz): H (mm),
- kiinduló átmérő: D (mm),
- zömítési hőmérséklet: $T_{zömítés}$ (°C),
- zömített magasság lehűlt állapotban: h (mm),
- zömített legnagyobb átmérő hideg állapotban: d_{max} (mm),
- alakítógép: 40 MN MAXIMA kovácssajtó,
- szerszámfelületek felületi érdessége: Ra=0,25,
- felbontás (**DPI** = *Dots Per Inch*): 300,
- fókusztávolság: f (mm),
- expozíciós idő: exp (sec),
- f-stop: rekesznyílás (blende) értéke.

Az 1 sz. és az 5. sz. (21. sz. ábra) zömített munkadarabok geometriája revétlenítő zömítésre jellemző geometria. Revétlenítő zömítéskor az alakítás mértéke csak akkora, hogy a munkadarab felületén kialakuló reveréteget megbontsa, a reve eltávolítását lehetővé tegye.



21. ábra: *Az 1. sz. és 5. sz. próbadarab geometriája ≈14.5 % és ≈23,5% magasságcsökkenésnél. Korrelációs együtthatók:* r_c*=0.997,* r_c*=0.993*

A 7. sz., 10. sz., 14. sz. zömített munkadarabok (22-23. sz. ábra) az előalakító zömítésre jellemző geometriák, ahol fokozott elvárás a profilgörbék megfelelő alakulása.

22. ábra: *A 7. sz. és 14. sz. próbadarab geometriája ≈34 % és ≈48% magasságcsökkenésnél. Korrelációs együtthatók:* r_c*=0.998,* r_c*=0.998*

23. ábra: *A 10. sz. próbadarab geometriája ≈71 % magasságcsökkenésnél. Korrelációs együttható:* r_c*=0.998*

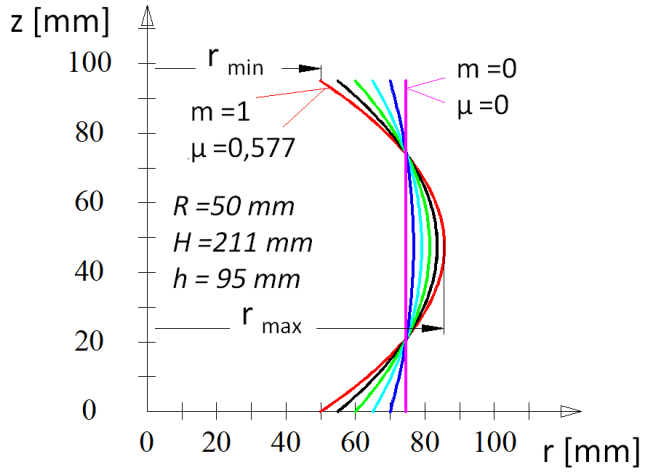
A vizsgálatok végrehajtása konstans felületi érdesség biztosítása mellett, kenésmentes technológiával történt. Az azonos gyártási körülmények lehetővé tették a zömített profilgörbe torzulásaival kapcsolatba hozható, meghatározó jellegű paraméterek beazonosítását és kiszűrését. A kísérlet igazolta, hogy a közelítés jósága

elhanyagolható mértékben függ a zömítés mértékétől és az L/D viszonytól, azonban jelentős függőséget mutat a munkadarab belső hőeloszlásával [73].

Az elért eredmények alapján biztonsággal kijelenthető, hogy melegalakításnál a munkadarab homogén hőeloszlása esetén, a munkadarab hordósodása megfelelő pontossággal közelíthető másodfokú polinommal.

3.1.2.3. A geometriailag lehetséges profilgörbék [72][75]

Visszatérve a 13. ábrán látható 2. sz. zömített mintadarab geometriai vizsgálatához, az adott *R, H* kiindulási geometriánál és *h* zömített magasságnál az r_{min} módszeres megválasztásával felvehetők a geometriailag lehetséges profilgörbék (24. ábra)



24. ábra: *A 2 sz. próbadarab parabolikus közelítésű idealizált profilgörbéi*

Az ábrán megfigyelhető, hogy csak a szélső állapotoknál adható meg konkrétan a súrlódási tényezők értéke. A 2. mintára vonatkozó súrlódási tényező értékét Burgdorf-féle gyűrűzömítő vizsgálattal [12] becsültem meg.

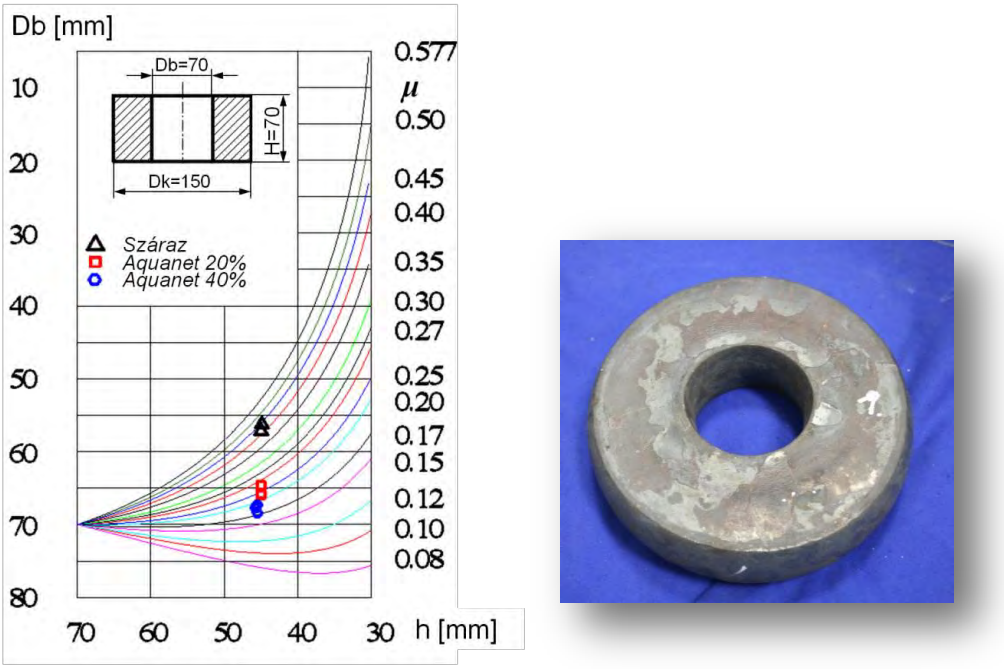
A Burgdorf-féle gyűrűzömítő vizsgálat külön munkadarabokat, az új geometriájú darabokhoz új görbesereg felvételét igényli, ezért a vizsgálat költséges és bonyolult [56] volt, a szálszerkezetről csak áttételesen adott információt. A gyűrű zömítését konstans üzemi körülmények között, különböző kenési viszonyok mellett végeztem el. A kiértékelés eredményét a 4. sz. táblázat és a 25. ábra szemlélteti.

A kiértékeléshez összesen 24 db. forgácsolással előkészített gyűrű zömítésére került sor, egyenlő mennyiségben elosztva, 45 mm, 42 mm, és 34 mm magasságokra. Az egyes halmazokon belül 2 esetben kenés nélküli technológiát alkalmaztam, 3

esetben 20% (1:4) térfogatarányban higított Aquanet LS kenőanyagot, 3 esetben 40% (2:3) térfogatarányban higított Aquanet LS kenőanyagot használtam.

4 sz. táblázat:

μ	m	*kenőanyag térfogataránya [%]*
0,17-0,2	0,3-0,35	40 (2:3)
0,2-0,27	0,35-0,5	20 (1:4)
0,4-0,5	0,7-0,8	nincs kenés



25. ábra: *Gyűrűzömítő vizsgálattal meghatározott súrlódási tényezők [26]*

Az elvégzett gyűrűzömítő vizsgálatok rámutattak arra, hogy üzemi körülmények között végzett melegalakításkor nagyobb súrlódási tényezővel kell számolni, ami előbb-utóbb a munkadarab részleges letapadásához vezet.

A 2. sz. zömített mintadarab mért r_{max} átlagértéke (13. sz. ábra): 80,365 mm. A (20) összefüggés számított r_{min} értéke: 62,087 mm. A 4. sz. táblázatban a megfelelő súrlódási tényező értéke az 1. sz. táblázat 2. sz. mintadarabra vonatkozó adatai alapján m=0,35-0,5 közé tehető.

A 24. ábrán látható r_{min} értékeket reprezentáló görbék 70-60=10 mm tartományát (ez tartalmazza a számított r_{min} értéket) arányosan felosztva egyszerű aránypárral meghatározható a Kudo-féle súrlódási tényező közelítő értéke: **m≈0,47**.

A kapott érték jó viszonyítási alap a matematikai modell ellenőrzésére.

3.1.3. A súrlódási tényező újszerű meghatározása egy lehetséges, kinematikailag megengedett sebességmező alapján

Az anyagáramlás matematikai modellezésére a kontinuumok mozgását leíró alaptörvények alkalmasak. Ilyen alaptörvény a test tömegmegmaradása. A tömegmegmaradás törvényének differenciális alakja:

$$\frac{\partial \varsigma}{\partial t} + \nabla \cdot (\varsigma \vec{v}) = 0 . \tag{22}$$

Szokásos feltételezés, hogy a zömítés folyamán a munkadarab sűrűsége nem változik, így a (22) összefüggésből következik a térfogat-állandóság:

$$div(\vec{v}) = 0 . \tag{23}$$

Zömítésnél elfogadható közelítéssel a deformáció tengelyszimmetrikus. Tengelyszimmetrikusság esetén célszerű a hengerkoordináta-rendszer alkalmazása.

Tengelyszimmetrikus deformáció esetén a térfogat-állandóság hengerkoordináta-rendszerben kifejezhető csupán a w_z és a w_r sebességkomponensekkel:

$$div(\vec{w}) = \frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_r}{r} + \frac{\partial w_z}{\partial_z} = 0 . \tag{24}$$

Kinematikailag lehetséges az a sebességmező, amely kielégíti a kinematikai peremfeltételeket és a térfogat-állandóságot, azaz folytonos és a hely szerint megfelelően sokszor differenciálható a test térfogatán. A térfogat-állandóság, vagy más megközelítéssel az összenyomhatatlanság kifejezhető az alakváltozási sebességekkel is.

A w_z és w_r sebességkomponensek ismeretében az alakváltozási sebességek:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}\left(w_{ij} + w_{ji}\right) \quad i, j = \{ r, \Theta, z \}. \tag{25}$$

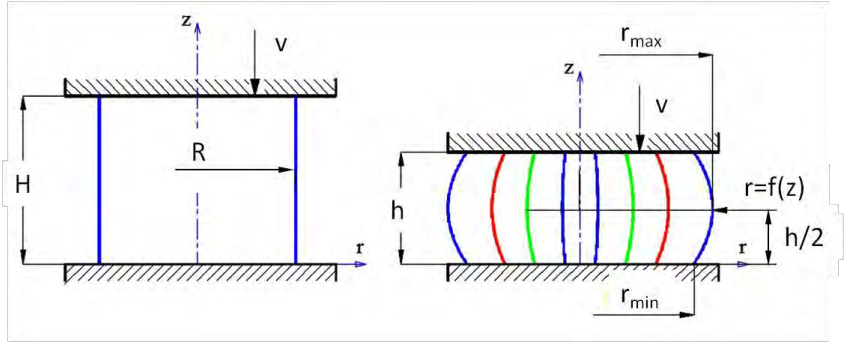
Tengelyszimmetrikus munkadaraboknál a (25) geometriai egyenlet hengerkoordináta rendszerben az alábbi skalár alakokat veszi fel:

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\partial w_r}{\partial r}, \ \dot{\varepsilon}_\Theta = \frac{w_r}{r}, \ \dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial w_z}{\partial z} . \tag{26}$$

Az (24) és (26) összefüggések alapján:

$$\dot{\varepsilon}_{ii} = \frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_r}{r} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = \dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_\Theta + \dot{\varepsilon}_z = 0. \tag{27}$$

Ezt felhasználva a vizsgált test teljes térfogatára definiált $\dot{\varepsilon}_{ij}$ alakváltozási sebességek mezőjét akkor nevezzük kinematikailag megengedettnek, ha olyan sebességmezőből származtattuk le, amely a testben mindenütt kielégíti az összenyomhatatlanság $\dot{\varepsilon}_{ii} = 0$ feltételét és a kerületi (felületi) peremfeltételeket [53].



26. ábra: *A hordósodás matematikai paramétereinek ábrázolása*

A párhuzamos nyomólapok között végzett zömítésnél az alsó szerszámfél mozdulatlan, a felső szerszámfél pedig v sebességgel halad a mozdulatlan szerszámfél felé (26. ábra). A munkadarab anyagi pontjaira a következő peremfeltételek fogalmazhatók meg a nyomólapok mozgása alapján:

- ha $z=0$, akkor $w_z=0$,
- ha $z=h$, akkor $w_z=-v$.

A fenti peremfeltételt számos kinematikailag megengedett sebességmező kielégíti. Ezek közül a legismertebb úgy származtatható, hogy a tengelyirányú sebesség változását a két nyomólap között lineárisnak feltételezik:

$$w_z = az + b\,. \tag{28}$$

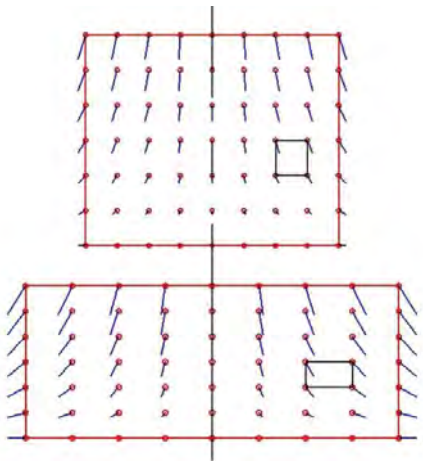
A (28) figyelembevételével, a peremfeltételek és a (27) térfogat-állandóság alkalmazásával a sebességmező már egyértelműen adódik:

$$w_z(z) = -\frac{v}{h}z\,. \tag{29}$$

$$w_r(r) = \frac{1}{2}\frac{v}{h}r\,. \tag{30}$$

Az így származtatott sebességmező leírása több szakirodalomban is megtalálható [25][23][41]. A sebességkomponensek a (29), (30) összefüggéseknél lineárisan változnak. A feltételezett sebességmezővel a zömített munkadarab nem hordósodik,

azaz egy kijelölt téglalap a deformáció során téglalap marad, alakja nem változik, csak a mérete (28. ábra).



27. ábra: *A deformált pontháló képe a lineárisan változó tengelyirányú sebesség esetén*

Ilyen deformáció csak súrlódásmentes állapotban képzelhető el, amely a gyakorlatban nem létezik. A korábbi peremfeltétellel számos kinematikailag megengedett sebességmező megfogalmazható. Ezek közül a valóságost az közelíti meg jobban, amelyik kisebb teljesítményfelvétellel jár. Ez azt jelenti, hogy a (29), (30) komponensekkel megfogalmazott, kinematikailag megengedett sebességmezőből számított erőt csak olyan közelítő értékként (felső korlátként) foghatjuk fel, ami a tényleges alakító erőnél nagyobb. A kinematikailag megengedett sebességmező alapján a felsőhatár-módszer alkalmazásával meghatározható a zömítés erőszükséglete. A (24), (25) összefüggések felhasználásával a zömítés teljesítményszükséglete két komponensből tevődik össze [2][25]:

$$P = P_{ID} + P_S = \int_V k_f \dot{\varepsilon}_{red} dV + \int_A \tau_S |w_{rel}| dA . \tag{31}$$

Az alakítás erőszükséglete a (31) összefüggésből a (29), (30) sebességmező felhasználásával az ismert Siebel-féle összefüggés szerint adódik:

$$F = \frac{P_{ID} + P_S}{v} = k_f A \left(1 + \frac{2\mu r}{3h} \right). \tag{32}$$

A tengelyirányú sebességkomponens lineáris (28) eloszlás szerinti megfogalmazásánál a peremfeltételek alapján a w_z , w_r sebességkomponensek egyértelműen meghatározhatók voltak, mert a (28) összefüggésnél az ismeretlen a és b együtthatók meghatározásához elegendő volt a peremfeltételekkel felírt két egyenlet:

$$w_z(0) = a0 + b = 0; \quad w_z(h) = ah + b = v. \tag{33}$$

Korábbi kutatások során megfogalmazódott olyan sebességmező is [23], amely a valóságosat jobban megközelíti, aminek a felhasználásával az alakítás erőszükséglete pontosabban meghatározható, amelyik sebességmező hordós munkadarabot eredményez. A [23] irodalom szerinti sebességmezőnél a tengelyirányú sebességkomponens harmadfokú polinommal írható le:

$$w_z(z) = az^3 + bz^2 + cz + d. \tag{34}$$

A (34) összefüggésnél az ismeretlen (*a, b, c, d*) együtthatók meghatározásához már négy egyenlet kell. A munkadarab anyagi pontjaira a 26. ábrának megfelelően megfogalmazható peremfeltételek változatlanok, ezek továbbra is két egyenletet jelentenek. A peremfeltételek azzal a feltételezéssel egészülnek ki, hogy a w_z tengelyirányú sebességfüggvénynek a $z=h/2$ helyen inflexiós pontja van, azaz ezen a helyen az $\dot{\varepsilon}_z$ alakváltozási sebesség extremális:

$$\frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} = 3ah + 2b = 0. \tag{35}$$

Az eddigiek alapján a (34) összefüggésnél az *a, b* és *d* paraméter értéke meghatározható és így:

$$w_z(z) = 2\frac{(ch+v)z^3}{h^3} - 3\frac{(ch+v)z^2}{h^2} + cz. \tag{36}$$

A térfogat-állandóság (27) egyenletébe a (36) függvényt behelyettesítve, a $w_r(r,z)$ komponensre egy elsőrendű differenciálegyenlet adódik, mely a z koordinátától, mint paramétertől függ. A differenciálegyenlet megoldásánál az alakváltozás tengelyszimmetrikussága miatt felhasználható, hogy: $w_r(0,z) = 0, \ \forall \ z$. Ezzel a differenciálegyenlet megoldása:

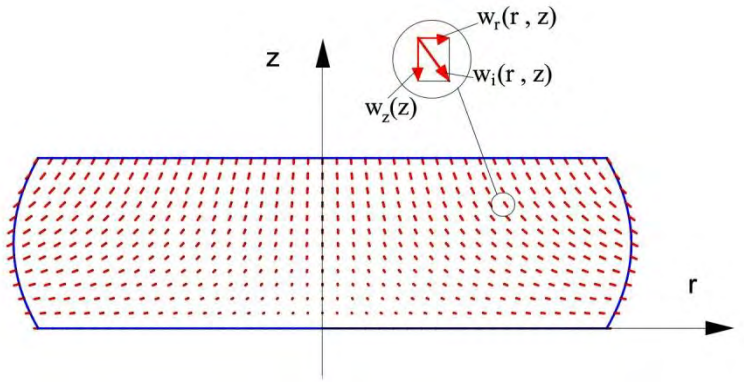
$$w_r(r,z) = -3\frac{rz^2c}{h^2} - 3\frac{rz^2v}{h^3} + 3\frac{rzc}{h} + 3\frac{rzv}{h^2} - \frac{1}{2}rc, \tag{37}$$

ahol *c* egy ismeretlen paraméter, melyet meg kell határozni. Bevezetve *c* helyén a $k=-ch/v$ dimenzió nélküli paramétert, a [23] irodalom szerint javasolt sebességmező komponensei:

$$w_z(z) = \frac{z\left(-2z^2kv + 2z^2v + 3zkvh - 3zvh - kvh^2\right)}{h^3}, \tag{38}$$

$$w_r(r,z) = -\frac{1}{2}\frac{r\left(-6z^2kv + 6z^2v + 6zkvh - 6zvh - kvh^2\right)}{h^3}, \tag{39}$$

A (38), (39) komponensekkel megfogalmazott kinematikailag megengedett sebességmező képe a 28. ábrán látható.



28. ábra: *A hordósodást eredményező sebességmező képe*

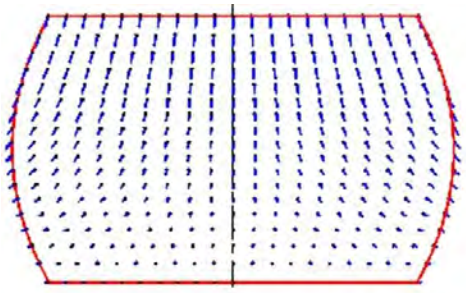
A *k* pontos értéke az alakítás teljesítmény-szükségletének minimalizálásával határozható meg [23]. A feltételezett sebességmezőnél a dimenzió nélküli paraméter befolyásolja a hordósodás mértékét [23], a hordósodás viszont a súrlódási tényezővel függ össze. Ez alapján belátható, hogy a *k* értéke összefügg a súrlódási tényező értékével, de a kapcsolat elemzése, felhasználása elmaradt a korábbi munkákban. Nyilvánvalóan megfogalmazható más, a valóságot jobban közelítő sebességmező is, de a (38), (39) komponensekkel megfogalmazott sebességmező még eléggé egyszerű az alkalmazhatóság szempontjából, és az alakítás folyamata jól modellezhető vele.

Az anyagáramlás modellezéséhez, valamint a pillanatnyi sebességmező ábrázolásához MathCAD szoftver segítségével készült egy algoritmus (30. ábra), mely része a célkitűzésemben megfogalmazott CAD geometria közvetlen leképezhetőségére alkalmas programnak (47. ábra). A program indításakor meg kell adni a geometriai adatokat (*R, H, h*) és a *k* anyagáramlási tényezőt, valamint tetszés szerinti sűrűséggel egy ponthálót. Az alkalmazott algoritmus, a kiinduló *H* magasság értékét csökkenti *vdt=0,1* mm értékkel, és a (38), (39) összefüggések felhasználásával kiszámítja a pontok új helyzetét. Ezután az új geometriát tekinti kiindulónak, és újabb magasságcsökkentéssel megismételi az előbbieket. Ez a ciklus addig tart, amíg a pillanatnyi magasság a megadott *h* értéket el nem éri.

```
RZ(MR, MZ) := | SR ← MR
              | SZ ← MZ
              | for j ∈ 0.. nz − 1
              |     h ← (H0 − j·0.1)
              |     XR ← SR + wr(SR, SZ, h)
              |     XZ ← SZ + wz(SZ, h)
              |     SR ← XR
              |     SZ ← XZ
              | EM^⟨1⟩ ← SZ
              | EM^⟨0⟩ ← SR
              | EM^⟨2⟩ ← 0
              | EM
```

29. ábra: *A kijelölt pontok helyzetét meghatározó algoritmus*

A 29. ábrán bemutatott algoritmusnál a felvett pontok *r* és *z* koordinátái az $\underline{\underline{SR}}$ és $\underline{\underline{SZ}}$ mátrixban kerülnek tárolásra (***S***=*start* koordináta). A „*for”* cikluson belül történik a munkadarab pillanatnyi magasságának lépésenkénti változtatása, majd a pillanatnyi magasságot a (38), (39) sebességkomponensek független változójaként – $w_r(r, z, h)$, $w_z(z, h)$ - kezelem. Ezzel lépésenként meghatározható az $\underline{\underline{SR}}$ és $\underline{\underline{SZ}}$ mátrixban tárolt minden értékekkel a pillanatnyi elmozdulás-komponens. Az elmozdulás-komponenseket előjelhelyesen hozzáadva a pontok koordinátáihoz megkapjuk a pontok megváltozott $\underline{\underline{XR}}$ és $\underline{\underline{XZ}}$ koordinátaértékeit. Ezt követően a megváltozott értékek tekinthetők a kiinduló értékeknek ($\underline{\underline{SR}} \leftarrow \underline{\underline{XR}}$), ($\underline{\underline{SZ}} \leftarrow \underline{\underline{XZ}}$) és folytatódik a ciklus. A teljes ciklus végén a pontháló végleges koordinátáit az $\underline{\underline{EM}}$ ($\underline{\underline{MR}}$, $\underline{\underline{MZ}}$) mátrixban (***E***=*end* koordináta) tároljuk, majd kimentjük. Ezzel az algoritmussal meghatározható a (38), (39) sebességkomponensek mellett a deformált pontháló képe, és a pontokhoz tartozó sebességvektorok. Ilyen jellegű sebességmezőt mutat a 30. ábra.



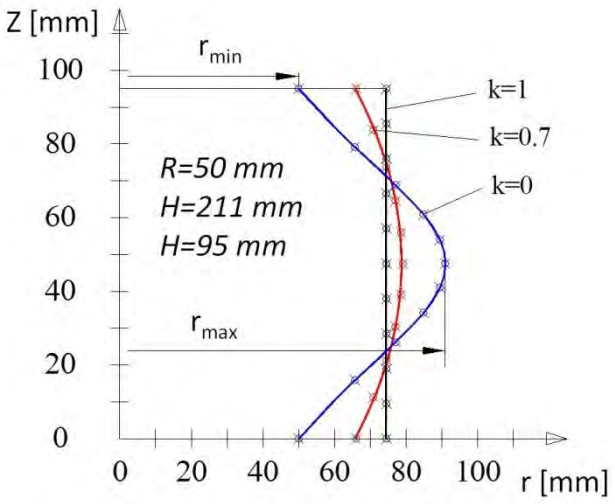
30. ábra: *A matematikai modell szerinti sebességmező képe az egyik munkadarabnál (h=95 mm, H=211 mm, R=50 mm, r_{min}=66,07 mm, r_{max}=79 mm, k=0.7)*

A profilgörbéket meghatározó pontokat ábrázolva különböző *k* értékek mellett a 31. ábrán látható görbesereget kapjuk.

A *k=1* és a *k=0,7* értékekhez tartozó pontok közelítő görbéjét másodfokú polinommal adtam meg.

A *k=0* értékhez tartozó pontok már nem közelíthetők jól másodfokú polinommal, így ott a pontok egy *spline* görbével lettek összekötve.

Megállapítható, hogy *k=1* esetén az alakváltozás homogén lesz, a munkadarab hengeres marad, a (38), (39) összefüggések a szakirodalomban jól ismert (29), (30) alakot veszik fel.



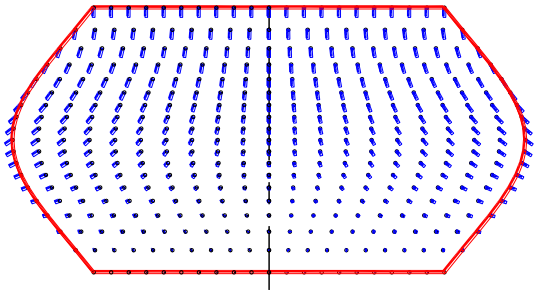
31. ábra: *A 2. sz. próbadarab profilgörbéi különböző k értékek esetén.*

A 31. ábra és a (20) összefüggés alapján is belátható, hogy *k=0* esetén a munkadarab és a szerszám érintkezésénél a sugárirányú sebesség értéke nulla.

Ez megfelel a teljes letapadásnak [26]. Ebben az esetben a (38), (39) sebességkomponensek a (40), (41) alakot veszik fel és 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 (32. ábra).

$$w_z(z) = \frac{z\left(2z^2 v - 3zvh\right)}{h^3} \tag{40}$$

$$w_r(r,z) = -\frac{1}{2}\frac{r\left(6z^2 v - 6zvh\right)}{h^3}. \tag{41}$$



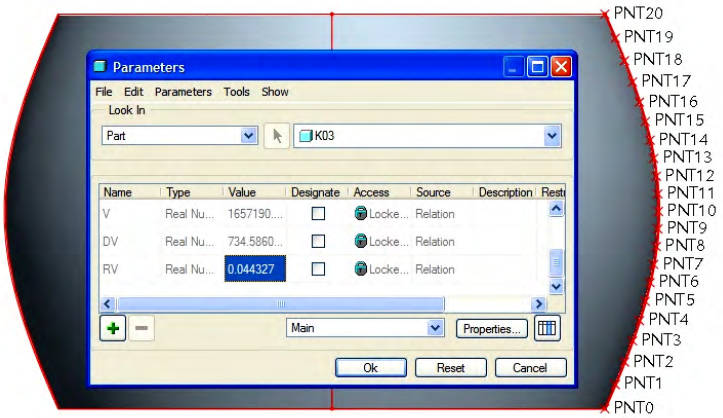
32. ábra: *Az anyagáramlás képe teljes letapadás esetén*

A súrlódás nélküli állapot és a teljes letapadás a gyakorlatban nem fordul elő. Ezekre a határesetekre a korábban említett *k* anyagáramlási tényező felhasználásánál van szükségünk.

Az anyagáramlás matematikai modellezésével meghatározott geometriai adatok kielégítik a térfogat-állandóság törvényét, ugyanis a (38) tengelyirányú sebességkomponens felhasználásával a (39) sugárirányú sebességkomponens úgy lett meghatározva [23], hogy a sebességmező divergenciája zérus legyen (18), (24).

Esetleges eltérés abból adódhat, hogy az anyagáramlás időben állandóan változó. Az állandóan változó esetekben a matematikai modell csak egy *dt* időintervallumra érvényes. Ha a vizsgálatot a teljes alakítási folyamatra ki akarjuk terjeszteni, akkor az alakítási folyamatot egymásra épülő *dt* időintervallumokra kell osztani.

Munkámban *vdt=0,1* mm elmozdulásokon belül feltételeztem a sebességmező állandóságát [23][14]. A hibát úgy ellenőriztem, hogy a közelítő számítással kapott határoló pontok koordinátáit a Pro/Engineer szoftverrel ábrázoltam és azokat spline görbékkel kötöttem össze.

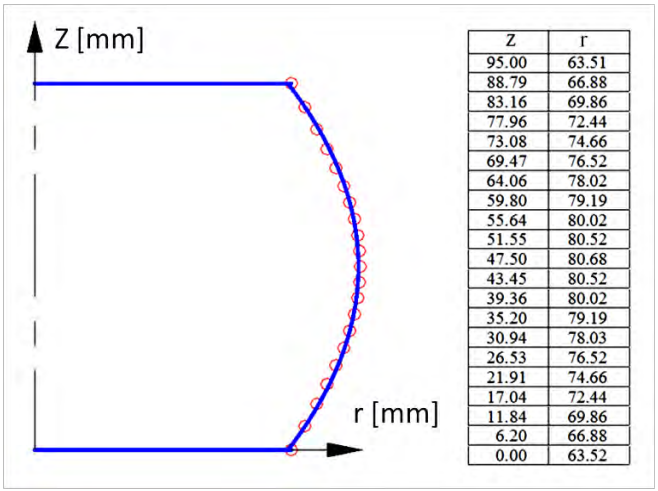


33. ábra: *A térfogat-állandóság ellenőrzése a matematikai modellnél*

Az így kapott profilgörbével elkészítettem a forgatáshoz szükséges vázlatot, majd azt megforgatva a hordós munkadarab geometriai modelljét. A geometriai modell birtokában a térfogat a Pro/Engineer szoftver segítségével már meghatározhatóvá vált. A kiszámított térfogat eltérésének százalékos értéke, *0,044%*-ra adódott (33. ábra).

A vizsgálat alapján megállapítottam, hogy megfelelően kis lépésekkel alkalmazott anyagáramlás matematikai modellje (mint esetünkben) biztosítja a térfogat-állandóságot.

Az anyagáramlás matematikai modellezésénél most már vizsgálhatóvá vált a határoló pontok parabolával való közelítésének pontossága is. A tetszőleges sűrűségű pontok ábrázolására és azok koordinátáinak kigyűjtésére egy korábbi *AutoLISP* programot kellett tovább fejleszteni. A korrelációs együtthatók értékét a táblázatosan kigyűjtött koordináták alapján a MathCAD szoftverrel határoztam meg.



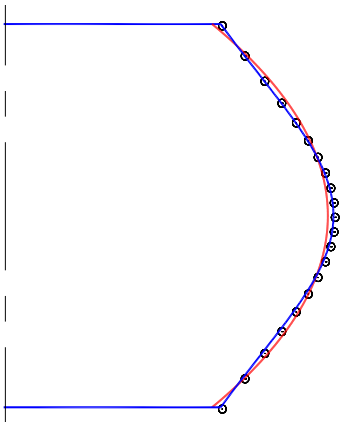
z	r
95.00	63.51
88.79	66.88
83.16	69.86
77.96	72.44
73.08	74.66
69.47	76.52
64.06	78.02
59.80	79.19
55.64	80.02
51.55	80.52
47.50	80.68
43.45	80.52
39.36	80.02
35.20	79.19
30.94	78.03
26.53	76.52
21.91	74.66
17.04	72.44
11.84	69.86
6.20	66.88
0.00	63.52

34. ábra: *A határoló pontok kigyűjtése, ábrázolása, h=95 mm, H=211 mm, R=50 mm, k=0,7*

A 34. ábrán látható táblázat adatai (piros pontok) és a közelítő függvény (folytonos kék vonal) adta értékek között a korrelációs együttható értéke $r_c=0,996$, ami szoros kapcsolatra utalt.

Megállapítható az is, hogy a matematikai modellnél a határoló pontok jól közelíthetők parabolával, de jelentős hordósodásnál a kapcsolat romlik (35. ábra).

Az ábrán piros folytonos vonal a közelítő függvény görbéjét, míg a kék folytonos vonal a matematikai modell diszkrét pontjait összekötő görbét mutatja. A korlátok megfogalmazásával a 3.1.4. fejezetben, később foglalkozom.



35. ábra: *A határoló pontok kigyűjtése, ábrázolása, h=95 mm, H=211 mm, R=50 mm, k=0,3*

Összehasonlítva a 24. és a 31. ábrát, a hasonlóság szembetűnő. Az ábrák alapján könnyen feltételezhető a k anyagáramlási tényező és a súrlódási tényező (μ, m) kapcsolata. *Mindkét ábrán megtalálható a súrlódás nélküli és a teljes letapadásnak megfelelő állapot.*

A 24. ábrán a súrlódás nélküli állapot az $m=0$ súrlódási tényezővel, a 31. ábrán a $k=1$ anyagáramlási tényezővel értelmezhető. A teljes letapadásnál pedig $m=1$ és $k=0$.

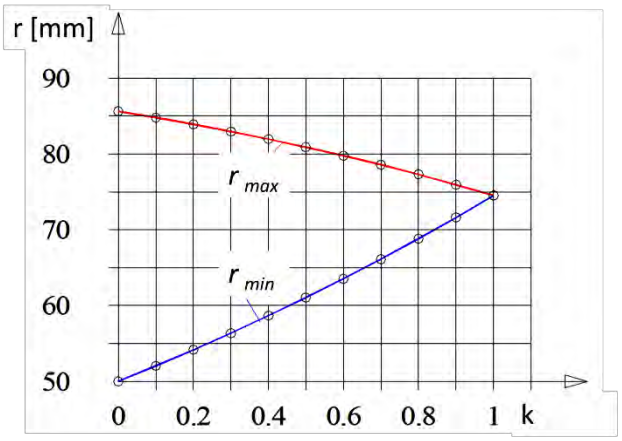
A nagy nyomás alatti anyagáramlással járó alakváltozások esetén feltételezhető, hogy a munkadarab és a nyomólapok érintkezési felületén mindvégig Kudo-féle (m) súrlódás lép fel [16][41][2][14][85], ezért célszerűen a Kudo-féle (m) tényezőre szűkítettem a vizsgálatokat. A két tényező közötti kapcsolat legegyszerűbben a (42) összefüggéssel fogalmazható meg:

$$m = 1 - k \tag{42}$$

Minden bizonnyal létezik pontosabb megfogalmazás is, de ez a kiemelt egyszerűsítő feltételezés már alkalmazható [72].

A továbbiakban ismertetem, hogyan lehet a (9) és (38), (39) összefüggések felhasználásával a zömített munkadarab jellemző geometriai adatai (R, H, h) alapján a Kudo-féle súrlódási tényező értékét meghatározni, vagy a Kudo-féle súrlódási tényező ismeretében a hordósodó munkadarab 3D-s geometriai modelljét elkészíteni és azt felhasználni. Egy adott előzömítési feladatnál ismertnek tekinthető az R kiinduló rádiusz, H kiinduló magasság és a zömített munkadarab h magassága.

Ilyen adatok mellett a (38), (39) összefüggések alkalmazásával, szimuláció segítségével meghatározhatók az előforduló r_{min} és r_{max} értékek a k függvényében (36. ábra).



36. ábra: *Az r_{min} és az r_{max} értékek változása a k függvényében*

Az adatok elemzése alapján arra a következtetésre juthatunk, hogy az r_{min} és az r_{max} sugarak és a k tényező között funkcionális összefüggés van, és az összefüggés regressziós görbével (egy másodfokú polinommal) bármilyen zömítési feladatnál meghatározható (36. ábra). A másodfokú polinom meghatározható 3 értékpár alapján. A kapcsolat törvényszerűsége tehát felhasználható arra, hogy az $r_{max}=f(k)$, vagy a $k=f(r_{max})$, közelítő függvényt 3-3 értékpár alapján állítsuk elő.

Korábban utaltam arra, hogy $k=1$ esetén a munkadarab nem hordósodik, azaz $r_{min}=r_{max}$. Ezek az értékek a térfogat-állandóság alapján könnyen meghatározhatók. A $k=0$ értéknél $r_{min}=R$ és r_{max} értéke a (20) összefüggésből kiszámítható a $z=h/2$ behelyettesítéssel. Ezzel a 3 értékpárból kettőt már ismerünk. A harmadik érték meghatározásához a matematikai modellezésnél a számítási ciklust egy célszerűen megválasztott közbenső helyen kell alkalmazni (pl. $k=0,5$). A (20) összefüggés alkalmazása az r_{min} ismeretét igényli.

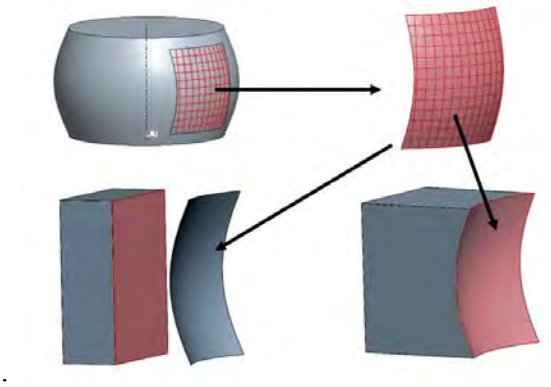
Belátható, hogy a $k=f(r_{max})$ közelítő összefüggés meghatározásához a számítási ciklust nem kell egy egész pontháló adataival elvégezni, elegendő csak a sarokpont sugárirányú elmozdulásait figyelembe venni.

Ha már meghatároztuk a $k=f(r_{max})$ függvényt, akkor az felhasználható egy kísérlet kiértékeléséhez. A kiértékelésnél meg kell adni a kiinduló H, R geometriai adatokat, a zömített munkadarab h magasságát és a zömített munkadarab r_{max} legnagyobb sugarát.

A MathCAD matematikai szoftverrel elkészített program elvégzi a számítási ciklust, meghatározza a $k=f(r_{max})$ függvényt, abba behelyettesíti az r_{max} értékét.

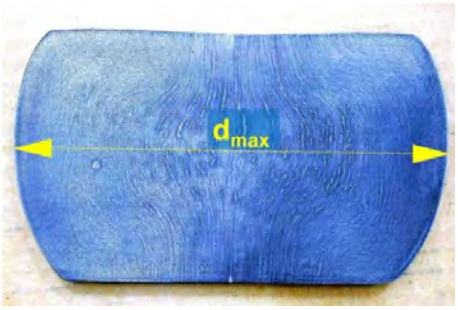
A számítás eredménye a zömítést jellemző (k) anyagáramlási tényező lesz. A (k) anyagáramlási tényező ismeretében már a (42) összefüggéssel adódik a súrlódási tényező értéke.

A számítási algoritmus Pro/Engineer szoftverrel parametrikusan összekapcsolható és előállítható a valóságot jól megközelítő 3D-s CAD geometriai modell. A geometriai modell a technológiai tervezésen túlmenően a zömített geometria stabil megfogására alkalmas robotkar fogófelületének tervezésénél is felhasználható [72][77] (37. ábra).



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

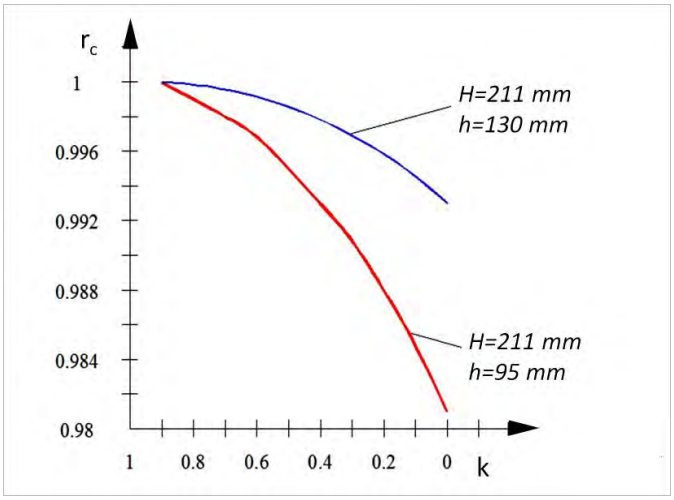
A bemutatott algoritmus szerinti 3D-s geometriai modell mindössze a darabolt alapanyagra jellemző geometriai adatok *D, H* és egy zömített munkadarab d_{max}, *h* méretei alapján előáll. Ugyanezen elvi alapokkal a 3D-s geometriai modell előállítható, ha az *R* kiinduló rádiusz, *H* kiinduló magasság és a zömített munkadarab *h* magasságán kívül a Kudo-féle súrlódási tényező értékét adjuk meg. A kísérleti próbadarabok szálelrendeződése alapján megállapítható, hogy a tényleges zömítést a részleges letapadás jellemzi (38. ábra). A matematikai modellnél a letapadás jelensége nincs értelmezve, a kapott súrlódási tényező egy közelítő, átlagos értékként kezelhető.



38. ábra: *A zömített kovácsdarab szálszerkezete*

3.1.4. A matematikai modell alkalmazási korlátai

A súrlódási tényező meghatározásánál abból indultam ki, hogy a valós munkadaraboknál és az általunk választott, kinematikailag megengedett sebességmezőnél is a profilgörbe jól leírható egy másodfokú polinommal. Ez a megállapítás a (38), (39) sebességmezővel végzett modellezésnél csak korlátozottan igaz. Azt is jeleztem, hogy a közelítő függvény annál pontatlanabb, minél nagyobb a hordósodás a matematikai modellnél. A hordósodás növekszik, ha a zömítés mértéke és/vagy a súrlódási tényező értéke nő [72]. Ezt szemlélteti a 39. ábra, ahol a közelítő függvény pontosságát korrelációs együtthatóval fejeztem ki.



39. ábra: *A közelítést befolyásoló tényezők*

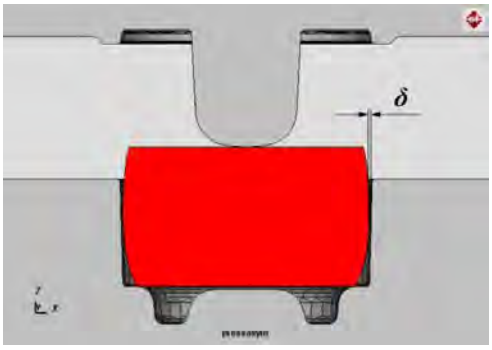
A 39. ábra a korrelációs együtthatók értékeivel jól szemlélteti a kapcsolatok szorosságát. Az ábrán kék görbe mutatja a kisebb, piros görbe a nagyobb magasságcsökkenéssel (Δh) zömített próbatestek korrelációs együtthatói (r_c) és az anyagáramlási tényező (k) között fennálló kapcsolatot.

Az alkalmazási korlátok megfogalmazásánál az a cél, hogy kizárjuk a kiértékelésből azokat az eseteket, amelyeknél a matematikai modell már pontatlan eredményt ad. A 39. ábrán bemutatott eredmények ennek a célkitűzésnek megfelelnek, azonban a gyakorlat számára nehezen értelmezhetők.

A megengedhető pontatlanság meghatározásánál éppen ezért a szerszámüreg és a zömített munkadarab egyoldali profilgörbéi között empirikusan meghatározható legkisebb távolságot (hézagot) vettem irányadónak. Ideálisan hordósodó felület esetén a szerszámüreg és a munkadarab egyoldali profilgörbéi között a legkisebb távolság a

zömített magasság felénél mérhető. Ilyenkor a hordósodás mértéke függ a súrlódási tényezőtől, a munkadarab kiinduló geometriai adataitól *H, D*, a zömített *h* magasságtól.

Empirikus adatok alapján, 1 kg-nál nagyobb tömegű kovácsportfólió viszonylatában 0,5 mm az a korlát, melynél kisebb üreghézag (δ) a folyamat normál paraméteringadozásai miatt már nem alkalmazható (40. ábra).



40. ábra: *A szerszám és munkadarab közötti legkisebb üreghézag*

Az üreghézag maximális méretét szorosan illesztett technológiáknál legalább 1 mm-re és legfeljebb 2-2,5 mm-re szokás választani. Ebből a gyakorlati megfontolásból következik, hogy a hordósodás profilgörbéjének elméleti közelítési hibájára a „holt tartomány” (0,5 mm) felhasználható. A valóságos kovácsolási folyamat pontossági igényeit ismerve a matematikai modell korlátait a következőképpen adtam meg:

- a kívánt zömített magasságnál kimentésre kerültek a palástfelületen felvett pontok koordinátái
- a kimentett pontok alapján regresszió-számítással meghatároztam a pontokat legjobban közelítő másodfokú polinom együtthatóit
- különböző magasságoknál megvizsgáltam, hogy milyen eltérések adódnak a közelítő függvény felhasználásával meghatározható határoló pontok és a kimentett pontok között
- a matematikai modell alkalmazhatóságát úgy korlátoztam, hogy a vizsgált pontoknál a legnagyobb eltérés nem lehetett nagyobb, mint a megfogalmazott pontossági igény

A kísérlet általános és speciális (5. sz. táblázat) adatai:

- anyagminőség: 41CrS4
- darabolási méret: Ø50x105 (L/D=2,1)
- tömeg (27 db adatai alapján): 1,61 kg +0,02/-0,01 kg (41. ábra)

- kenőanyag: Aquanet LS grafit alapú vizes szuszpenzió
- szerszámfelület érdessége: Ra ≈ 1,6
- gyártósor: 25 MN MAXIMA kovácssajtó
- a szerszámok felületi hőmérséklete a 18. db zömítése után: 127 °C, 121 °C

5 sz. táblázat:

db	*zömítési magasság h [mm]*	*kenőanyag keverési aránya [térfogat %]*	*zömítési hőmérséklet T [°C]*	*mért zömített magasság h [mm]*	*legnagyobb zömített átmérő d_{max} [mm]*
1	66 (átlag: 64,9)	száraz kenés	1193	65,17	67,62
2			1158	65,03	67,73
3			1155	64,93	67,1
4		1:4 (20%)	1213	64,4	66,67
5			1210	64,5	67
6			1214	64,97	67,77
7		2:3 (40%)	1190	65,01	66,6
8			1213	64,98	66,72
9			1190	65,05	66,79
1	50 (átlag: 49,7)	száraz kenés	1192	50,05	77,47
2			1230	50,18	77,72
3			1175	49,56	77,68
4		1:4 (20%)	1157	49,75	76,85
5			1140	49,14	77,15
6			1225	49,85	77,96
7		2:3 (40%)	1208	49,61	74,57
8			1176	49,41	77,37
9			1200	49,56	77,25
1	33 (átlag: 33,3)	száraz kenés	1190	33,02	93,61
2			1226	33,39	93,34
3			1290	33,51	94,62
4		1:4 (20%)	1220	33,38	93,37
5			1204	33,23	93,33
6			1192	33,48	93,28
7		2:3 (40%)	x	x	x
8			1171	33,43	93,11
9			1252	33,52	93,12

x: nem értékelhető kísérlet

A kapott eredmények alapján a matematikai modell alkalmazhatóságát MathCAD szoftver segítségével fejeztem ki fajlagos hibaértékre, illetve korrelációs együtthatóra.

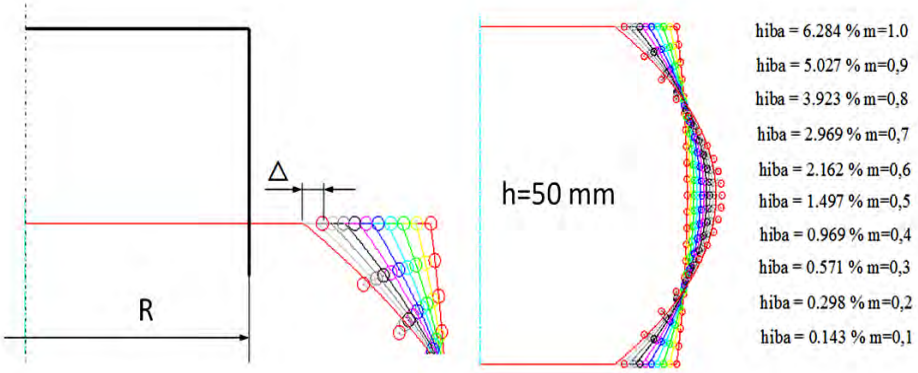
A hiba- és korrelációszámításokat *H=105* mm, *D=50* mm kiinduló méretű mintán, különböző súrlódási tényezővel (5. sz. táblázat), 66, 50 és a 33 mm-es zömítési magasságokra végeztem el (41. ábra).

41. ábra: *Zömítési kísérletek - II*

A fajlagos hiba meghatározására az alábbi összefüggést alkalmaztam:

$$\chi = \frac{\Delta}{R} 100 \tag{43}$$

A matematikai modell által meghatározott határoló pontok és a pontokra illesztett másodfokú polinom illeszkedésének fajlagos hibaértékeit a 42. sz ábra szemlélteti.



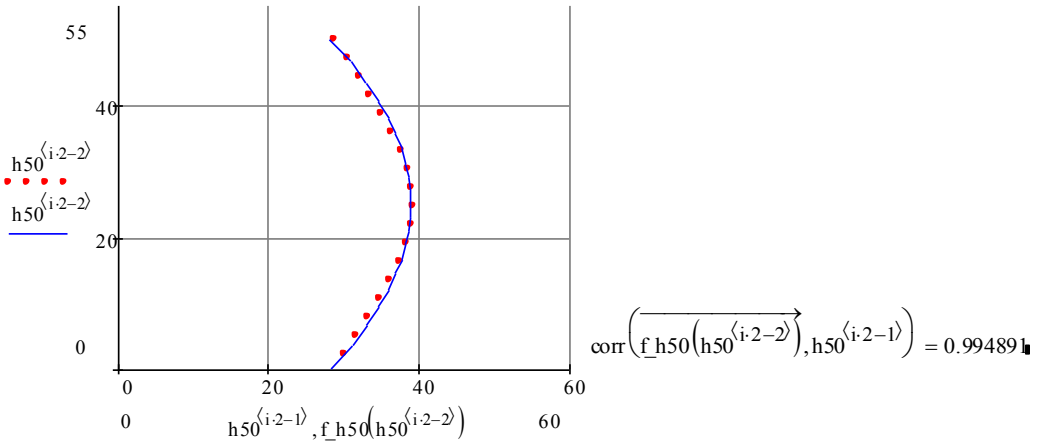
42. ábra: *A matematikai modell profilpontja és a közelítő függvény közötti legnagyobb eltérések értelmezése*

Kimutatható, hogy a súrlódás a közelítés pontosságát rontja. A matematikai modell által meghatározott profilpont és a közelítő függvény segítségével számolt profilpont között a legnagyobb eltérés a $z=0$ és a $z=h$ helyeken adódik, ezért a közelítés a legnagyobb átmérőnél (d_{max}) is biztonsággal alkalmazható.

A megengedhető legkisebb távolság különböző kovácsportfóliók viszonylatában eltérő lehet.

A matematikai modell által meghatározott profilpontok és a közelítő függvény olyan korrelációs együtthatóit kerestem, melyek az adott zömítési magasságon, adott súrlódási tényező mellett a megadott pontossági igényeket éppen kielégítik (43. ábra).

A 43. ábra függőleges tengelyén a beállított zömítési magasság (h50), vízszintes tengelyén a matematikai modell (pontvonal) és a közelítő függvény (folytonos vonal) profilgörbe pontjainak sugárirányú értékei láthatók. A legnagyobb eltéréshez (Δ) tartozó korrelációs együttható leolvasható.

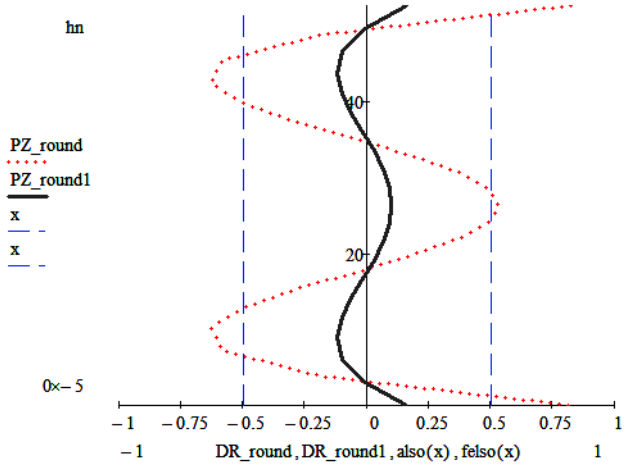


43. ábra: *A korrelációs együttható 0,5 mm fajlagos illeszkedési hibánál MathCAD környezetben (m=0,6; h=50 mm)*

A modell alkalmazási korlátainak vizsgálatakor a korábban megfogalmazott feltételt kielégítő maximális eltérés engedhető meg a matematikai modell felhasználásával kapott határoló pontok (pontvonal) és a pontokat közelítő másodfokú polinom (folytonos vonal) között. A közelítő függvény regresszió-számítással meghatározható [76]. *A számításokat elvégezve megállapítottam, hogy a kívánt oldalankénti pontatlanságot (0,5 mm üreghézag) nagyobb, mint 0,995 korrelációs együtthatóhoz tartozó értékek halmaza alkotja (43. ábra), azaz a modell ebben a tartományban alkalmazható.*

A korrelációs együttható megengedhető értékét elsősorban a munkadarab és a szerszám között megengedett üreghézag befolyásolja. Ez a megközelítés lehetővé teszi egy egyszerű, azonos gyártási körülmények között előállított termékcsaládra vonatkozó alkalmazhatósági görbe felvételét (44. ábra). A 44. ábrán egy megfelelő (folytonos vonal) és egy nem megfelelő (pontvonal) eredménnyel zárult 0,5 mm pontossági korlátnak megfelelő beállításokkal végzett zömítési analízis eredménye látható [69].

A 44. ábra függőleges tengelyén a beállított zömítési magasság (hn), vízszintes tengelyén a matematikai modell profilgörbe pontjainak várható Δ (42. ábra) eltérései (pontvonal és folytonos vonal) valamint az engedélyezett eltérést kijelölő határgörbék (szaggatott vonal) láthatók.



44. ábra: *Pontossági vizsgálat eredménye 0,5 mm fajlagos illeszkedési hibánál MathCAD környezetben, m_1=0,3 (folytonos vonal) és m_2=0,7 (pontvonal), h=50%*

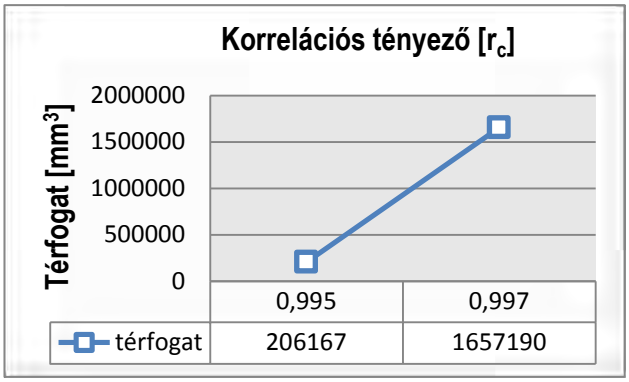
Az alkalmazási korláton belül a súrlódási tényező $k=f(r_{max})$ vagy a súrlódási tényező ismeretében a zömített munkadarab profilgörbéje $r_{max}=f(k)$ hasonló zömített darab egyszerű méretellenőrzése alapján megfelelő pontossággal meghatározható.

Viszonyítási alapul korábban meghatároztam a 2. sz. zömített kísérleti mintadarab súrlódási tényezőjének várható értékét Burgdorf-féle gyűrűzömítő vizsgálat és térfogatállandó parabolikus közelítés segítségével, mely *m=0,47* értékre adódott.

Alkalmazva az új MathCAD algoritmust, az ismert r_{max} (átlagérték)= *80,365* mm (13. ábra) valamint a *H=211*, *D=100* mm és *h=95* mm adatok megadásával a súrlódási tényező értéke **m=0,45**.

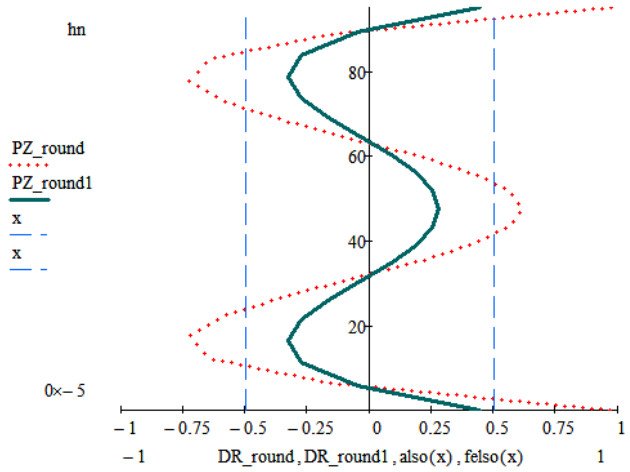
Korábban említettem, hogy az összefüggés azonos gyártási körülmények között előállított termékcsaládra alkalmazható. A 45. ábrán látható korrekciós diagram azonos L/D viszonyokkal zömített próbadarabok térfogata és a korrelációs tényező közötti kapcsolatot mutatja.

Alaptérfogatnak az Ø50x105 mm méretű próbatest térfogatát tekintettem, míg a példában szereplő Ø100x211 mm méretű próbatest (egy másik termékcsalád) térfogatát a 0,5 mm üreghézaghoz tartozó korrelációs együtthatóval ábrázoltam. A térfogatok közötti összefüggés pontosan 2^3. A példában szereplő mintadarab magasságcsökkenése 55%-os, a korrelációs tényező: r_c=0,996.



45. ábra: *Kapcsolat a korrelációs tényező és a zömített térfogat között 0,5 mm üreghézag esetén*

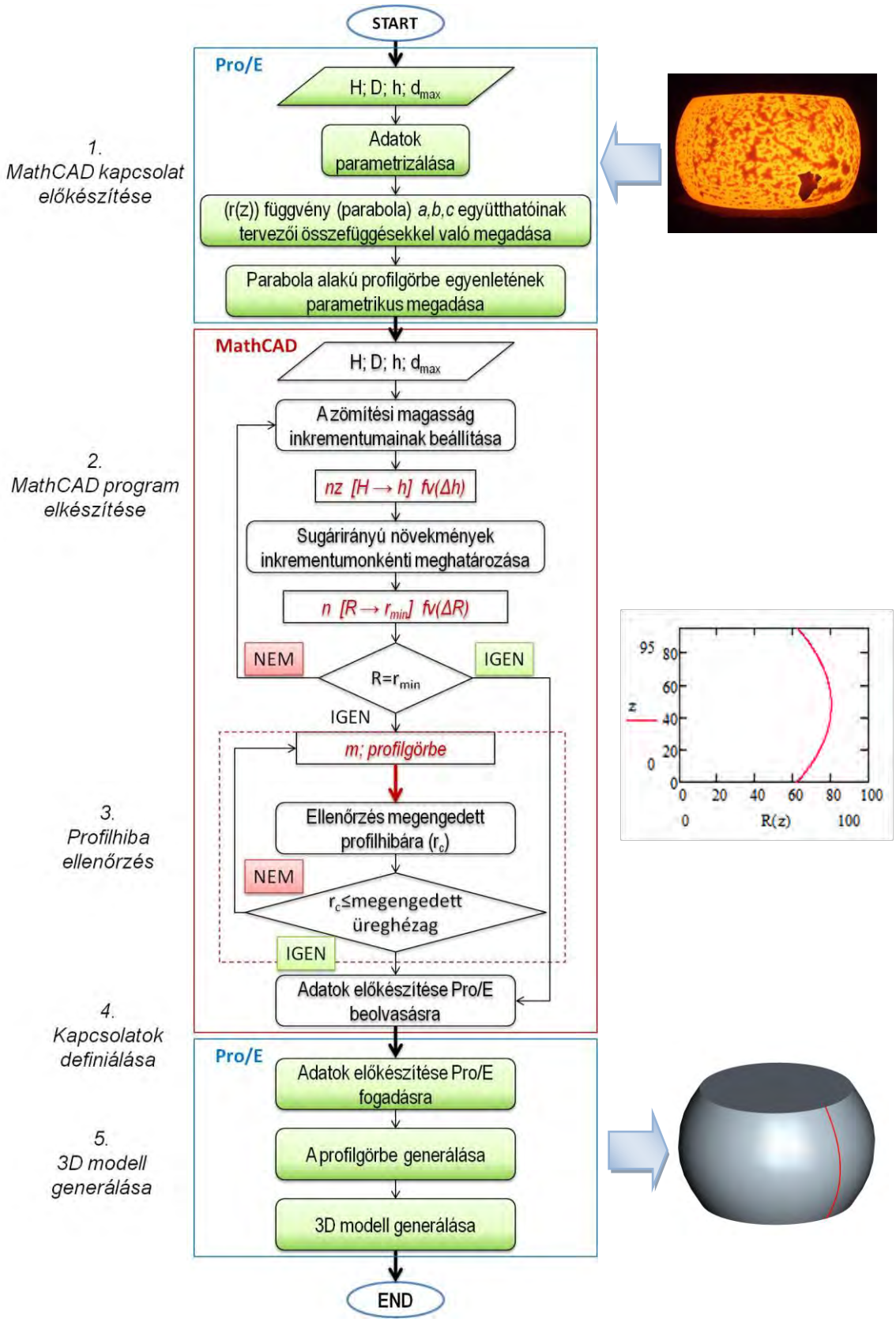
A beállított 0,5 mm üreghézag korlátokkal a program ekkora mértékű zömítést 20%-os térfogat arányban higított kenőanyagnál nagyobb sűrűségű kenőanyaggal (40%) javasol (46. ábra). A javaslat összhangban van 45. ábrán bemutatott összefüggéssel. Az ábra tengelyeinek értelmezése azonos a 44. ábránál ismertetett értelmezéssel.



46. ábra: *Pontossági vizsgálat eredménye 0,5 mm fajlagos illeszkedési hibánál MathCAD környezetben, m=0,45, h=45%, kenőanyag hígítás: 1:4 nem javasolt (piros) kenőanyag hígítás: 2:3 javasolt (zöld)*

3.1.5. A matematikai modell algoritmusa

A matematikai modell Pro/E - MathCAD programok kapcsolt alkalmazásán alapuló algoritmusát a 47. ábra szemlélteti. A kapcsolt alkalmazásnál célszerű a Pro/E és MathCAD fájlokat egyazon könyvtárban tárolni.



47. ábra: *A Pro/E – MathCAD program algoritmusa*

A MathCAD program önállóan is használható, egyrészt r_{max} ismeretében a súrlódási tényező meghatározására, másrészt a súrlódási tényező ismeretében r_{max} meghatározására. Mindegyik esetben a (20) sz. függvényt alkalmazza a profilgörbe meghatározásához. A $z=h$ és $z=0$ helyeken kiszámítja a r_{min} értékeket, melyeknek ismeretében a profilgörbe már megrajzolható. A program feltételezi a forgásszimmetrikus zömített munkadarabot valamint azt, hogy $z=h$ és $z=0$ helyeket az r_{min} rádiuszok azonosak, valamint r_{max} a $z=h/2$ helyen alakul ki.

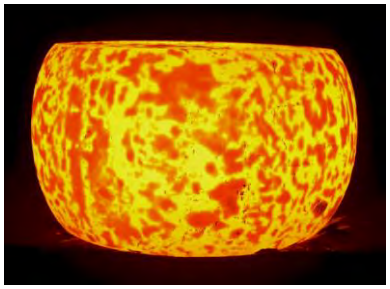
I. tézis

Tömör, hengeres testek párhuzamos nyomólapok közötti melegzömítésénél az irodalom alapján választott, kinematikailag megengedett, szimmetrikus hordósodást eredményező sebességmező anyagáramlási tényezője (k) összefüggésbe hozható a Kudo-féle (m) súrlódási tényezővel. Az ***m=1-k*** *összefüggés alapján az ipari gyakorlat számára megfelelő pontossággal meghatározható a kiinduló és a zömített geometriai jellemző adatainak ismeretében a Kudo-féle súrlódási tényező értéke, illetve a súrlódási tényező ismeretében a zömített munkadarab várható háromdimenziós geometriája modellezhető.*

Az I. tézist alátámasztó saját hivatkozások: [26][69][72][73][75][76][77]

3.2. A matematikai modell megfogalmazása általánosabb alakban

A valóságos, melegen alakított kovácsdarabok zömítéskor - a szerszám és munkadarab közös érintkező felületeinek érdessége, a kenési technológia, a felületek érintkezési időtartama valamint a felületegységre eső fajlagos erő, az alakítógép kinematikai viszonyai, inhomogén hőmérséklet eloszlás miatt - nem minden esetben vesznek fel ideális hordós alakot (48. ábra).



48. ábra: *Aszimmetrikusan hordósodott kovácsdarab fényképe kismértékű perspektivikus torzulással*

A modell általánosításánál a hordósodást aszimmetrikusnak tekintjük, azaz a munkadarab legnagyobb átmérője nem a *z=h/2* helyen adódik, de továbbra is feltételezzük a tengelyszimmetrikus deformációt és azt, hogy a tengelyirányú sebességkomponens változását a (34) harmadfokú polinom írja le. Az általánosított modellnél a tengelyirányú sebesség inflexiós pontja a *z=hx* helyen van (*0≤x≤1*) azaz, ezen a helyen az $\dot{\varepsilon}_z$ alakváltozási sebesség extremális (44):

$$\frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} = 6ahx + 2b = 0\,. \tag{44}$$

Az ideális hordósodásnál figyelembe vett peremfeltételek alapján megfogalmazott egyenletek és a (44) összefüggés segítségével az *a*, *b*, és *d* együtthatók meghatározhatók, a tengelyirányú $w_z(z)$ sebességkomponens az egyelőre ismeretlen *c* együtthatóval felírható:

$$w_z(z) = \frac{ch+v}{h^3(3x-1)}z^3 - \frac{3x(ch+v)}{h^2(3x-1)}z^2 + cz\,. \tag{45}$$

Felhasználva a (24) összefüggést a sugárirányú sebességkomponens a differenciálegyenlet megoldásával meghatározható:

$$w_r(r,z) = -\frac{1}{2h^3(3x-1)}\left(\left(3chz^2 + 3vz^2 - 6xh^2cz - 6xhvz - ch^3 + 3ch^3x\right)r\right). \tag{46}$$

Bevezetve *c* helyén a *k=-ch/v* dimenzió nélküli paramétert a *k* anyagáramlási tényező [23] segítségével a sebességkomponensek a (47) és (48) összefüggések szerinti alakra hozhatók:

$$w_z(z) = \frac{-kv+v}{h^3(3x-1)}z^3 - \frac{3x(-kv+v)}{h^2(3x-1)}z^2 - \frac{kv}{h}z\,, \tag{47}$$

$$w_r(r,z) = -\frac{1}{2h^3(3x-1)}\left(\left(-3kvz^2 + 3vz^2 + 6xhkvz - 6xhvz + kvh^2 - 3kvh^2x\right)r\right). \tag{48}$$

Az egyenleteket rendezve előállnak a $w_z(z)$ és $w_r(r,z)$ sebességkomponensek módosított értékeit leíró összefüggések (49), (50):

$$w_z(z) = -\frac{zv\left(z^2k - z^2 - 3zkhx + 3zhx - kh^2 + 3kh^2x\right)}{h^3(3x-1)}, \tag{49}$$

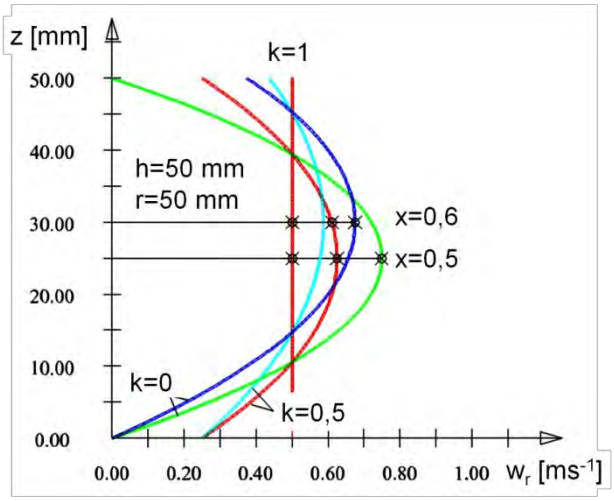
$$w_r(r,z) = \frac{1}{2}\frac{rv\left(3z^2k - 3z^2 - 6zkhx + 6zhx - kh^2 + 3kh^2x\right)}{h^3(3x-1)}. \qquad (50)$$

Megállapítható, hogy (49), (50) összefüggések is nem hordósodó anyagáramlási sebességmezőhöz vezetnek *k=1* esetén. Ez megfelel az *m=0* súrlódásnélküli zömítésnek. Ilyenkor az alakváltozás homogén lesz.

Ha *x=0,5* és *k=0*, akkor a modell szerint teljes letapadás lép fel. Teljes letapadásnál a szerszám és a munkadarab érintkezésénél nincs átmérő-növekedés. A (49), (50) sebességkomponensekkel a *k=0*, *x≠0,5* esetén a teljes letapadás csak részben értelmezhető.

Ha *k=0* és *0,5<x≤1* akkor a *z=0* helyen nincs átmérő-növekedés, de a *z=h* helyen igen. Ilyenkor az aszimmetrikus alaknak egyik oka lehet, hogy a *z=0* és *z=h* helyen eltérő a súrlódási tényező értéke.

Ha ezt elfogadjuk, akkor a letapadás [26] csak az egyik szerszámlapnál következhet be. A (49), (50) sebességkomponensekkel az egyoldali letapadás mindig csak a *z=0* helyen lehetséges, és ennek megfelelően a munkadarab legnagyobb átmérőjének helyét meghatározó *x* érték mindig nagyobb, mint *0,5*. A letapadás helyén a sugárirányú sebességkomponens értéke zérus [69] (49. ábra).



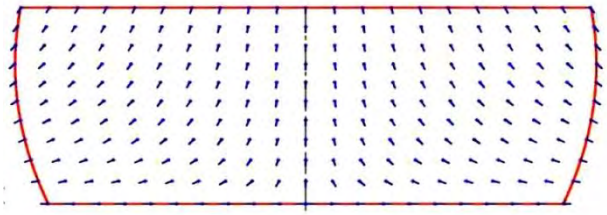
49. ábra: *A sugárirányú sebességek változása a magasság függvényében különböző x és k értékeknél*

A (49), (50) esetén *z=0* helyen a sugárirányú sebességkomponens értéke mindig független az *x* értékétől (51).

$$w_r(r,0) = \frac{1}{2}\frac{kv}{h}r. \qquad (51)$$

Ilyen tekintetben a modell szerint nincs különbség a szimmetrikus és az aszimmetrikus zömítés között. Ezt az észrevételt később felhasználom (61) a kopási tényező meghatározásánál. Tapasztalatom szerint a legnagyobb átmérő a gyakorlatban is többnyire felfelé tolódik el (48. ábra). Ebben minden bizonnyal szerepet játszik az is, hogy az alsó és felső szerszámlapnál eltérőek a súrlódási viszonyok, az érintkezési időtartamok, a termikus folyamatok. Figyelembe veendő az alakító gép kinematikai jellemzője is.

A zömítés folyamatának modellezéséhez program készült, AutoLISP programnyelven. Adott H, R kiindulási geometria, h zömítési magasság, k anyagáramlási tényező és az x értéke ismeretében a (49), (50) sebességkomponensekkel modellezhető a zömítés folyamata, és kirajzoltathatók a pillanatnyi sebességvektorok (50. ábra).



50. ábra: *A matematikai modellel előállított nem ideálisan hordósodott alakzat*

Simufact FVM módszerrel ellenőriztem egy valóságos kovácsdarab zömítési szimulációján keresztül a feltevés helyességét. A valós kovácsdarab fotóját az 51. ábra mutatja.

51. ábra: *A valós kovácsdarab képe*

Pre-processzálás főbb adatai.

- folyamat

  melegzömítés 3D, FV megoldó, elemméret 4 mm, löket 75,8 mm, löketirány lefelé

- alakítógép

  excenter sajtó 40 MN, fordulat 40 min^{-1}

- komponensek
  - szerszámok
    - anyagmodell geometria és minőség

      merev anyagmodell hővezetéssel, geometria Pro/E adatbázisból beolvasott, anyagminőség a SF adatbázisból L6

    - termikus paranéterek

      szerszámtömbök átlaghőmérséklete 200 °C, hőzsugorral korrigált geometria, környezeti hőátadási tényező (HTC) konstans 20 W/m^2K, hőátadási tényező az érintkező felületek határán konstans 2500 W/m^2K, emissziós tényező 0,25

  - munkadarab
    - anyagmodell geometria és minőség

      merev képlékeny anyagmodell, geometria SF által generált geometria (Ø 100x161 mm) anyagminőség a SF adatbázisból AISI 1045 (T=900-1200 °C)

    - termikus paramétek

      munkadarab hőmérséklete 1200 °C, hőzsugorral korrigált geometria, környezeti hőátadási tényező (HTC) konstans 200 W/m^2K, emissziós tényező konstans 0,79

- hálózás, újrahálózás

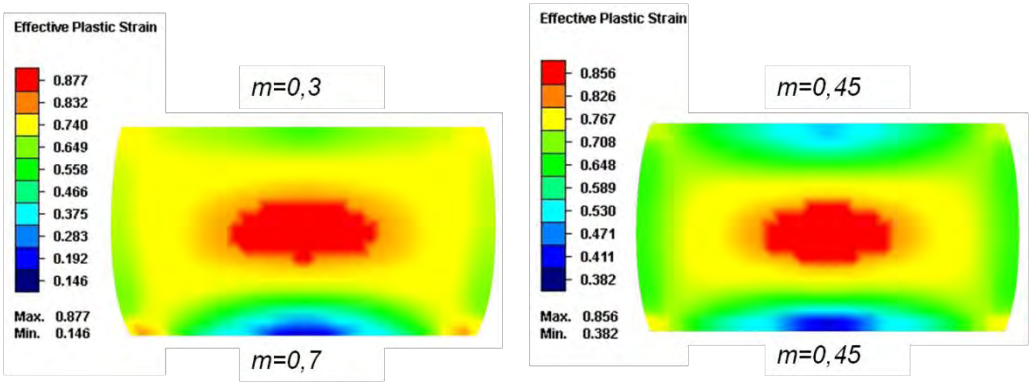
  elem geometria tetrahedral, újrahálózás RET (rectangular) modullal

- súrlódási tényező

  konstans Kudo féle súrlódási tényező a szerszámfelületekhez rendelve, első futtatás m=0,45-0,45, második futtatás m=0,3 (felső szerszám)-0,7 (alsó szerszám)

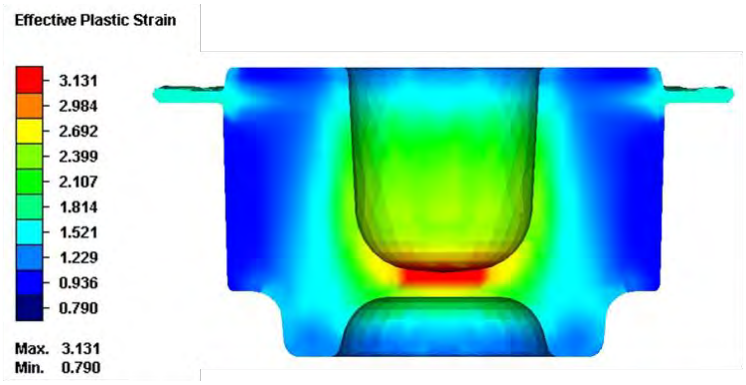
Poszt-processzálás főbb adatai.

A vizsgálatok megerősítették, hogy eltérő súrlódási viszonyok esetén valóban előállítható az aszimmetrikus hordósodás, az általános matematikai modell ilyen esetekben alkalmazható (50. és 52. ábra).



52. ábra: *Az eltérő súrlódási viszonyok okozta aszimmetrikus hordósodás FVM vizsgálata*

Megállapítottam, hogy a 3.1.4. alfejezetben megfogalmazott alkalmazhatósági korlátok excenter, forgattyús illetve folyató sajtókra jellemző eltolt osztófelületű üregnyitás esetén alkalmazhatók a leírt módon, növelt biztonsággal (51. és 53. ábra).



53. ábra: *A készresajtolt kovácsdarab képe eltolt osztósík kialakítással.*

II. tézis

Az 1. tézisben felhasznált sebességmezőt általánosítottam, a tengelyirányú sebességkomponens inflexiós pontjait a z=h/2 helyett a z=hx (0 ≤ x ≤ 1) helyen vettem fel. Megállapítottam, hogy az általánosított sebességmezőnél is kapcsolat ismerhető fel az anyagáramlási tényező (k) értéke és a Kudo-féle (m) súrlódási tényező között. A z=0 helyen a sugárirányú sebességkomponens értéke független az (x) értékétől, amely lehetővé teszi az (x) értékétől független kopásvizsgálatot.

A II. tézist alátámasztó saját hivatkozások: [26][69]

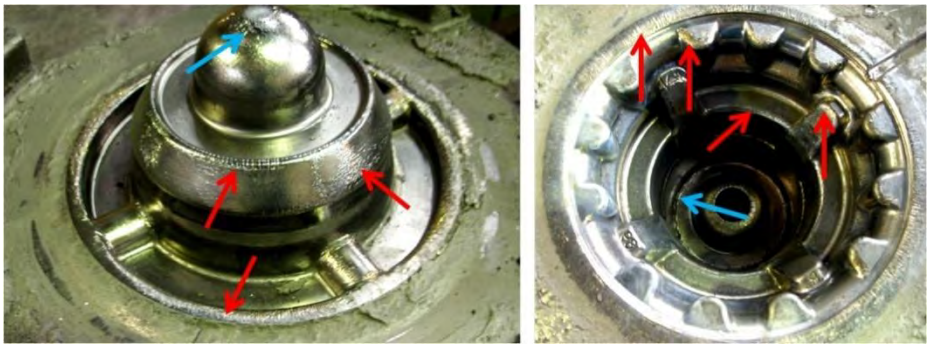
3.3. Melegalakításnál használható új kopásvizsgálati eljárás fejlesztése

3.3.1. Kísérleti szerszámok kopáskép vizsgálata

Bonyolult kovácsdarabok egyidejűleg több kopásfajta előfordulását is feltételezik. A kopásfajták vizsgálata során megállapítható, hogy a hagyományos melegalakító NNS szerszámok tönkremenetele alapvetően az abrazív kopások miatt következik be [34][67] (54. ábra). Ennek kiemelt oka, a munkadarab revés felülete. A revét nem alakítható, kemény vasoxid vegyületek alkotják.

A Rába kovácsüzemében használatos kovácsszerszámok többnyire NK2 (MSz 4352:1984) anyagminőségből készülnek. A működő felületek nemesített keménysége átlagosan 370-400 HBS (40-43 HRC), érdességük Ra≈1,6.

A kovácsolás során a szerszám alakadó felületelemei a mechanikus igénybevételek mellett erős hőhatásnak is ki vannak téve, melynek a gyártási folyamat során összegződő hatását (felületi és felület közeli rétegekben végbemenő diffúz folyamatok) figyelembe kell venni [34][9][67].



54. ábra: *Egy NNS készre alakító szerszám, kopással (piros nyilak) és egyéb módon tönkrement felületelemei (kék nyilak)*

A szerszám alakadó felületének kilágyulásra veszélyes hőmérsékleti küszöbértéke 400-450 °C [9]. A vizsgálatokat ez alatt az érték alatt célszerű végezni a felületi kilágyulás közben bekövetkező szerszámdeformációk elkerülése érdekében, ugyanis a deformáció és a kopás, hatásában nehezen különíthető el.

3.3.1.1. A kopási tényező fizikai meghatározásának egyszerűsítő feltételei

A kovácsszerszámok hagyományosan kezelt és PVD eljárással bevont felületeinek általános kopásvizsgálatára alkalmas fizikai modellnek a 2.1. és 2.2. fejezetben leírtak alapján, síklapok között végzett zömítést választottam.

Előnyei:

- nincs felületi kilágyulás a bonyolult geometriai elemek miatt
- csak a felületek közötti relatív elmozdulás és a felületi kontaktnyomás hat a kopási folyamatokra
- viszonylag egyszerű vizsgálat, egyszerű elmozdulási viszonyok jellemzik
- a kapott eredmények könnyen kezelhetők, az egyszerű geometriákon jó közelítést adnak
- robot kiszolgálású gyártósoron elvégezhető (ismételhetőség, reprodukálhatóság)
- a vizsgálat a gyártási folyamat része lehet, így kifejezetten költségkímélő
- az előzömített munkadarab geometriája alapján a valós súrlódási tényezőre lehet következtetni [72][69]

3.3.1.2. Üzemi kísérletek nemesített és PVD bevonattal ellátott zömítő szerszámokkal

A Rába kovácsüzemében kísérletre kiválasztott, robot kiszolgálású automata melegfolyató gyártósoron használatos, zömítő alsó szerszámok működő felületeinek keménysége 48 ±2 HRC, amely az ASTM E-140:1997 szabvány szerint jó közelítéssel megfeleltethető 459-460 HBS értéknek. A szerszámok átlagos felületi érdessége: Ra≈0,4 [71][78].

A 3.3.1.1. alfejezetben ismertetett szempontok figyelembe vételével kísérleti gyártásra került sor a Rába kovácsüzemében a Lasco-III melegfolyató gyártósoron.

Az üzemi kísérlet során, 26.000 – 26.000 azonos típusú tengelycsonk kovácsdarab gyártással egybekötött zömítését végeztük el hagyományosan kezelt és PVD eljárással bevont zömítő szerszámokkal. A zömítő szerszám működő felületeinek PVD eljárással történő bevonására *nACRo*® magas hő- és kopásálló Platit bevonatot választottam: *nACRo® = nc-AlCrN/α-Si3N4*.

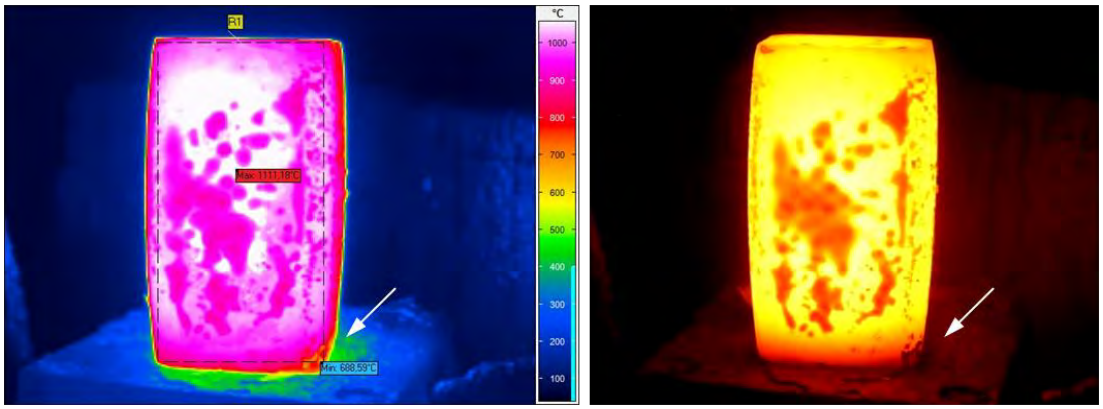
A *nACRo*® bevonat 5-6 μm vastagságú, az abráziós kopásnak ellenálló fedőréteg. A nano-kompozit szerkezete rendkívül kemény, a szilícium alapú mátrix nagy hőállóságot biztosít.

A gyártás jellemző paraméterei:

- kenés: kenés nélkül
- darabolt bugaméret: buga100 (+/-1) x159 mm (12,2 kg +/-0,15 kg)
- zömítési magasság: 135 mm
- alsó szerszám mért felületi átlaghőmérséklete a gyártás folyamán
  - zömítés előtt: 235 °C
  - zömítés után: 302 °C
- felső szerszám mért felületi átlaghőmérséklete a gyártás folyamán
  - zömítés előtt: 173 °C
  - zömítés után: 239 °C
- zömítési hőmérséklet: 1100-1150 °C

A kísérleti gyártás során műszakonkénti gyakorisággal, optikai pirométerrel és VarioCAM nagyfelbontású hőkamerával ellenőriztük a működő szerszámfelületek hőmérsékleteit és a legnagyobb értékek kerültek rögzítésre.

Az 55. ábrán a hőkamerával készült felvételen (baloldalon) és a digitális fényképen (jobboldalon) ugyanaz a kísérleti munkadarab látható közvetlenül a zömítést követően. Megfigyelhető az alsó szerszám és a munkadarab érintkező felületei között kialakult erőteljes termikus kölcsönhatás, mely döntően a viszonylag hosszú ideig tartó kenésmentes felületi érintkezés következménye.

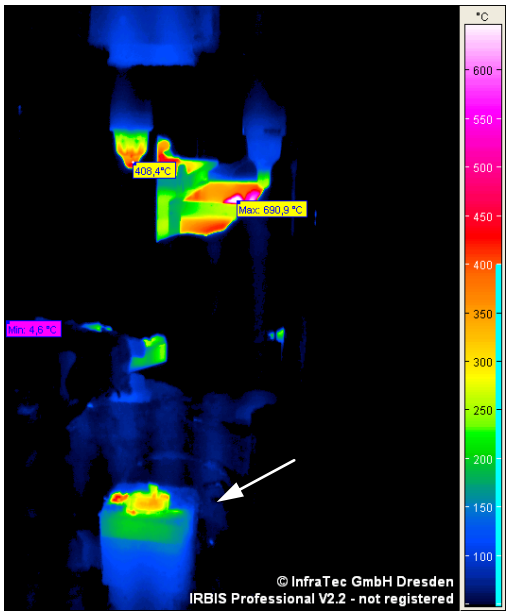


55. ábra: *A munkadarab képe közvetlenül zömítés után*

Utalva a 3.2. fejezetben ismertetett aszimmetrikus hordósodás jelenségére az 55. ábrán is aszimmetrikus hordósodás figyelhető meg azonban itt az eltérő termikus kölcsönhatások miatt. Az aszimmetrikusan hordósodott, felülettisztított munkadarab képét mutatja az 56. ábra.

56. ábra: *A munkadarab képe zömítés után, lehűlt állapotban*

Az alsó szerszám, működő felületén mért legmagasabb hőmérsékletek és a hőkamerával készített felvétel (57. ábra) alátámasztották a korábbi feltételezést a szerszámok felületi deformációjára vonatkozóan. A zömítő szerszámok felületén keletkező üreget, 26.000 - 26.000 zömítési ciklussal, tisztán a kopási folyamatok alakították ki.

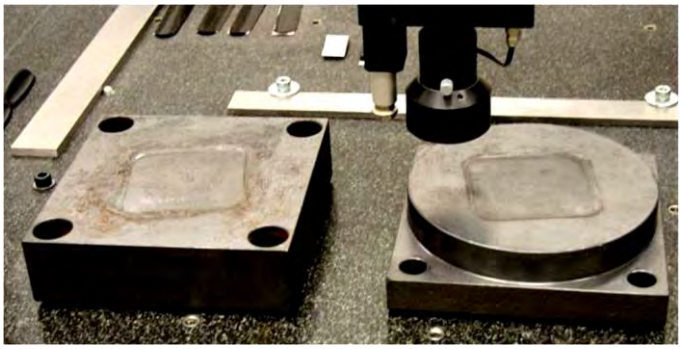


57. ábra: *Az alsó zömítő szerszám hőtérképe zömítés után (fehér nyíl)*

3.3.1.3. A kísérleti szerszámok kopásképeiből levonható következtetések

Az azonos ciklust követően a zömítő alsó szerszámfelek kopásképeit a Széchenyi István Egyetem anyagvizsgálati laboratóriumában, Mahr PMC 800, háromkoordinátás mérőgépen vizsgálták az erre a feladatra kidolgozott vizsgálati eljárás szerint [62].

Az üreg vetületi képén a súlypont helyét a GOM Gmbh ”ATOS” optikai 3D-s digitalizáló rendszer és a Pro/Engineer szoftver felhasználásával határozták meg [62]. Az 58. ábrán egymás mellett látható a PVD bevonattal ellátott (jobb oldalon) és bevonat nélküli (baloldalon) szerszám.

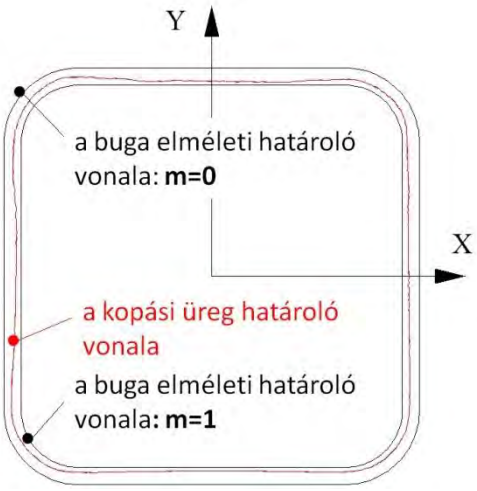


58. ábra: *A szerszámfelületek kopása 26000 – 26000 zömítési ciklus után [62]*

26.000 ciklus után szabad szemmel összehasonlítva a PVD bevonattal ellátott és a bevonat nélkül készült nyomólapokat, megállapítható volt, hogy a bevonattal ellátott szerszámnál az üreget határoló körvonal nagyobb területet zárt. A határoló körvonal geometriája a térfogat-állandóságnak megfelelően, területarányosan értelmezhető. Ebből kiindulva a PVD bevonattal ellátott felületnél kialakult kopási üreg kisebb súrlódásra utal, ugyanis minél kisebb a súrlódási tényező értéke, annál kevésbé hordósodik zömítéskor a munkadarab és annál nagyobb lesz a munkadarab és a nyomólap érintkezési felülete. Ezen logika szerint a kopási üreg eltérő vetületi nagyságából következtetni lehet a súrlódási viszonyok különbségére. A súrlódási tényező kezdeti értéke, a kezdeti érintkezési felület nagysága tehát meghatározó lehet a kopási üreg alakulására. Ez a gondolatmenet összhangban van *Ko* és munkatársai kísérleti eredményeivel [35]. Hidegalakító szerszámfelületek esetén a PVD bevonat a súrlódási tényezőt inkább növeli [83], ezért a gondolatmenet csak melegalakításra értelmezhető.

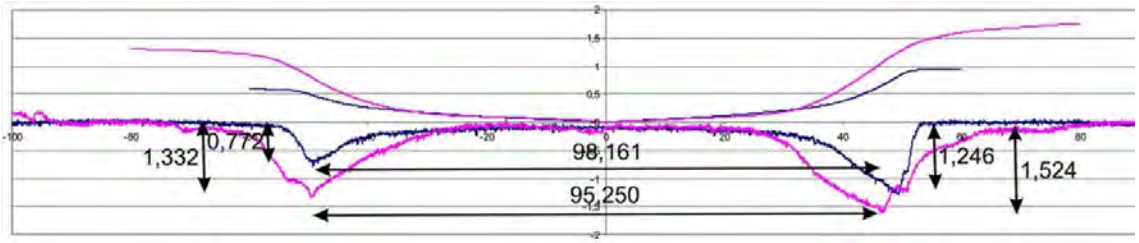
Az első zömítési ciklusnál feltételezhetően még nem keletkezik kopási üreg. Ilyen körülmények között a zömített munkadarab és a nyomólap érintkezési felületének nagyságát egyértelműen a súrlódási tényező határozza meg. Minél kisebb a súrlódási tényező értéke, annál nagyobb lesz az érintkezési felület. Ha kellő sűrűséggel meghatározzuk a határoló körvonal pontjainak koordinátáit, akkor CAD szoftver segítségével - a pontokon átmenő spline görbével - könnyen kialakítható a zárt vetületi görbe és mérhető a görbével határolt terület (59. ábra). A területarányok függvényében a Kudo-féle súrlódási tényező közelítő értéke számszerűsíthető [36].

A lenyomat alapján meghatározott súrlódási tényező nem azonos a Kudo-féle súrlódási tényezővel, de azt közelíti.



59. ábra: *A kopási üreget határoló vonal és az elméleti határok szemléltetése*

A 60. ábra a bevonattal ellátott (sötétkék színű görbe) és bevonat nélküli (lila színű görbe) szerszámfelületek méréssel meghatározott kopásgörbéit mutatja, a buga oldalélére merőleges irányban.



60. ábra: *Az oldalélekre merőleges kopásgörbék összehasonlítása [62]*

A gyártás folyamán a munkadarab inhomogén hőmérséklet eloszlása (55. ábra) inhomogén elmozdulási és nyomási viszonyokat idézett elő, ezért nem azonosak, a súlypontra aszimmetrikusak a kopási mélységek. A 60. ábrán látható, hogy a lágyabbik szerszámfelület kevésbé karakteres kopásgörbével rendelkezik, a felületi érdesség-csúcsok méretszórása is nagyobb, összhangban korábbi kutatások eredményeivel [6].

Mindkét esetben megfigyelhetők érdesség-csúcs kilengések, melyek a nagyobb revecsomók koptató hatásának következményei. A revét különböző vas-oxid vegyületek alkotják, a domináns oxid típusa az anyag kémiai összetételétől függ. A melegalakítás hőmérsékletén a töredezett Fe_2O_3 (*hematit*) és Fe_3O_4 (*magnetit*) vegyületek egyaránt veszélyesek, mivel keménységük jóval nagyobb (Fe_2O_3) illetve közel azonos (Fe_3O_4) a szerszám felületi keménységével.

Egyértelműen megállapítható, hogy összhangban korábbi kutatások eredményeivel [35] a *nACRo*® bevonattal ellátott szerszámok jól érzékelhető, jelentős kopásállóságot mutatnak. A méréssel meghatározott egyetlen zömítési ciklusra jutó átlagos kopási mélység:

- nemesített szerszámfelület:

$$z_1 = \frac{\bar{z}_{(26.000)}}{26.000} = \frac{\frac{1{,}524 + 1{,}332}{2}}{26.000} = 5{,}4923x10^{-5} \quad [mm]$$

- *nACRo*® bevonatot kapott szerszámfelület:

$$z_{1[PVD]} = \frac{\bar{z}_{(26.000)}}{26.000} = \frac{\frac{1{,}246 + 0{,}772}{2}}{26.000} = 3{,}8807x10^{-5} \quad [mm]$$

3.3.2. Kopáskép vizsgálat a MathCAD program segítségével

Az abrazív kopási folyamatok matematikai modellezésére, hivatkozva a 2.1 és 2.2 fejezetben összefoglalt irodalmi utalásokra, az Archard-féle (52) és az energetikai kopásmodell (53) egyaránt választható, gyakorlatilag azonos eredményre vezetnek [87]:

$$dw^* = K(T)\frac{N}{\hat{H}(T)}dl\,, \tag{52}$$

$$dw^* = CW_S = C(T)F_S dl\,. \tag{53}$$

A matematikai modell egyszerűsítő feltételezései:

- a zömítő szerszám hőmérséklete a zömítés folyamán nem lépi át a 400 °C hőmérsékletet, azaz keménysége állandónak tekinthető
- a zömítendő munkadarab homogén hőmérsékletmezővel rendelkezik
- a munkadarab hőmérséklete, alakítási szilárdsága az alakítás közben homogén és állandó
- csak az alsó szerszámot vizsgáljuk a nagyobb hőterhelés miatt
- a vizsgálat során letapadás nem lép fel

Az egyszerűsítő feltételezések figyelembe vételével, az Archard-féle és az energetikai kopásmodell alapján meghatározható a kopásmélység numerikus összefüggése [87][70][71], egyetlen zömítési ciklusra (54), (55):

$$z = K\sum_{i=1}^{n}\frac{\sigma_N(r,t)_{(i)}\, v(r,t)_{(i)}}{\hat{H}}\Delta t_{(i)}, \tag{54}$$

$$z = C\sum_{i=1}^{n}\tau_S(r,t)_{(i)}\, v(r,t)_{(i)}\Delta t_{(i)}. \tag{55}$$

Az (54), (55) összefüggés szerinti kopásmélység egyetlen zömítési ciklushoz tartozó meghatározásához a felületelem elmozdulások és az érintkező felületelemeken működő feszültségeloszlás inkrementumonként összegzett értékeit, valamint a kopási és súrlódási tényezőket szükséges ismerni. A süllyeszték szerszámok átlagos kopástényezője, egy adott kovácsportfólió viszonylatában (közel azonos geometriát, alakítási technológiát, szerszámminőséget feltételezve) közel azonosnak tekinthető. Ez a kopástényező a szerszámgeometria egyes elemein a geometria bonyolultságától függően változó [1][48].

A választott fizikai modell, a síklapok között végzett zömítés, a legelemibb szerszámgeometriát jellemzi (síklapok), tehát az adott kovácsportfóliót jellemző szerszám átlagos kopási tényezőjének meghatározására alkalmas. A kopási tényező a mért kopásmélység, az egy zömítési cikluson belül inkrementumonként összegzett felületelem elmozdulások és az érintkező felületelemeken működő normál feszültség-eloszlások értékei és a súrlódási tényező ismeretében meghatározható [1][48] (56):

$$\kappa = \frac{z_1}{\sum_{i=1}^{n}\sigma_{N(i)}v_{(i)}\Delta t_{(i)}}. \tag{56}$$

A fajlagos kopási tényező (dimenzió nélküli vagy Archard-féle kopási tényező) a szerszám folyási határát véve figyelembe [1][6][22] (57):

$$K = \kappa\cdot 3\hat{H} = \kappa\cdot 3(3HBS). \tag{57}$$

3.3.2.1. A súrlódási tényező meghatározása

A súrlódási tényező meghatározására a 3.1. fejezetben ismertetett módszert választottam. A módszer alkalmazásához hengeres próbatestek zömítésére volt szükség. A zömítési próbákat a Rába kovácsüzemében ugyancsak a Lasco-III melegfolyató gyártósoron végeztem el, mivel a kopásvásvizsgálatok eredményei közel azonos kovácsportfólió viszonylatában alkalmazhatók hatékonyan. A kísérleti mintadarabok képe a 61. ábrán látható.

61. ábra: *Zömített próbadarabok*

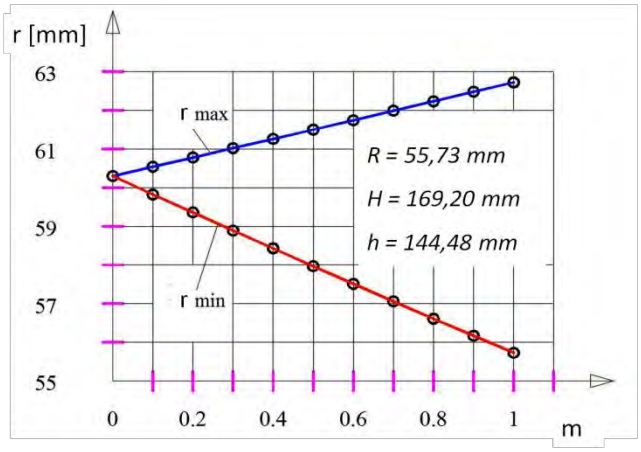
A kísérlet során, gyártási körülmények között, 10 db hengeres próbatest zömítésére került sor, frissen megmunkált, Ra≈0,25 felületi érdességű párhuzamos nyomólapok között.

Jellemző paraméterek és geometriai adatok szobahőmérsékleten:

- darabolási tömeg: m'=12,48 ±0,2 kg
- darabolási hossz: H=167 mm
- hevítési hőmérséklet: $T_{hevítés}$=1213-1226 °C → $T_{(átlag)}$=1219 °C
- kiinduló átmérő: D=110 ±0,2 mm
- zömített magasság: $h_{(hidegméret)}$=142,32-142,91 mm → $h_{(átlag)}$ =142,6 mm
- zömített felső átmérő: $d_{1(felső - hidegméret)}$=114,2-114,5 mm → $d_{1(átlag)}$=114,3 mm
- zömített alsó átmérő: $d_{2(alsó - hidegméret)}$=112,4-113,7 mm → $d_{2(átlag)}$=113,0 mm
- zömített legnagyobb átmérő: $d_{k(hidegméret)}$=121,6-122,3 mm → $d_{k(átlag)}$=122,1 mm
- kenés: kenés nélküli
- alakítógép:10 MN LASCO-III folyató sajtó
- szerszámfelületek keménysége: 48 ±2 HRC
- szerszámok mért felületi hőmérséklete: $T_{alsó - max.}$= 302 °C; $T_{felső - max.}$= 239 °C

A kísérleti darabok névleges geometriai adatainak az alakítás hőmérsékletére átszámított méreteivel végeztem el a 3.1. fejezetben ismertetett MathCAD szimulációkat. Korábban a 3.1.3. fejezetben utaltam arra, hogy az r_{min} és az r_{max} sugarak valamint az m tényező között funkcionális összefüggés van, és az összefüggés regressziós görbével (egy másodfokú polinommal) a 3.1.4. fejezetben javasolt korlátozó feltételekkel meghatározható.

Az összefüggés fordítva is felírható, mely alapján egy adott r_{max} rádiusz esetén a súrlódási tényező értéke meghatározható (62. ábra).



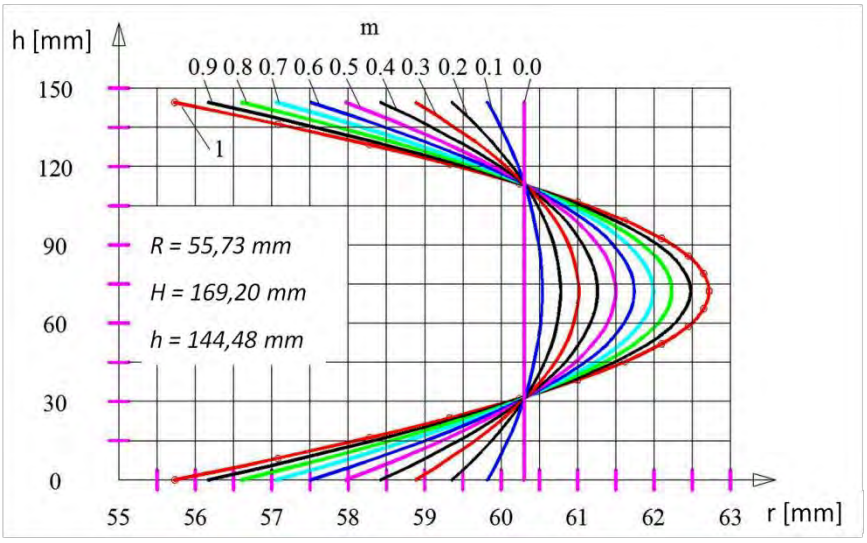
62. ábra: *Az r_{min} és az r_{max} értékek változása a Kudo-féle súrlódási tényező függvényében*

A kiértékelésnél figyelembe kell venni az alakítás sajátos hőmérsékletviszonyait. A munkadarab korrigált sugara lineáris hőtágulással számolva:

$$R_{1100} = R_{20}\left(1+\alpha_{PT}\Delta T\right). \tag{58}$$

A legnagyobb zömített átmérők átlaga az (58) összefüggés alapján az alakítás hőmérsékletén: $d_{k(átlag)}$=123,72 mm, $r_{max(1100)}$=61.86 ≈62 mm. Ezt az értéket felhasználva a 62. ábra alapján leolvasható a Kudo-féle súrlódási tényező közelítő értéke, amely: **m=0,7**.

A (38), (39) összefüggések alkalmazásával a MathCAD szimuláció segítségével meghatározhatók az alakítási hőmérsékletre jellemző profilgörbék, r_{min} és r_{max} értékek az *m* tényező függvényében (63. ábra).



63. ábra: *A profilgörbék változása a Kudo-féle (m) súrlódási tényező függvényében*

A 63. ábrán látható görbesereget felhasználva szintén leolvasható a Kudo-féle súrlódási tényező közelítő értéke, amely ugyancsak: **m=0,7**.

3.3.2.2. Az elmozdulás-mező meghatározása egy kinematikailag megengedett sebességmező alapján

A súrlódó felületek között fellépő relatív csúszási sebesség megegyezik az ott értelmezett sugárirányú anyagáramlási sebességgel. Az érintkező felületeken fellépő anyagáramlási sebességet a hengeres próbatestek párhuzamos nyomólapokkal végzett zömítésénél a 3.1. fejezetben mutattam be [23][72].

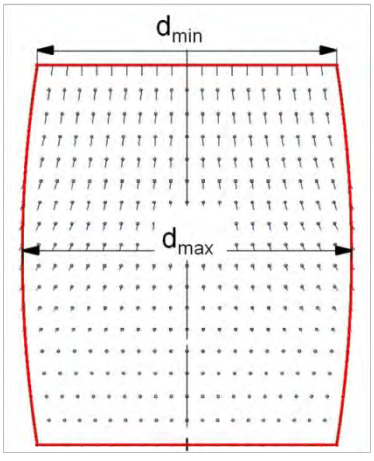
Hivatkozva a 3.1.3. fejezetben bemutatott sebességmezőt leíró (38), (39) valamint a (42) összefüggésekre, a tengelyirányú sebességkomponensek az alábbi, (59), (60) összefüggésekkel írhatók le a Kudo-féle súrlódási tényező figyelembe vételével (64. ábra).

Tengelyirányú sebességkomponens:

$$w_z(z) = \frac{z\left(-2z^2(1-m)v + 2z^2v + 3z(1-m)vh - 3zvh - (1-m)vh^2\right)}{h^3}. \qquad (59)$$

Sugárirányú sebességkomponens:

$$w_r(r,z) = -\frac{1}{2}\frac{r\left(-6z^2(1-m)v + 6z^2v + 6z(1-m)vh - 6zvh - (1-m)vh^2\right)}{h^3}. \qquad (60)$$



64. ábra: *A kísérleti próbadarabokra jellemző sebességmező képe*

Ha az (59), (60) összefüggés használatát a teljes alakítási folyamatra ki akarjuk terjeszteni, akkor az alakítási folyamatot egymásra épülő, *n* számú lépésre kell osztani.

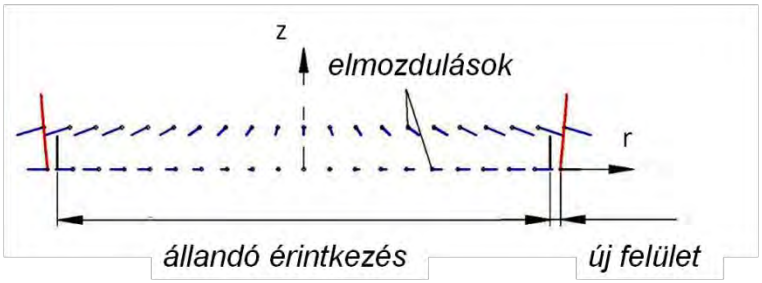
Egy lépésen belül a felső nyomólap $\Delta h=v\Delta t=0,1$ mm-t mozdul el. Minden lépésnél új h magassággal kell számolni. Az aktuális magasságot megkapjuk, ha a korábbi magasságból levonjuk a Δh értékét. A nyomólapok és a zömített munkadarab érintkezésénél, a $z=0$ és $z=h$ helyen felírható összefüggések:

$$w_r(r,0)=w_r(r,h)=\frac{1}{2}\frac{r(1-m)v}{h}. \tag{61}$$

A kopás vizsgálatánál a sebességmező helyett elmozdulás-mezőt is értelmezhetünk. A (61) összefüggés ennek megfelelően átalakul:

$$u_r(r,0)=u_r(r,h)=\frac{1}{2}\frac{r(1-m)\Delta h}{h}. \tag{62}$$

A (62) összefüggésből jól látszik, hogy az elmozdulás értéke a sugár mentén lineárisan nő, és az $r=0$ helyen az értéke zérus (65. ábra).



65. ábra: *A kontaktfelület felosztása*

Az $r=0$ helyen nincs elmozdulás, nem kopik a szerszám. Természetesen ez elvi megjegyzés, ami csak egy pontszerű, végtelen kicsi felületre igaz, de a gondolatmenetet figyelembe kell venni a várható kopáseloszlásnál.

A sugárirányú elmozdulás értékét és ezzel a kopást befolyásolja a súrlódási tényező értéke.

Ha súrlódás nélküli ($m=0$) lenne a zömítés, akkor a munkadarab nem hordósodna, a relatív elmozdulás értéke pedig a legnagyobb lenne. Teljes letapadás ($m=1$) esetén a munkadarab felülete a szerszám érintkezésénél nem változna. Ilyen megfontolásból adódik, ha zömítés közben a munkadarab nagyobb lenyomatot hagy a nyomólap sík felületén, akkor a súrlódási tényező értéke kisebb. A h folyamatos változása miatt a nyomólap egy adott pontján minden lépésnél más és más lesz a vele érintkező munkadarab elmozdulása. A kopás szempontjából a lépésenkénti elmozdulásokat összesíteni kell. Az összesítésnél külön kell kezelni a kiinduló munkadarab alatti

területet, és a zömítés közben keletkező kontaktfelület-részeket. Az állandó érintkezési tartományban (65. ábra) az elmozdulások összesített értéke meghatározható integrálszámítással is a (63) összefüggés alapján:

$$\sum u_r(r,h,m) = \int_h^H \frac{1}{2}\frac{r(1-m)}{h}dh = r\,ln\left(\frac{H}{h}\right)\frac{(1-m)}{2}. \tag{63}$$

Az Archard-féle kopásmodellnél a lépésenkénti elmozdulásokat és az aktuális nyomást együtt kell figyelembe venni. Az elmozdulások és a nyomásértékek együttes figyelembevételére a numerikus módszer egyszerűbben alkalmazható [35].

A numerikus módszer kívánt pontosságát az összesített elmozdulások numerikus meghatározására egy, az erre a célra írt MathCAD algoritmus segítségével ellenőriztem.

Az összesített elmozdulások értéke a numerikus módszerrel (62) és folytonos függvényként integrálva (63) szinte azonos eredményt adtak. A numerikus megoldás algoritmusát mutatja a 66. ábra.

```
RALL(MR) := | R ← MR
            | SR ← 0
            | Rmax ← R0
            | for j ∈ 0..nnz − 1
            |   | h ← H0 − j·Δh
            |   | Rmax ← Rmax + u(Rmax, h)
            |   | SR ← SR + u(R, h)
            | EM⟨1⟩ ← stack(SR, 0)
            | EM⟨0⟩ ← stack(R, Rmax)
            | EM
```

```
M := RALL(R)
```

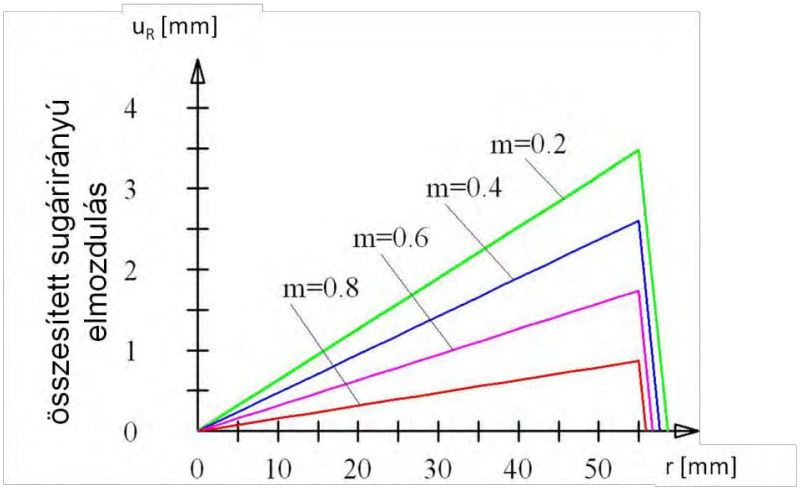
66. ábra: *A numerikus MathCAD algoritmus*

Az algoritmus a következő módon működik:

Az új felület kezdetét jelző sugarak (megfigyelési pontok ($\underline{\underline{MR}}$)) értékét az $\underline{\underline{R}}$ mátrix tárolja, így értelemszerűen, a mátrix startpontjainak ($\underline{\underline{SR}}$) értéke: 0. Zömítés közben *nz* számú egymásra épülő *Δh* elmozdulást eredményező ciklus lefutása után elérjük *h* zömítési magasságot. Az alakítási folyamat, azaz a ciklusok futása alatt folyamatosan összegezzük a megfigyelési pontokban a sugárirányú elmozdulásokat ($\underline{\underline{u}}$) és az összegzett értéket hozzáadjuk $\underline{\underline{SR}}$ korábbi értékeihez. Ahol új felület keletkezik,

ott nincsenek megfigyelési pontok, folyamatosan, lépésenként kell meghatározni R_{max} pillanatnyi értékét. Feltételezve az elmozdulások lineáris változását a sugár függvényében, elegendő R_{max} végső értékét rögzíteni. Az R_{max} végső értékénél az elmozdulás 0. Az eredményeket az $\underline{\underline{EM}}$ eredmény mátrix tárolja. Első oszlopa az összesített elmozdulásokat, a második oszlopa pedig a kiválasztott rádiuszok értékeit tartalmazza. Az algoritmus tehát $z=0$ helyen nz ciklusszámmal meghatározza a szerszámfelület kijelölt részein az elmozdulások összességét. A ciklus egy inkrementumában a tengelyirányú elmozdulás a $z=h$ helyen $\Delta h=v\Delta t=0{,}1$ mm, azaz a pillanatnyi h magasság ekkora értékkel csökken minden ciklusnál. Az összesített elmozdulásokat a Kudo-féle súrlódási tényező függvényében a 67. ábra mutatja.

Megállapítható, hogy a súrlódási tényező csökkenésével arányosan növekedett az összegzett sugárirányú elmozdulások értéke.



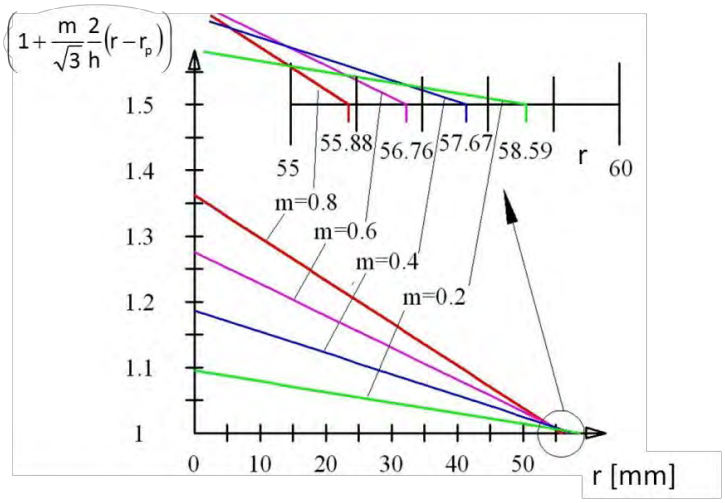
67. ábra: *Különböző súrlódási tényezőkhöz rendelhető összegzett elmozdulások*

3.3.2.3. A nyomólapokat terhelő felületi nyomás

Zömítésnél a párhuzamos nyomólapok és a munkadarab érintkezésénél fellépő nyomás nem egyenletes. A nyomáseloszlás meghatározásának közismert és számunkra is megfelelő módja a (9) összefüggés szerinti átlagfeszültség módszerének alkalmazása [35]. A (9) exponenciális kifejezés *Taylor-sorfejtéssel* - elhanyagolva a magasabb hatványú tagokat - egyszerűbb alakra hozható. A felületi nyomás közelítő, Kudo-féle súrlódási tényezővel figyelembe vett összefüggése:

$$p(r)=k_f\left(1+\frac{2m}{\sqrt{3}}\frac{\left(r-r_p\right)}{h}\right). \tag{64}$$

Az összefüggésben szereplő geometriai adatok a 9. ábra alapján értelmezhetők. A nyomás értéke jelentősen függ a munkadarab pillanatnyi magasságától. A (64) összefüggés alakítási szilárdsággal egyszerűsített hányadát feltételezve a zömítés végén - a $h=h_n$ értéknél (zömítési ciklus vége) és a hozzátartozó r sugárnál - különböző súrlódási tényezők mellett ábrázolható a sugárirányú nyomáseloszlás (68. ábra).



68. ábra: *A nyomásviszonyok és elmozdulások kapcsolata különböző súrlódási tényezők esetén*

A 68. ábrán jól látható, hogy mindig a munkadarab közepén lesz a legnagyobb a nyomás és a legkisebb (az alakítási szilárdságnak megfelelő) értéket a legnagyobb r rádiusznál veszi fel. A legnagyobb r rádiusz értékét befolyásolja a súrlódási tényező értéke. Ezt a 68. ábra kiemelt része szemlélteti. Az (54), (56) összefüggésekben szereplő σ_N normál feszültség helyett a felületi nyomás pillanatnyi értékével (64) számolhatunk.

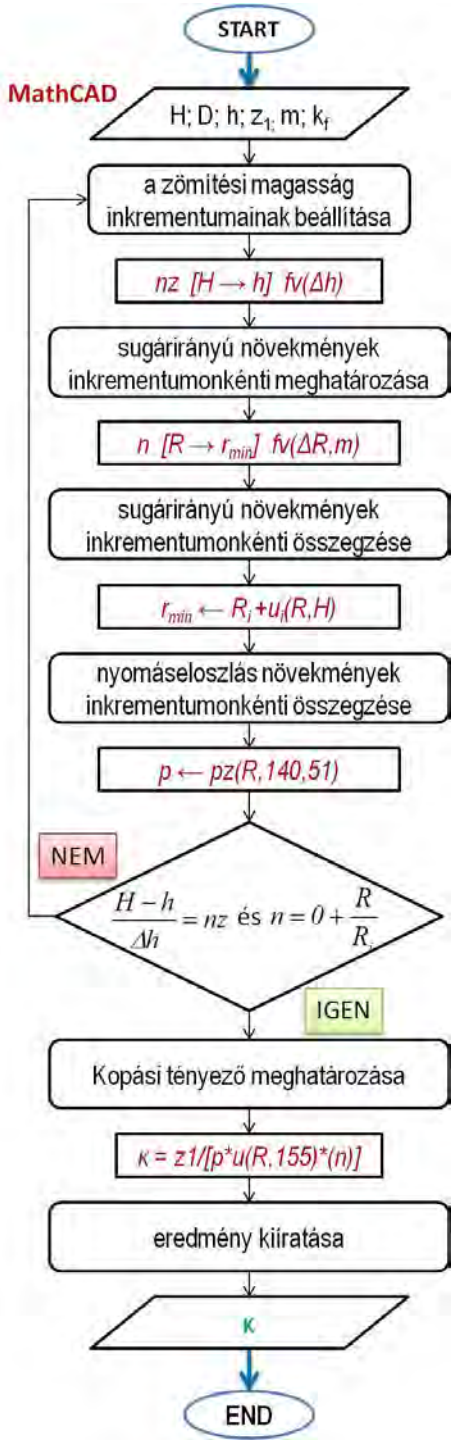
A (64) összefüggés egyik fontos, idáig meghatározatlan eleme az anyag alakítási szilárdsága.

Az alakítási szilárdság megadásához homogén és állandó értékeket feltételezve a termodinamikai faktorokra épülő *Hajduk*-féle összefüggés *Kiss* és munkatársai (Miskolci Egyetem) által pontosított változata használható (65).

$$k_f = k_{f0} K_T K_\varphi K_{\dot{\varphi}}. \tag{65}$$

3.3.2.4. A kopási tényező meghatározása

A kopási tényező a 3.3.2.1., 3.3.2.2. és 3.3.2.3. alfejezetek ismeretanyagát felhasználva az (56) összefüggéssel meghatározható. A MathCAD program algoritmusát a 69. ábra mutatja be.



69. ábra: *A kopási tényező meghatározásának algoritmusa*

A matematikai modellnél a letapadás jelensége nincs értelmezve, a súrlódási tényező a modell érvényességi tartományán belül egy közelítő, átlagos értékként kezelhető [72]. A modell négyszög szelvény esetén a lapátlók torzító hatásával nem számol, ezért csak a laptávolságok közötti kopásképei elemezhetők. Körszelvények vizsgálatára teljes mértékben alkalmas.

A MathCAD program input adatai:

Súrlódási tényező: m=0,7, darabolási hossz: H=159 mm, zömítési magasság: h=135 mm, szelvényméret (átmérő vagy laptáv): D=100 vagy 100x100 mm, alakítási szilárdság: kf=95 MPa, mért legnagyobb kopásmélység a nemesített szerszámfelületen: z_1=5,4923x10^{-5} mm.

A MathCAD program output adatai:

A *nemesített szerszámfelületre* meghatározott kopási tényező az (56) összefüggés felhasználásával:

$$\kappa = 6{,}94538851x10^{-7} \ [\text{Pa}^{-1}].$$

A *PVD bevonattal ellátott szerszámfelület* kopási tényezője a súrlódási tényező ismeretének hiányában közvetett módon határozható meg az (56) összefüggés felhasználásával. A [36] irodalom szerint a PVD bevonattal ellátott szerszámfelületen működő súrlódási tényező, a lenyomatvizsgálatok alapján, pontosan 2/3 részben aránylik a nemesített szerszámfelületen működő súrlódási tényezőhöz. Ezt az összefüggést felhasználva a kopási tényező meghatározható:

$$\kappa = 4{,}21156623x10^{-7} \ [\text{Pa}^{-1}].$$

A kopási tényező alapján, a *mért felületi keménység ismeretében*, a fajlagos kopási tényező (dimenzió nélküli Archard féle kopási tényező) is meghatározható (57). A szerszám felületi keménységének a megváltozásakor a fajlagos kopási tényezőn keresztül a kopási tényező korrigálható, a szimulációs eredmények pontosíthatók, illetve más szerszámminőségekre is kiterjeszthetők

A *nemesített szerszámfelület* fajlakos kopási tényezője az (57) összefüggés felhasználásával:

$$K = 2{,}87539084x10^{-3}.$$

A dimenzió nélküli kopási tényező összhangban van *Abachi* disszertációjában ismertetett, különböző módon kezelt szerszámfelületekre érvényes tartománnyal [1].

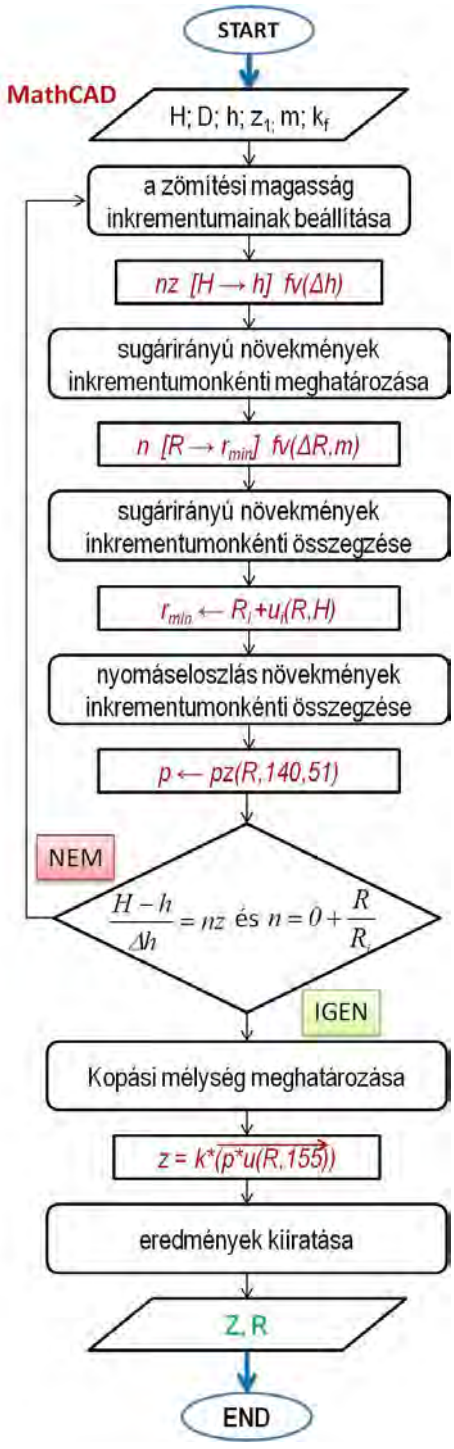
Megállapítható, hogy a PVD bevonattal ellátott szerszámfelület élettartama a kisebb kopási tényező miatt várhatóan magasabb, mint a hagyományosan nemesített szerszámfelület élettartama.

Az élettartambeli előny a PVD réteg tönkremenetelének idejével arányos [35].

3.3.3. A kopási lenyomat főbb paramétereinek meghatározása

A 3.3.2. fejezetben bemutatott síklapok közötti zömítésre érvényes algoritmus bővíthető.

Az adott súrlódási tartományban meghatározott kopástényező felhasználásával a kopás várható legnagyobb mélysége és helye meghatározható (70. ábra).



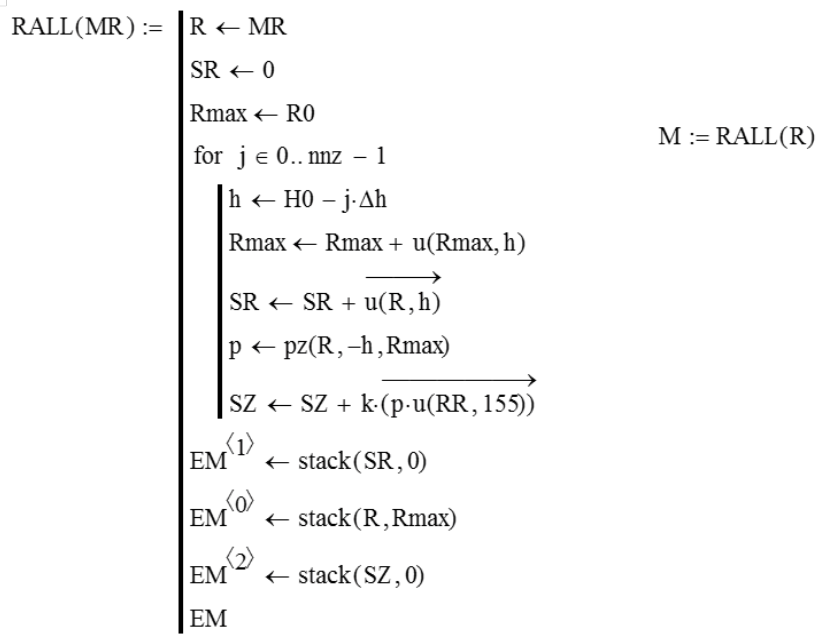
70. ábra: *A kopási paraméterek meghatározásának algoritmusa*

A 71. ábra a bővített programot meghatározó algoritmus működését mutatja be MathCAD környezetben. A bővített algoritmus az $\underline{\underline{SR}}$ mátrix meghatározásáig gyakorlatilag azonos a 66. ábrán bemutatott algoritmus működési elvével.

Az algoritmus a bővítményben átlagfeszültség módszerével meghatározza az aktuális nyomáseloszlás értékeit, melyeket $\vec{p}$ vektorban tárol.

Az (54) összefüggés felhasználásával a már meghatározott kopási tényező ismeretében meghatározza az inkrementumonkénti kopásképet (kopás mélysége, elmozdulások) melyek értékeit az $\underline{\underline{SZ}}$ mátrixban tárolja.

Az eredmények összesítése az $\underline{\underline{EM}}$ eredmény mátrixban történik. Első oszlopa <0> az összesített elmozdulásokat, a második oszlopa <1> a kiválasztott sugarak értékeit, míg harmadik oszlopa <2> a kopásmélységek értékeit tartalmazza.



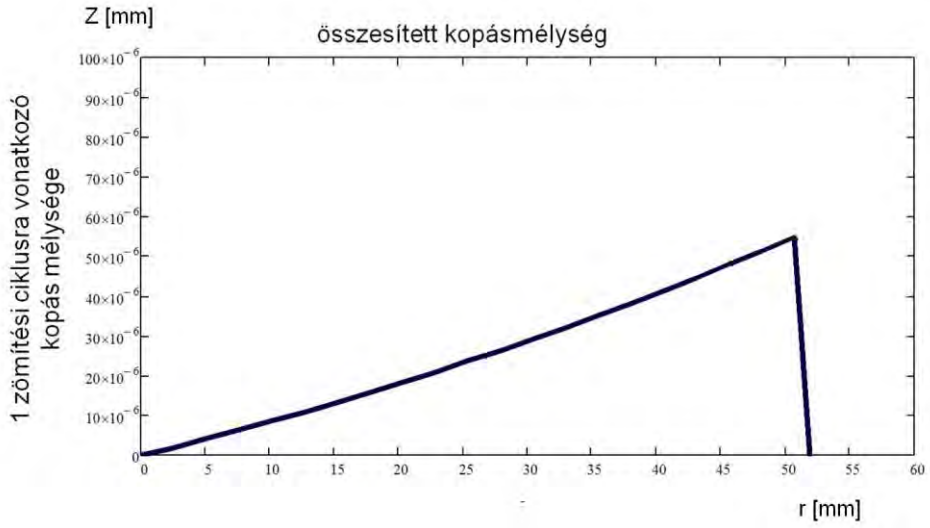
71. ábra: *A kopási paramétereket meghatározó MathCAD algoritmus*

Ezzel az algoritmussal meghatározhatók a fontosabb kopási paraméterek síklapok közötti zömítés esetén.

A MathCAD program input adatai:

Súrlódási tényező: m=0,7, darabolási hossz: H=159 mm, zömítési magasság: h=135 mm, szelvényméret (átmérő vagy laptáv): D=100 vagy 100x100 mm, alakítási szilárdság: kf=95 MPa, a nemesített szerszámfelület kopási tényezője: $\kappa=6{,}945^{-7}$ Pa^{-1}.

A MathCAD program output adatai:



$$\max\left(M^{\langle 2\rangle}\right) = 5.48355453\times 10^{-5}\,, \quad \max\left(M^{\langle 0\rangle}\right) = 51.91735505$$

$$a := \max\left(M^{\langle 0\rangle}\right)\cdot 2 = 103.83471011\,, \quad 26000\max\left(M^{\langle 2\rangle}\right) = 1.42572418$$

72. ábra: *A kopási paraméterek kiírt eredményei – I, MathCAD környezetben*

A kiírt eredmények, balról jobbra haladva:

- legnagyobb kopási mélység egy zömítési ciklusra számítva: **5,48x10^{-5} mm**
- legnagyobb sugárirányú elmozdulás egy zömítési ciklusra számítva: 51,91 mm
- egyetlen zömítési ciklusra vonatkozó legnagyobb laptáv lenyomat: 103,83 mm
- 26000 zömítési ciklusra ellenőrzött várható legnagyobb kopásmélység: **1,426 mm**

A MathCAD szimulációs eredményt célszerű Simufact FVM (SF FVM) módszerrel is visszaellenőrizni.

A munkadarab geometriát 2 mm, míg a szerszámgeometriát 1 mm elemmérettel definiáltam az elfogadható futásidők érdekében.

Ebből következik, hogy megfelelően pontos elmozdulások kopásképeinek vizsgálatához legalább egy nagyságrenddel kisebb elemméretre lett volna szükség, azonban a gép teljesítménye ennek határt szabott.

Pre-processzálás főbb adatai.

- folyamat

  melegzömítés 3D, FV megoldó, munkadarab elemméret 2 mm, szerszám elemméret 1mm, löket 24 mm, löketirány lefelé
- alakítógép

  hidraulikus sajtó 10 MN, szerszámsebesség konstans 72,5 mm / sec

- komponensek
  - szerszámok
    - anyagmodell geometria és minőség

      merev anyagmodell hővezetéssel, geometria Pro/E adatbázisból bdf formátumban (Nastran hálózó modul) beolvasott, anyagminőség a SF adatbázisból H 13
    - termikus paranéterek

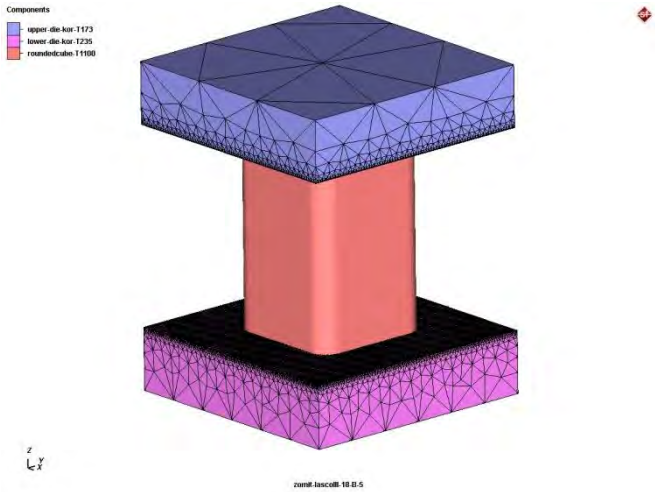
      szerszámtömbök előmelegítés nélküli átlaghőmérséklete 0 °C, környezeti hőátadási tényező (HTC) konstans 20 W/m^{2}K, hőátadási tényező az érintkező felületek határán a felső szerszámfelütre konstans 20000 W/m^{2}K, az alsó szerszámfelütre konstans 15000 W/m^{2}K, emissziós tényező 0,25
  - munkadarab
    - anyagmodell geometria és minőség

      merev képlékeny anyagmodell, geometria SF által generált geometria (Nt 100x159 mm) anyagminőség a SF adatbázisból AISI 1045 (T=900-1200 °C)
    - termikus paramétek

      munkadarab hőmérséklete 1100 °C, hőzsugorral korrigát geometria, környezeti hőátadási tényező (HTC) konstans 200 w/m^{2}K, emissziós tényező konstans 0,79
- hálózás, újrahálózás

  elem geometria tetrahedral, újrahálózás Simlab modullal

  A beolvasott adatok alapján hálózott szerszámgeometria képét mutatja a 73. ábra.



73. ábra: *A szerszámgeometria hálózási képe*

- súrlódási tényező

  konstans Kudo-féle súrlódási tényező a szerszámfelületekhez rendelve, m=0,7, Kopási együttható $\kappa=6{,}945\text{x}10^{-7}\ Pa^{-1}$ *mindkét szerszám felületen*

  A súrlódási tényező definiálásakor a kopási tényező megadását kézi adatbevitelre kell állítani. Az adat bevitelénél *Panesar* szerint [48] a következő korrekciót kell alkalmazni:

$$c_{(SIMUFACT)} = \frac{\kappa}{10^{-12}}. \tag{66}$$

  A kopási tényező értékét a (66) összefüggés szerinti beállítását a 74. ábra mutatja.

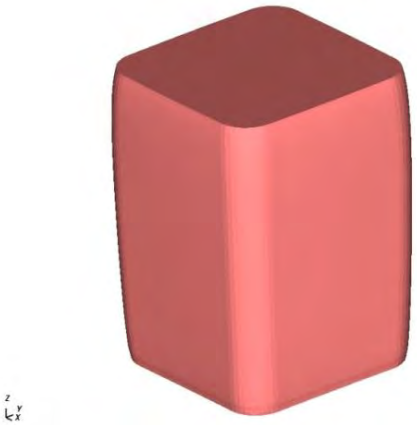
  A (66) összefüggés alapján beolvasandó kopási tényező: $6{,}945\text{x}10^{-13}$

74. ábra: *A súrlódási és kopási tényező megadása*

Poszt-processzálás főbb adatai.

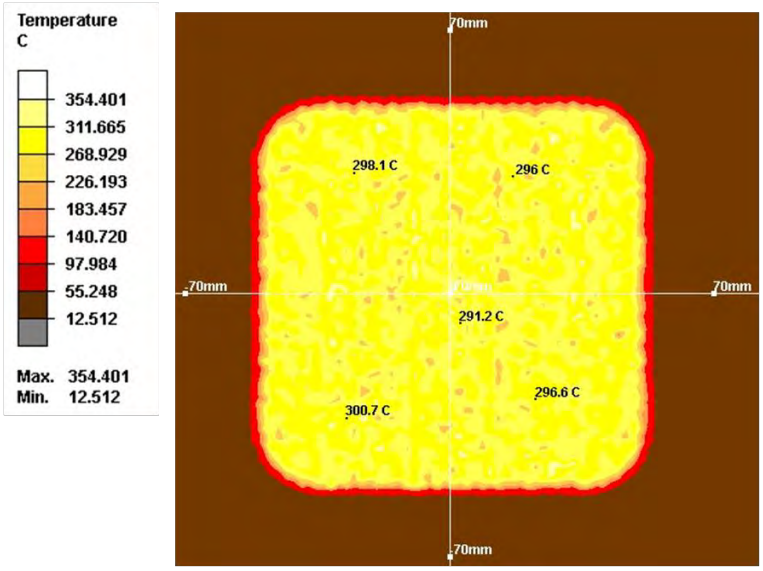
A szimulációt követően, a munkadarab zömített képét a 75. ábra mutatja.

A 75. ábra jelentős hasonlóságot mutat a valós munkadarab 56. ábrán mutatott képével, ami a szimuláció megfelelő pre-processzálására utal.



75. ábra: *A zömített munkadarab képe (SF FVM)*

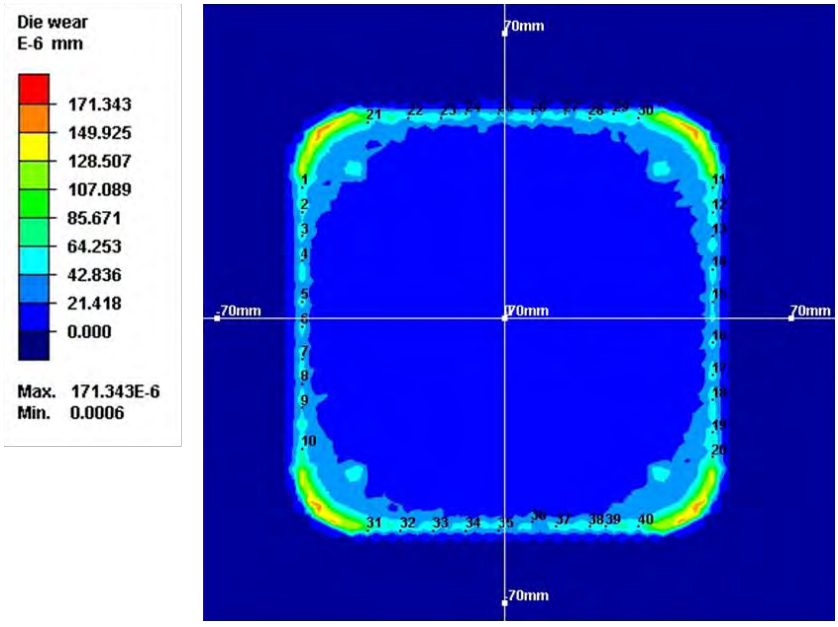
Alsó zömítő szerszám hőmérséklete és hőképe.



76. ábra: *Az alsó zömítő szerszám hőképe (Simufact FVM)*

A 76. ábrán látható hőkép egyetlen zömítési ciklusra vonatkozik. Megfigyelhető, hogy a tetszés szerint kiválasztott node pontok átlaghőmérséklete 296,5 °C, amely jól egybecseng a korábbi mérési adatok átlagával (302 °C). A legmagasabb hőmérsékleti adatot hordozó node pont 354,4 °C értéket mutat. Mindezek után joggal feltételezhető, hogy változatlan gyártási folyamat során a szerszám működő felületének hőmérséklete nem fogja meghaladni a korábban megállapított kilágyulási küszöbértéket (400-450 °C).

Felületek kopási viszonyai, legnagyobb átlagos kopásmélység.



77. ábra: *Az alsó zömítő szerszám kopásképe (SF FVM)*

Az alsó zömítő szerszám kopásképét és az oldallapokon véletlenszerűen felvett 5. sorozatból származó 40 node pontot mutatja a 77. ábra.

Az ábrán az látható, hogy a node pontokat csak az oldallapok közelében kialakult legnagyobb kopási üregekre vonatkozóan vettem fel, holott a buga sarkainál alakultak ki nagyobb kopásüregek. Ez azért így történt, mert az oldallapokra merőleges irányban lehetett elfogadhatóan pontos fizikai mérési adatokhoz jutni (3.3.1. fejezet), a buga lekerekítési rádiuszainak geometriai bizonytalanságai nem torzították a mérési eredményeket.

A szerszám anyagára jellemző kopási tényező megállapításánál pedig nincs jelentősége a metszetirányoknak.

A 40 node ponthoz tartozó adatok átlagát meghatározva az átlagos legnagyobb kopásmélység: $5{,}56 \times 10^{-5}$ mm. Ezt az értéket 26000 munkadarabra kivetítve az átlagos legnagyobb kopás mélysége: 1,44 mm.

A kapott eredmény a node pontok cseréjével változhat ugyan, de a változás nem számottevő. Ennek bizonyítására, beleértve a bemutatott mérési sorozatot is, összesen 5 mérési sorozatot készítettem azonos módon kiválasztva a 40 node pontot. A kapott legnagyobb átlagos kopási mélységet a következő adatok jellemezték: $5{,}42 \times 10^{-5}$, $5{,}60 \times 10^{-5}$, $5{,}39 \times 10^{-5}$, $5{,}62 \times 10^{-5}$, $5{,}56 \times 10^{-5}$ mm.

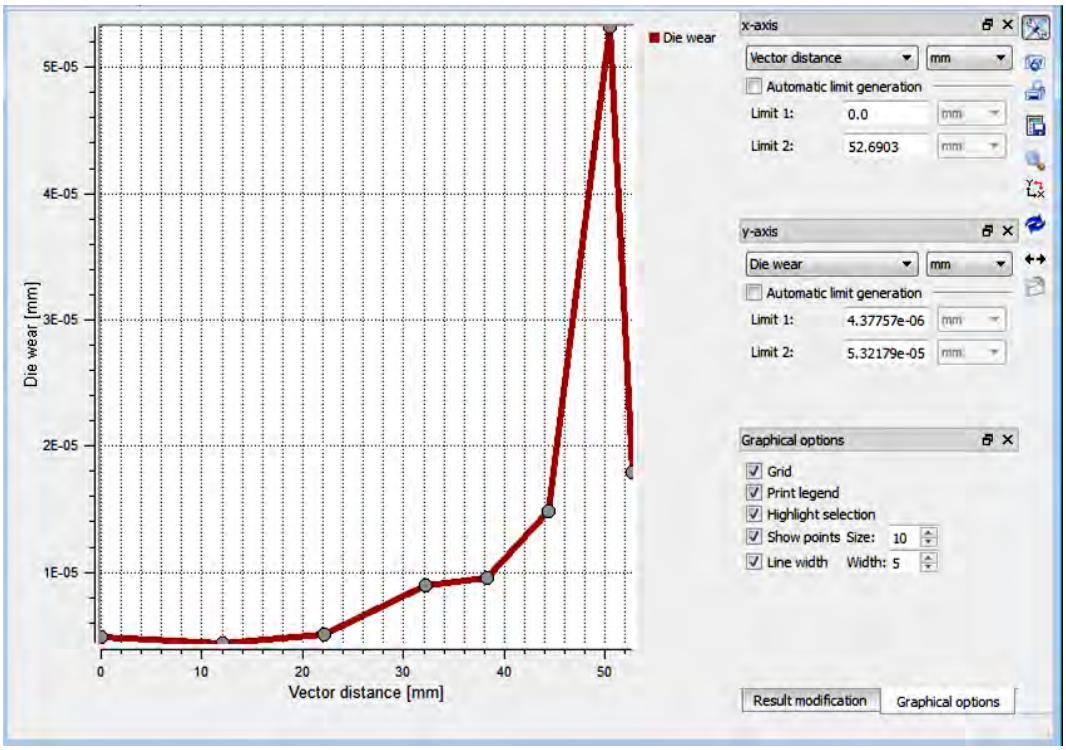
Az összesített átlagos kopásmélység számtani középértéke: **$5{,}518 \times 10^{-5}$ mm**. Ezt az értéket 26000 munkadarabra kivetítve az átlagos legnagyobb kopás mélysége: **1,43468 mm**.

Megállapítható, hogy a MathCAD program által meghatározott kopási tényezőt felhasználva a MathCAD programhoz képest egy teljesen más módszerrel is (SF FVM) szinte azonos eredményre juthatunk a legnagyobb kopási mélység tekintetében.

A (43) összefüggés elvét felhasználva meghatározható a MathCAD program relatív hibája a SF FVM módszerhez és a CMM mérés adataihoz képest. A relatív hiba értékek a következők: -0,315% illetve -0,596%. Ezek az értékek megfelelőek.

Felületek kopási viszonyai, legnagyobb elmozdulás.

Korábban utaltam a szerszámfelület hálózásakor meghatározott elemméret nagyságára, mely 1 mm. Ez az érték a megengedett torzulásokkal ennél nagyobb illetve kisebb értéket is felvehet. Ebből a megfontolásból a SF FVM módszerrel meghatározott oldallapokra merőleges irányú felületi elmozdulások eredményeit közelítésként kell értékelni (78. ábra).



78. ábra: *Az alsó zömítő szerszám kopásgörbe lefutása (SF FVM)*

Megállapítható, hogy a MathCAD program által meghatározott kopási tényezőt felhasználva a SF FVM módszer a sugárirányú elmozdulások pontos elemzésére korlátozottan alkalmas (hardware oldali korlát). A (43) összefüggés elvét felhasználva meghatározható a MathCAD program relatív hibája a SF FVM módszerhez képest.

A relatív hiba értéke: -1,48%. Ezek az értékek a MathCAD program számos egyszerűsítő feltételezése mellett is elfogadhatók. A 78. ábrán látható kopási görbe karakterisztikája hasonlít a MathCAD kopási görbe karakterisztikájához, a legnagyobb kopásmélység kivételével, annál jóval pontosabb. Az elmozdulások pontosabb értékeléséhez tehát nagyteljesítményű hardware alkalmazására van szükség.

3.3.4. A súrlódási és kopási tényezők kapcsolata

Az szerszámfelületek kopási folyamatának pontosabb gyakorlati modellezését a melegzömítéskor alkalmazott robottechnika megfelelően kis minta esetén lehetővé teszi, ugyanis a robot a munkadarabokat mindig program szerint, azonos pozícióba helyezi (79. ábra). Megfelelően kis mennyiségnek az a mennyiség tekinthető, melynél a kopási lenyomat jól kivehető, éppen kezd kialakulni a legnagyobb kopás helye.

79. ábra: *A zömített kovácsdarab manipulációja*

Ekkor, a kopási folyamat elején, az érintkező felületek relatív elmozdulását csak a súrlódási tényező befolyásolja és a legnagyobb kopási lenyomat jön létre.

Az eltérő súrlódási viszonyra a kopási üreg képződése nélkül is lehet következtetni, ugyanis zömítéskor az izzó munkadarab a nyomólap frissen megmunkált felületén elszíneződést okoz.

Ezzel a feltételezéssel a lenyomat legnagyobb kiterjedése, és a súrlódási tényező közvetlenül is összefüggésbe hozható, algoritmizálható.

Az algoritmizálhatóság azt jelenti, hogy a zömített kovácsdarab legnagyobb átmérőjének mért átlagértéke alapján a súrlódási tényező és azon keresztül az adott szerszámacél kopási együtthatója meghatározható.

A kapcsolat fordítva is fennáll, a kopási lenyomat alapján, a súrlódási tényező és azon keresztül az adott szerszámacél kopási együtthatója (közvetett módon az elmozdulásokból) meghatározható, a 3.3.3. fejezetben ismertetett MathCAD program elmozdulásra számított eredményével összevethető.

Vizsgálat előtt érdemes megbecsülni a zömített próbatest és szerszám, érintkező felületeinek eltérő hőtágulása okozta méretváltozásai alapján, a kopási lenyomat várható átmérőjét. A lenyomat várható átmérője a korábban a munkadarabra meghatározott (58) összefüggés és az alábbi, szerszámfelület hőtágulására vonatkozó (67) összefüggés alapján a zömített próbadarab alsó szerszámmal érintkező átmérőjének átlagértékét véve figyelembe, megbecsülhető

$$\Delta R_{300} = R_{20}\alpha_{SZ}\Delta T \ . \tag{67}$$

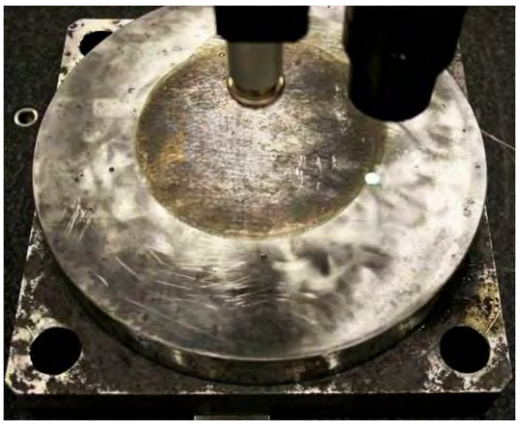
A lenyomat várható átmérője az (58) és (67) összefüggés különbségeként: 114,49-0,35=**114,14 mm**.

3.3.4.1. A súrlódási tényező és a fizikai kopási lenyomat közötti kapcsolat kimutatása

A kísérleti darabok (61. ábra) zömítése után a Széchenyi István Egyetem laboratóriumában vizsgálatra került az alsó nyomólap és a *66* jelű zömített munkadarab. A vizsgálat elsősorban a kopási lenyomat legnagyobb kiterjedésének valamint a próbatest és nyomólap érintkezési területén belüli változások kimutatására irányult.

A kopási lenyomat makro-geometriai vizsgálata.

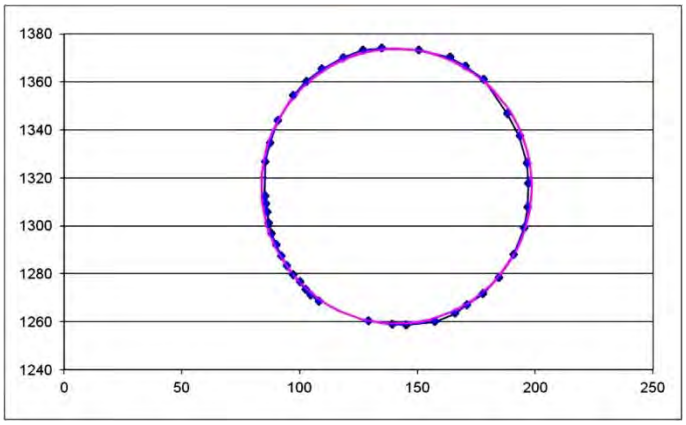
Az érintkezési területen belül a nyomólapon megváltozik a felületi érdesség, rajta előbb-utóbb kopási üreg képződik és a hő hatására a nyomólap elszíneződik (80. ábra).



80. ábra: *Az érintkezési terület határvonalának követése a Mahr PMC 800 koordináta mérőgéppel*

A kontaktfelület elvi felosztását a 65. ábra szemlélteti. Az állandó érintkezési terület és a keletkezett új felület a valóságban is megfigyelhető (80. ábra). Az állandó érintkezési terület és a keletkezett új felület határvonala közelítőleg egy-egy koncentrikus kör. A körtől való eltérés kapcsolatba hozható az anyag anizotrop tulajdonságával, a nyomólap és a munkadarab érintkezési felületeinek zömítés előtti makro- és mikro-geometriai tulajdonságaival, illetve a munkadarab elhelyezési pontatlanságával. A nyomólapon Mahr PMC 800 koordináta mérőgéppel kimérve a kopásnyomok határoló pontjait, meghatározhatóvá vált a közelítő kör átmérője (81. ábra). A közelítő kör meghatározáshoz kiválasztott pontok térbeli helyzete és száma befolyásolja a végeredményt, ezért két eltérő számosságú ponthalmaz közelítő körátmérőinek (D_1 és D_2) számtani középértékét vettem figyelembe.

A számtani középérték: $D_A=(D_1+D_2)/2=(113.489+114.670)/2=$**114.0795 mm**.



81. ábra: *A D_2 jelű közelítő kör középpontjának koordinátái: y=1316.508, x=141.164*

A lenyomatot közelítő kör átmérője meghatározható optikai analízissel is a lenyomatról készült fénykép alapján. Az eljárás előnye, hogy alkalmas CAD rendszer segítségével (AutoCAD) a pontok térbeli helyzete 2D –ra redukálódik, a kiértékelési pontok tetszés szerinti nagyítás mellett elhelyezhetők.

A kiértékelési pontok hatékony feldolgozása programfejlesztéssel, az AutoCAD és a MathCAD szoftver összekapcsolásával lehetséges.

Az AutoCAD felhasználásával meghatározott közelítő átmérő: D=**114.08 mm** (82. ábra).

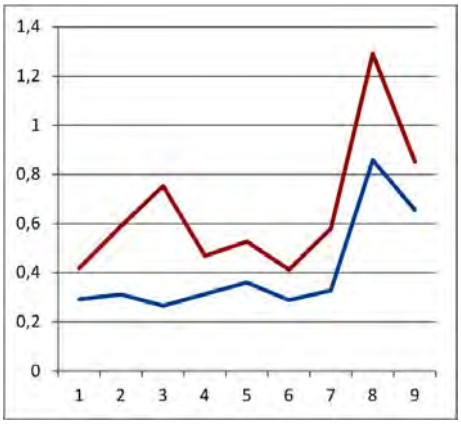
82. ábra: *A közelítő kör meghatározása AutoCAD programmal*

Az eltérő módszerekkel meghatározott mérési eredmények gyakorlatilag azonosak, tehát a 114,08 mm lenyomat átmérő megfelelő input adat a MathCAD szimulációhoz.

A kopási lenyomat mikro-geometriai vizsgálata.

A kísérlet során bekövetkező felületi érdességváltozásokat mutatja a 83. ábra [78]. Megállapítható, hogy a nyomólap teljes felülete érdesebb lett, és az érdesség a

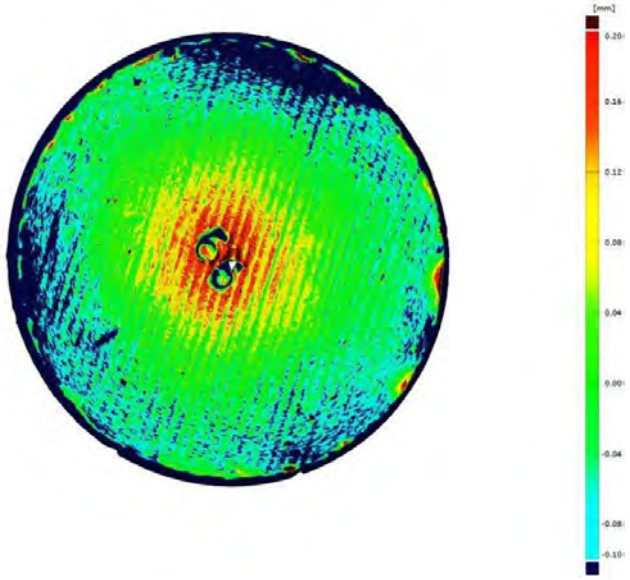
kopásnyomok peremein – ott, ahol a várható kopás a maximális - sokkal nagyobb, mint a többi részen. Ez az eredmény összhangban van a 2.1. fejezet 3. ábráján bemutatott kopási életciklus bekopási szakaszával.



83. ábra: *Az átlagos érdesség (Ra) változása (kék - kiindulási, piros – kopott felület)*

Zömítés közben a nyomólapot egyenlőtlen eloszlású nyomófeszültség terheli. A feszültség eloszlása megfelel a (9), (64) összefüggés szerinti nyomáseloszlásnak. A fellépő nyomófeszültségek hatására a nyomólap sík felülete rugalmasan deformálódik.

A munkadarab zömítéskor - némi egyszerűsítéssel - csak képlékenyen deformálódik és a munkadarab homloklapja örökli a nyomólap rugalmas deformációját (84. ábra).



84. ábra: *A munkadarab homloklapján érzékelhető kiemelkedés*

Külön vizsgálat alá került a Mahr PMC 800 koordináta mérőgép felhasználásával a munkadarab homloklapjának síklapuságtól való eltérése. A vizsgált felületet

módszeresen letapogatva 216 000 mérési adat keletkezett. A mérési adatok (pontfelhő) elemzése a GOM kiértékelő szoftverével történt.

Megállapítható volt, hogy a homloklap közepe kiemelkedik, rajta a fűrészelési mintázat részben megfigyelhető (84. ábra). A fűrészelési mintázat megmaradásában az el nem távolított reve játszhatott szerepet. A kiemelkedő rész jól közelíthető egy gömbfelülettel, melynek sugara R=4606 mm. A kiemelkedés annyira kicsi (0.35 mm) és tagolt, hogy kimutatására kifejezetten indokolt a 0.001 mm pontosságú koordináta mérőgép használata.

3.3.4.2. A súrlódási tényező meghatározása kopási lenyomat alapján

A kovácsolási folyamat modellezésénél, konstans paraméternek tekinthető a szerszámok felületi érdessége, a szerszám működtetési körülményei (munkadarab revés felülete, kenés, gyártógép kinematikai és dinamikai jellemzői, stb.).

A MathCAD szimuláció a 70. ábrán bemutatott algoritmus alapján úgy végezhető el, hogy a súrlódási tényező kiinduló értékének felvesszük a 3.3.2. fejezetben meghatározott *m=0,7* értéket és a lenyomat mért értéke alapján addig korrigáljuk (néhány lépés) míg a sugárirányú elmozdulások értéke a lenyomat méretével összhangba kerül.

A MathCAD program input adatai:

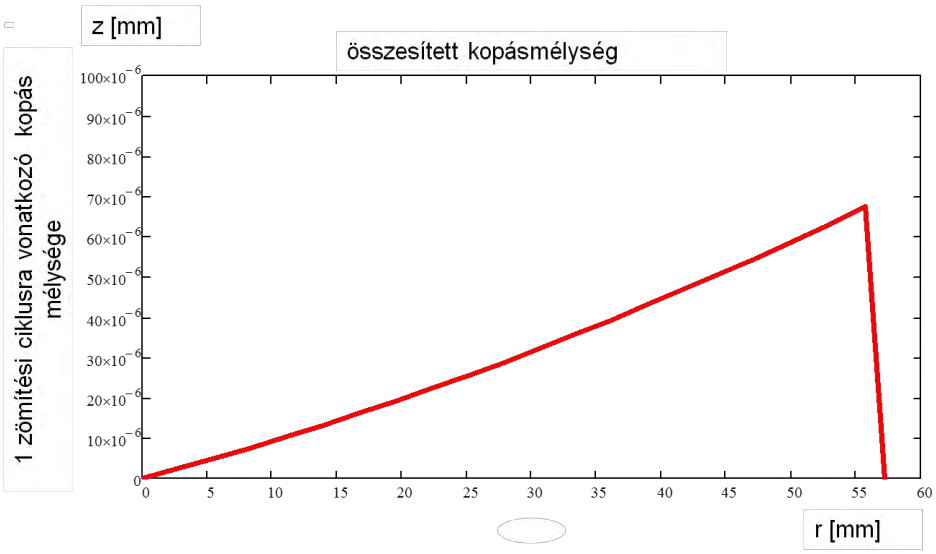
lenyomat mérete: D=114,08, súrlódási tényező kezdeti értéke: m=0,7, darabolási hossz: H=169 mm, zömítési magasság: h=142,6 mm, szelvényméret (átmérő vagy laptáv): D=110 mm, alakítási szilárdság: kf=95 MPa, a nemesített szerszámfelület kopási tényezője: $\kappa=6{,}945^{-7}$ Pa^{-1}.

A program a betöltött adatokkal az (54) összefüggés felhasználásával kiszámolja a lenyomat várható legnagyobb kiterjedését, mélységét és annak helyzetét, azzal a mérésekkel igazolt egyszerűsítő feltételezéssel, hogy a szerszám felületi keménysége zömítéskor állandónak tekinthető [71][9].

A sugárirányú elmozdulások értékei a munkadarab alakítási hőmérsékletén értelmezett értékek, azokat a szerszám hőtágulásából származó növekménnyel korrigálni (levonás) szükséges.

A MathCAD program output adatai:

A 85. ábrán a hengeres próbatestek egyszeri zömítési ciklusára vonatkozó kopási jellemzők láthatók.



$\max\left(M^{\langle 2\rangle}\right) = 6.74850762 \times 10^{-5}$ $\max\left(M^{\langle 0\rangle}\right) = 57.20908569$ 26000 $\max\left(M^{\langle 2\rangle}\right) = 1.75461198$

$a := \max\left(M^{\langle 0\rangle}\right) \cdot 2 = 114.41817138$ $DL := a - dsz = 114.07596138$ $m = 0.69$

85. ábra: *A kopási paraméterek kiírt eredményei – II, MathCAD környezetben*

A kiírt eredmények, balról jobbra haladva:

- legnagyobb kopási mélység egy zömítési ciklusra számítva: 6,749x10^{-5} mm
- legnagyobb sugárirányú elmozdulás egy zömítési ciklusra számítva: 57,209 mm
- egyetlen zömítési ciklusra vonatkozó legnagyobb átmérő lenyomat: **114,076** mm
- a lenyomathoz korrigált konstans súrlódási tényező értéke: **m=0,69**

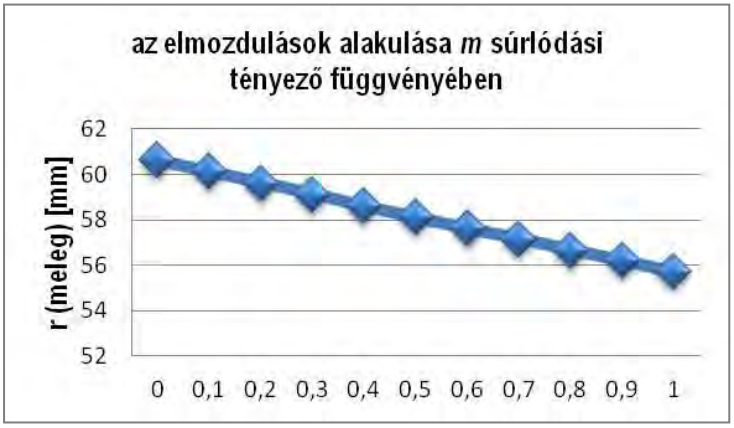
Megállapítható, hogy a lenyomat alapján meghatározott súrlódási tényező értéke (m=0,69) jól közelíti a legnagyobb zömített átmérők átlaga alapján meghatározott súrlódási tényező értét (m=0,7).

3.3.4.3. A súrlódási és kopási tényezők közötti összefüggések kimutatása

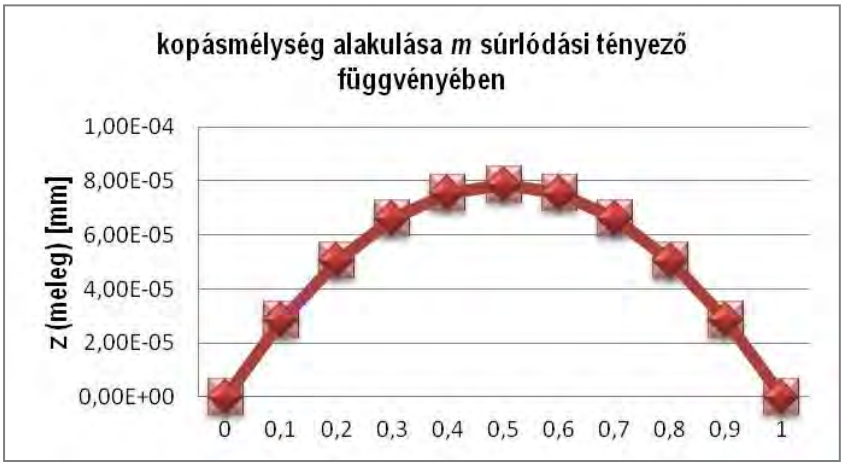
Az elmozdulások és a legnagyobb kopásmélységek a súrlódási tényezők ismeretében ábrázolhatók (86. és 87. ábra). A 87. ábrán bemutatott kopásmélység alakuláshoz jutunk az energetikai kopásmodell (55) alkalmazásakor is [87][70].

A 87. ábra jól szemlélteti, hogy a kopás értéke az *r=0* helyen zérus, a sugár mentén az állandó érintkezési tartományon belül folyamatosan nő, majd a zömített munkadarab legnagyobb sugaránál ismét zérus. Az állandó érintkezési tartomány a munkadarab *r* kiinduló sugaráig tart [71]. Zömítés közben a munkadarabnak a

nyomólappal érintkező felülete nő. A sugárirányú elmozdulás értékét, az új felület nagyságát és ezzel a kopást befolyásolja a súrlódási tényező értéke is.

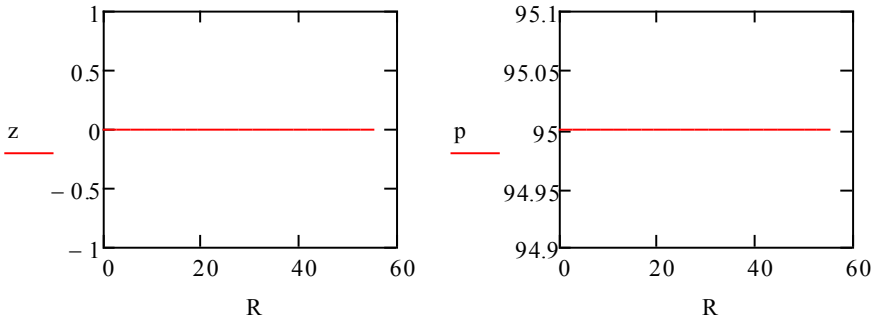


86. ábra: *A sugárirányú elmozdulások változása a súrlódási tényező függvényében*



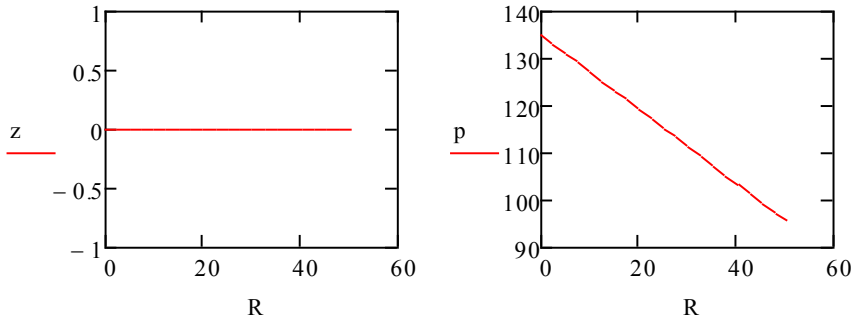
87. ábra: *A legnagyobb kopásmélység változása a súrlódási tényező függvényében*

Súrlódás nélküli esetben (*m=0*) a sugárirányú elmozdulások a legnagyobbak, de mégsem kopik a szerszám (88. ábra). A nyomáseloszlás állandó, az alakítási szilárdsággal azonos értékű.



88. ábra: *A MathCAD program által számított kopás és nyomáseloszlás m=0 esetén*

Teljes letapadás esetén (*m=1*) a munkadarab felülete a szerszám érintkezésénél nem változik, nincs elmozdulás, ezért nem kopik a szerszám. A nyomáseloszlás változó (89. ábra).



89. ábra: *A MathCAD program által számított kopás és nyomáseloszlás m=1 esetén*

Az alkalmazott modell szerint a legnagyobb kopásnál a Kudo-féle súrlódási tényező értéke 0,5. A 89. ábrán bemutatott határesetet térfogat-állandóságra visszaellenőrizhetjük. A visszaellenőrzéssel a program algoritmusa minősíthető.

A hőtágulással korrigált sugár értéke: $R_{(1100)}$= 55,726 mm. Korrekciós tényező: 1,0132. Ezzel a tényezővel visszaosztva az *m=0* esetén kapott maximális elmozdulást (60,6528 mm) a kapott eredmény: 59,86 mm. A térfogat-állandóság törvénye és a (16) összefüggés alapján meghatározható az *m=0* állapotra vonatkozó rádiusz értéke: 59,875 mm.

A program térfogat-állandóságra vonatkoztatott relatív hibája a (43) összefüggés alapján: -0,025%, elhanyagolhatóan kicsi.

Hasonló eredményt kapunk az állandó érintkezési tartományon belüli felületen fellépő súrlódási munka alapján. Az előzömítésnél az *A* felületen fellépő súrlódási munka:

$$w_S = \int_A m \frac{k_f}{\sqrt{3}} |u_{REL}| dA = \frac{4\pi\sqrt{3} r^3 k_f m(1-m)\Delta h}{9h}. \qquad (68)$$

A (68) súrlódási munka értéke *m=0* és *m=1* esetén zérus, tehát a korábban említett határeseteket a választott modell helyesen írja le. A legnagyobb súrlódási munka *m=0.5* esetén lép fel. Az u_{REL} behelyettesítése a (62) összefüggés szerint történik.

A vizsgálat eredményei arra engednek következtetni, hogy zömítésnél létezik egy olyan súrlódási tényező, amely mellett a súrlódási munka, a kopási mélység a legnagyobb.

A MathCAD program, közelítő kopásadatokat szolgáltat, azonban nagy előnye, hogy egyszerűen kapcsolható CAD rendszerekkel és a tervezéshez szükséges 3D geometria parametrikusan előállítható.

A MathCAD szimulációs eredményei az állandó szerszámsebességet biztosító alakítógépekre érvényesek. A módszer elvisége azonban bármilyen más egyenes vonalú szerszámmozgást biztosító alakítógép esetén alkalmazható.

III. tézis

Az 1. és 2. tézis alapján lehetséges a súrlódási tényező és szerszámkopás kapcsolt vizsgálata. Párhuzamos nyomólapok között melegen zömített tömör testeknél a súrlódási és kopási tényezők a kopási lenyomat alapján meghatározhatók. A módszer alkalmas különböző melegalakító szerszámacél minőségek és különböző összetételű PVD (Physical Vapour Deposition) bevonatok összehasonlító vizsgálatára.

A III. tézist alátámasztó saját hivatkozások: [36][67][69][70][71][72][78]

3.4. Közbenső alakok meghatározása a teljes kovácsolási energiaigény minimalizálására CAD-FVM környezetben

Többüregű süllyesztékes kovácsolásnál a készre alakító üregbe kerülő előalak alapvetően befolyásolja az alakítás erő- és munkaszükségletét, a kész kovácsdarab szálelrendeződését [28]. Az előalak geometriája bizonyos korlátok között szabadon megválasztható, de a különböző megoldásoknál biztosítani kell a kiinduló térfogat állandóságát. A térfogat értelemszerűen csak közelítőleg, a numerikus megoldásokra jellemző módon tekinthető állandónak.

Az alakítási fázisok tervezésénél a térfogatok ilyen azonossága korlátozott szélsőérték számítással biztosítható [24]. A fejlettebb CAD szoftverek (pl. Pro/Engineer) alkalmasak a térfogat azonosságok biztosítása mellett az előalakító fázisoknál a felületek nagyságának mérésére, lokális vagy globális változtatására az optimalizáló modul felhasználásával. Ezzel olyan kedvező felületű állandó térfogatú előalakok kombinációja hozható létre, melyek alkalmazása az alakítás teljes energiaszükségletének csökkenéséhez vezet. A módszer alkalmazása csak gyakorlott, tapasztalt mérnökök kezében hatásos, ugyanis az alkalmazás során megkerülhetetlen a tervezői összefüggések szakmai ismerete.

3.4.1. A térfogat-állandóság biztosítása korlátozott szélsőérték számítással

A parametrikus szoftvereknél a geometriai modell módosítható, és a módosított méretek egyértelműen meghatározzák az új geometriát, illetve annak térfogatát. A változtatható méretek és a modell térfogata között tulajdonképpen függvénykapcsolat van. A függvénykapcsolat a Pro/Engineer (*Pro/E*) szoftvernél csak úgy kezelhető, ha a függvény értékét mérjük és a mérés eredményéről egy építőelemet veszünk fel.

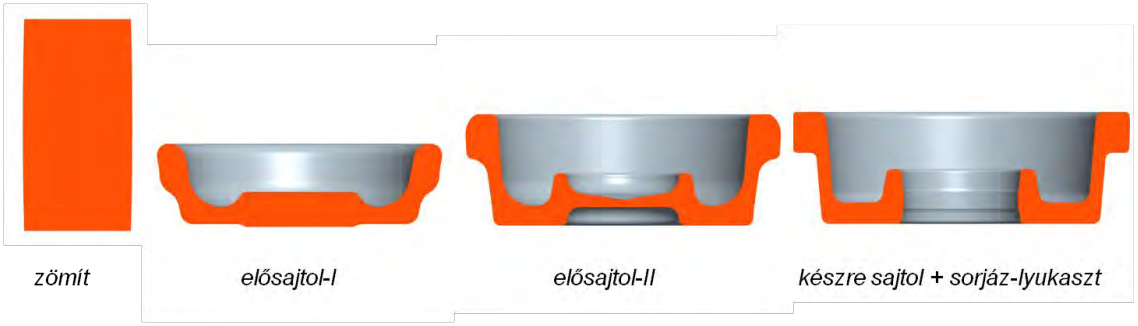
A kovácsdarabok geometriáját általában sok méret jellemzi. A méretek közül szakmai szempontok alapján ki kell választani azokat, amelyek a különböző előalak változatok eléréséhez szükségesek [27]. A korlátozott szélsőérték számításnál a Pro/E a kiválasztott értékek módszeres változtatásával keresi a térfogatméréssel létrehozott függvény szélsőértékét, de csak addig, amíg közben el nem éri a korlátozó feltételként megadott térfogatértéket. A korlátozó feltételként megadott értéket a szoftver több méretkombináció esetén is elérheti [68][74]. A lehetséges megoldások közül kell kiválasztani a szakmai szempontból a legkedvezőbbet [68][74].

A módszer lényegét egy valós, a RÁBA Futómű Kft. kovácsüzemében többüregű kovácsolással készülő NNS kuplungtest kovácsdarab egyik előalakítási fázisán mutatom be. A készre kovácsolt geometriát, DIN EN 10243-1 szabvány szerint növelt pontossági fokozat (E) és többnyire nyersen maradó felületek (megmunkálásra nem kerülő felületek) jellemzik. (90. ábra).

90. ábra: *A kuplungtest kovácsdarab CAD modelljének képe*

Az NNS készre alakított geometria egyik tulajdonsága, hogy méretei rendkívül szűk tartományon belül változhatnak, ezért a geometria gyakorlatilag konstansnak tekinthető, csak az üregtöltő kényszerek geometriai összhangját célszerű, az időzített üregtöltés [86] figyelembe vételével, biztosítani.

A térfogat-állandóság biztosítása során abból a tervezői követelményből indulhatunk ki, hogy mindegyik fázis-geometriával szembeni követelmény a térfogat-azonosság. A kész kovácsdarab sorjával növelt tömege: 13,2 kg. Erre a tömegre kell az előalak térfogatokat beállítani. A kovácsdarab alakítási fázisait a 91. ábrasorozat szemlélteti.



91. ábra: *A kuplungtest kovácsdarab alakítási fázisainak (balról jobbra) CAD képe*

Az ábrasorozat első fázisa revelazító zömítés, melyhez a CAD geometriát a 3.1. fejezetben ismertetett módon állítottam elő. A profilgörbe alapján generált CAD modell képét mutatja a 92. ábra.

92. ábra: *A kuplungtest kovácsdarab zömített geometriájának MathCAD profilgörbe (piros színnel jelölve) alapján generált CAD képe*

A térfogatok beállításához meg kell választani azokat a szabadon változtatható, a geometriát hatékonyan vezérelni tudó paramétereket (méreteket), melyek az anyagáramlást a szálgyűrődési veszély kialakulása nélkül képesek befolyásolni [28]. Célszerű valamennyi alakítási fázisban azonos paramétereket alkalmazni.

NNS kovácsdarabok esetén beállítható geometriák az előalakított geometriák. Az előalakított geometriáknál is többféle változatot vizsgálhatunk. A különböző geometriájú, állandó térfogatú előalakok korlátozott szélsőérték számítással

előállíthatók a Pro/E szoftver felhasználásával [68][74]. Függvényváltozóként beállítható több geometriai elem, akár geometriai elemek láncolata is [68][74].

Példaként a készre kovácsolást közvetlenül megelőző (*elősajtol–II*) geometria egy kiválasztott méretével végrehajtott térfogat beállítást választottam, amely jól reprezentálja a módszer lényegét.

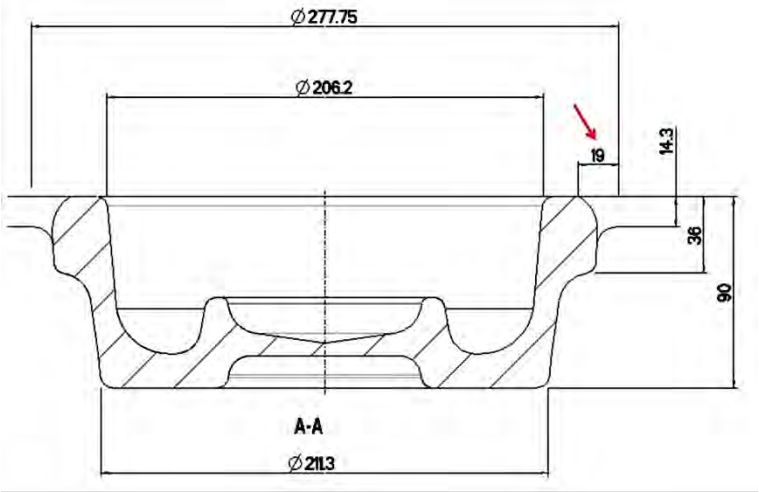
Tervezői lépések a Pro/E WildFire 4.0 CAD környezetben.

- *A **Behavior modelling** modul felvétele*

  Az optimalizáció csak a *Behavior modelling modul* felvételekor működik. Ahhoz, hogy a műveletet el tudjuk végezni, létre kell hoznunk a **VOLUME** építőelemet: → *Analysis* → *Model* → *Mass properties* → ***Feature.***

  Következetesen végrehajtva a felbukkanó menüablak utasításait, a modellfában megjelenik a **VOLUME** *feature* (építőelem).
- *Megnyitjuk az optimalizálni kívánt 3D modellt*

  Edit paranccsal megjelenítjük a változtatni kívánt építőelem méretet. Ezután: → *Analysis* → *Feasibility* → ***Optimization*** (93. ábra).



93. ábra: *A modell optimalizálandó mérete (piros nyíllal jelölve)*

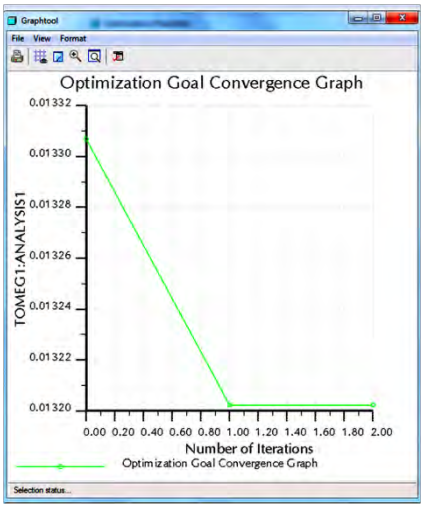
- *Keressük a méréssel létrehozott függvény szélsőérték maximumát vagy minimumát*

  Az ***Optimization/Feasibility*** menüablak felbukkanását követően a *Study Type/Name* beállításnál az *Optimization* parancsot jelöljük ki. Itt lehet elnevezni a vizsgálatot is. A célfüggvény (*Goal*) beállításánál határozható meg az optimalizálás célja és az érintett jellemző (térfogat vagy tömeg). Esetünkben használjuk a minimalizálást.

- *Korlátozó feltételként megadjuk a kívánt térfogatot vagy tömeget*

  A *Design Constraints* beállításnál egy konstanst kell megadnunk. Az egyszerűség kedvéért válasszuk a *tömeget* konstansnak, mivel a sűrűséget állandónak tekintjük (térfogat-állandóságból következik). További kényszerek felvétele is lehetséges, jelen esetben azonban nem szükséges.
- *Kijelöljük a változtatható méreteket vagy méretet és megadjuk azok megengedett intervallumát*

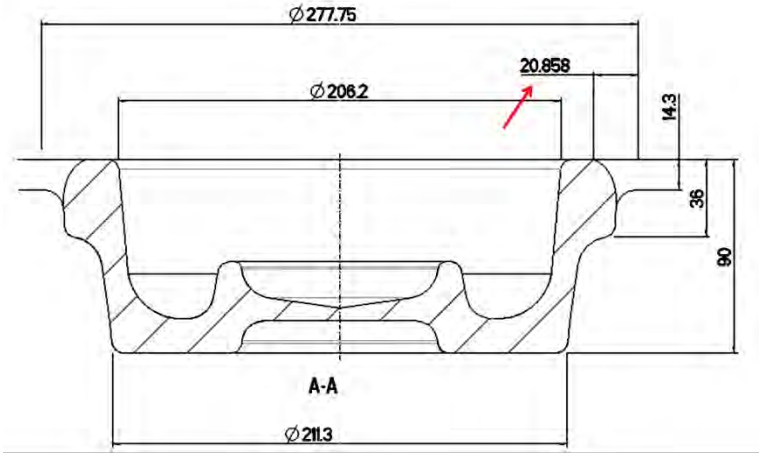
  A *Design Variables* menüben állíthatók be a tervezői változók (93. ábra) az *Add Dimension* menüparanccsal, a megengedett *min./max.* eltérésekkel, majd ***Compute*** (94. ábra).



94. ábra: *A tömeganalízis eredménye*

- *Az új geometria tervezői ellenőrzése*

  A számolási ciklus befejeztével, a 94. ábrán látható grafikon jelenik meg.



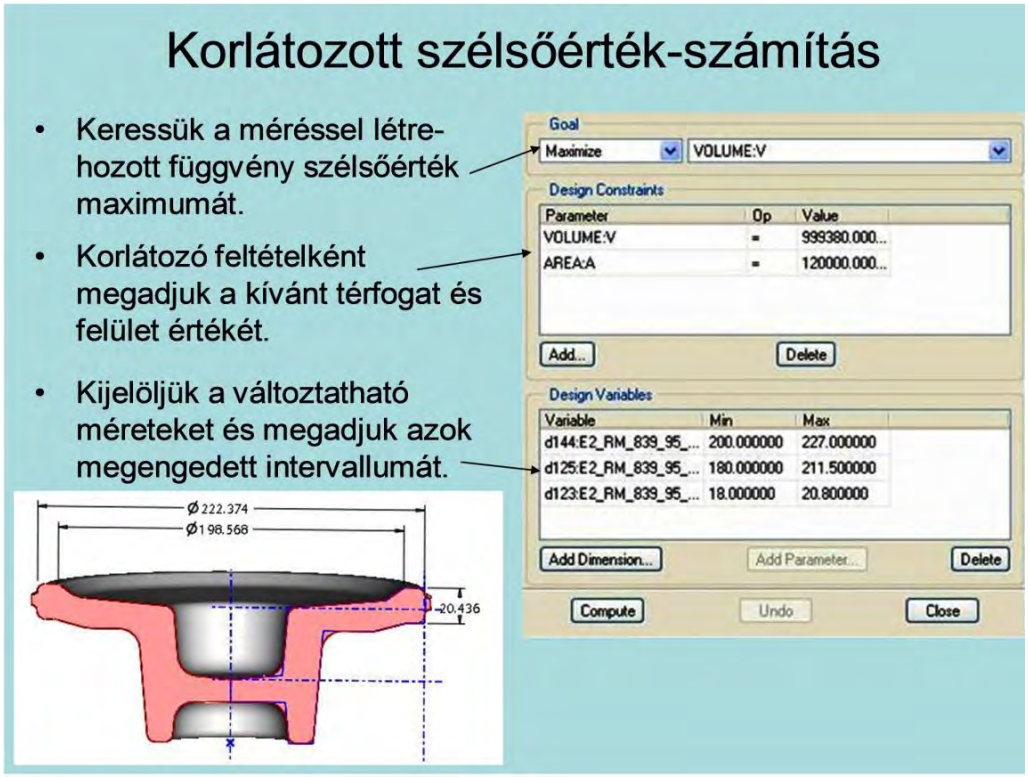
95. ábra: *A modell méretváltozása optimalizálás után (piros nyíllal jelölve)*

A grafikonon látható, hogy a tervezői célkitűzésnek megfelelően az elősajtolt geometria tömege egyetlen iterációs lépésben elérte a célértéket, 19 mm mérete 20,858 mm-re változott (95. ábra). A szerszám munkadarabbal érintkező felülete csökkent.

3.4.2. Kedvező felületű, állandó térfogatú modellek meghatározása az optimalizáló modul alkalmazásával

A kedvezőbb felület keresése közben gyakran előfordul, hogy az egyik elképzelt előalak szabályosabb, mint a másik, azaz az adott térfogat mellett a felülete kisebb. A kedvezőbb felületű, azonos térfogatú előalak meghatározható az optimalizáló modul alkalmazásával.

Lehetőség van arra, hogy az előző pontban bemutatott megoldást kiegészítsük, a célfüggvény elérését további kényszerrel korlátozzuk, korlátozásként a kívánt felület nagyságát megadjuk. Ilyenkor a kijelölt méretek a jól megválasztott intervallumon belül addig módosulnak, amíg a térfogat-állandóság és a megfelelő felületnagyság ki nem alakul. Ez a megoldás egy koszorúagy kovácsdarab előalakjának tervezésénél került bemutatásra [27][74] (96. ábra).



96. ábra: *Kedvező felületű, állandó térfogatú előalak elérése korlátozott szélsőérték számítással [27][74]*

Lehetőség van arra is, hogy a már kialakult állandó térfogatot megőrizve az előalak teljes felületét csökkentsük.

A hatékony működtetéshez a változó felületelemeknek legalább három összefüggő mérettel megadható láncolata szükséges. Példaként, a készre kovácsolást közvetlenül megelőző (*elősajtol–II*) geometria három belső mérete alkotta méretláncolatán végrehajtott felületcsökkentést választottam.

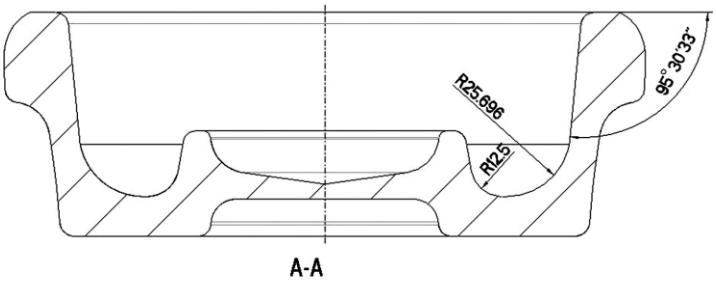
Tervezői lépések a Pro/E WildFire 4.0 CAD környezetben.

- *Az új építőelem felvétele*

  Ahhoz, hogy a műveletet el tudjuk végezni, létre kell hoznunk a **SURFACE** építőelemet: → *Analysis* → *Model* → *Mass properties* → ***Feature.***

  Következetesen végrehajtva a felbukkanó menüablak utasításait, a modellfában megjelenik a **SURF_AREA** *feature* (építőelem).
- *Megnyitjuk az optimalizálni kívánt 3D modellt*

  Edit paranccsal megjelenítjük a változtatni kívánt építőelem méretet. Ezután: → *Analysis* → *Feasibility* → ***Optimization*** (97. ábra).

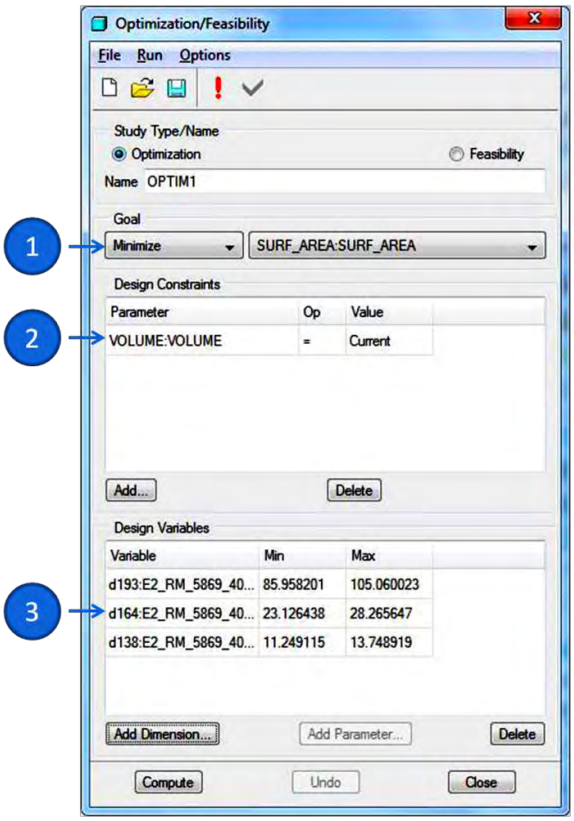


97. ábra: *Az elősajtol–II előalak kedvezőbb felülete elérésére kiválasztott méretláncolat (R12,5, R25,7, 95,5°)*

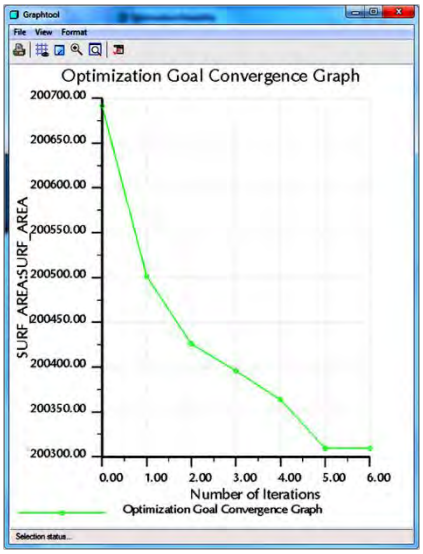
Továbbiakban a gondolatmenet azonos az állandó térfogat beállításánál alkalmazott eljárással, ezért csak a fontosabb lépéseket foglalom össze (98. ábra):

- *keressük a méréssel létrehozott függvény (SURF_AREA) szélsőérték minimumát* ***(1)***
- *korlátozó feltételként megadjuk a térfogat vagy tömeg megőrzését* ***(2)***
- *kijelöljük a változtatható méreteket és megadjuk azok megengedett intervallumát*

  Az intervallum megadható a rendszer által felajánlott értékek elfogadásával is. A mintapéldában ez utóbbi megoldást választottam ***(3)****.*



98. ábra: *A teljes felület csökkentéséhez beállított értékek*

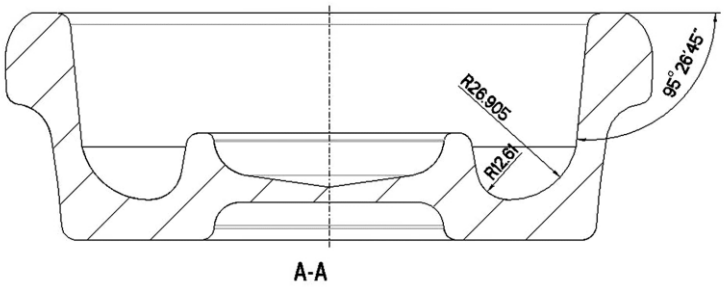


99. ábra: *A felületanalízis eredménye az elősajtol–II előalaknál*

- *Az új geometria tervezői ellenőrzése.*

  A számolási ciklus befejeztével a 99. ábrán látható grafikon jelenik meg. A 99. ábrán látható, hogy az elősajtol–II előalak esetén közel 400 négyzetmilliméterrel csökkent a teljes felszín. A tervezői célkitűzésnek megfelelően az elősajtolt

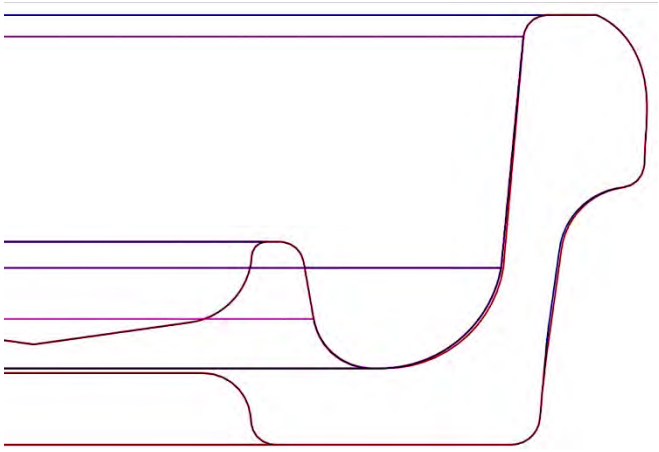
geometria kiválasztott felületelemeinek láncolata alkotta felszín csökkent, ezáltal csökkent az elősajtol–II geometria teljes felszíne is (100. ábra).



100. ábra: *A felületanalízis utáni elősajtol–II előalak méretláncolat változása (R12,6, R26,9, 95,4°)*

Ugyanezt a műveletsort kell elvégezni az elősajtol-I előalaknál is, alkalmazva a korábbi méretláncolatot. Az analízisek révén rendelkezésünkre állnak a térfogat-állandóság szerint beállított és az állandó térfogat mellett teljes felületre minimalizált geometriák (101. ábra).

Természetesen a teljes felület csökkentését – minimalizálását – korlátozza az, hogy milyen intervallumon belül változhatnak a módosítható méretek. Ennek előírási lehetősége látszik a 98. ábra 3. pontjánál.



101. ábra: *Állandó térfogatra beállított (piros) és állandó térfogaton csökkentett felületű (kék) geometriák közötti különbségek az elősajtol–II fázisban*

A következőkben az alakításhoz szükséges energia csökkenését biztosító geometriák optimális kombinációját kell kiválasztani. Erre a célra bármilyen CAE rendszer használható.

3.4.3. Az alakítási energia és kopásképek FVM analízise

Az eredmények összehasonlító vizsgálatát a tervezői célkitűzés elérésére FVM analízissel célszerű befejezni. Az összehasonlításokhoz a szerszámfelek megfelelően hálózott 3D modelljeinek elkészítése szükséges. Az összehasonlítások alapja lehet az alakításhoz felhasznált teljes energiaszükséglet, de lehet a szerszámok kopásképe is.

Az előbbi esetben az abszolút értékek alapján kell a kisebbiket kiválasztani, az utóbbi esetben pedig az azonos alapra hozott kopásképek közül vizuálisan a kevésbé meleg színűt választjuk ki (színbeállítás függvénye).

FVM környezet, Simufact 11.0.

Pre-processzálás főbb adatai.

- folyamat
  kovácsolás sorjaréssel 3D, FV megoldó, munkadarab elemméret 4/3(kész geometria) mm, szerszám elemméret 3mm, löketbeállítás kovácsrajzok szerint, löketirány lefelé, ellenőrzés szálgyűrődésre, kopás analízis alapbeállítás szerinti értékekkel
- alakítógép
  excenter sajtó 40 MN MAXIMA, fordulat 40 min^{-1}
- komponensek
  - szerszámok
    - anyagmodell geometria és minőség
      merev anyagmodell hővezetéssel, geometria Pro/E adatbázisból bdf formátumban beolvasott, anyagminőség a SF adatbázisból L6
    - termikus paranéterek
      szerszámtömbök átlaghőmérséklete 200 °C, hőzsugorral korrigált geometria, környezeti hőátadási tényező (HTC) konstans 20 W/m^2K, hőátadási tényező az érintkező felületek határán konstans 15000 W/m^2K, emissziós tényező 0,25
  - munkadarab
    - anyagmodell geometria és minőség
      merev képlékeny anyagmodell, geometria Pro/E adatbázisból beolvasott MathCAD geometria, anyagminőség a SF adatbázisból DIN_1.7147(T=20-800 °C)

- termikus paraméterek

  munkadarab hőmérséklete 1200 °C, hőzsugorral korrigát geometria, környezeti hőátadási tényező (HTC) konstans 200 w/m^{2}K, emissziós tényező konstans 0,79

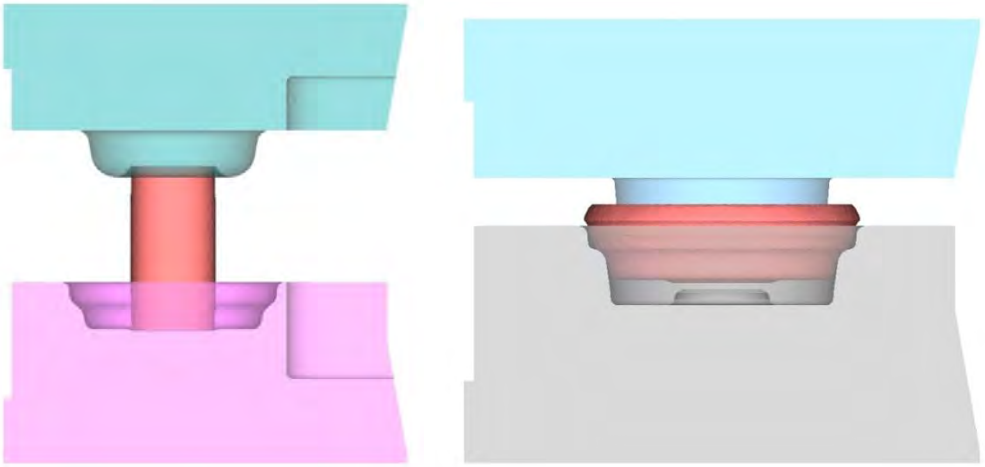
- hálózás, újrahálózás

  elem geometria tetrahedral, újrahálózás Simlab modullal,

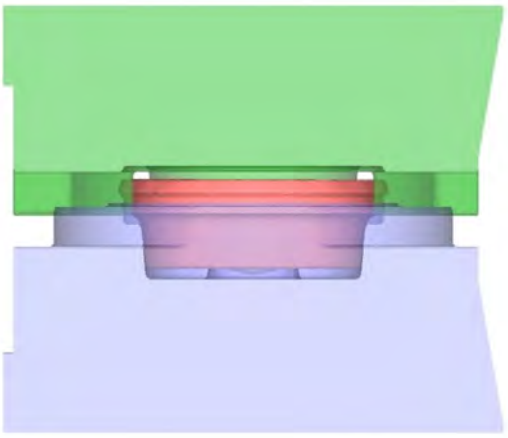
- súrlódási tényező

  konstans Kudo-féle súrlódási tényező a szerszámfelületekhez rendelve, m=0,45

Az FVM analízis a többüreges alakítási folyamat egészére vonatkozik. Az analízist külön elvégezzük az állandó térfogatra beállított és külön az állandó térfogaton felületminimalizált szerszámokkal. A szimulációk fázisonkénti kezdeti képei a 102. és 103. ábrákon láthatók.



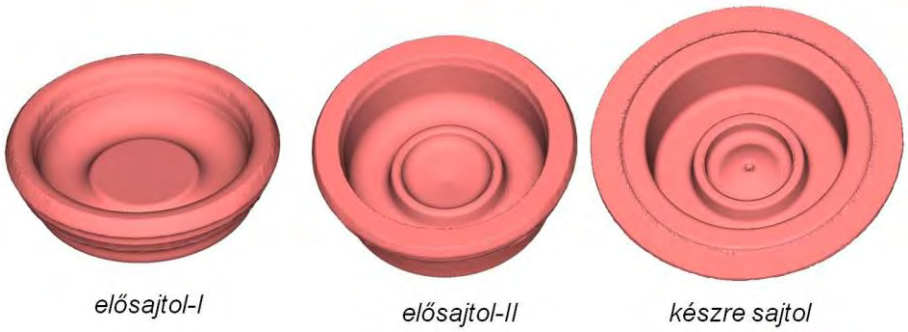
102. ábra: *Az elősajtolási fázisok szimulációja*



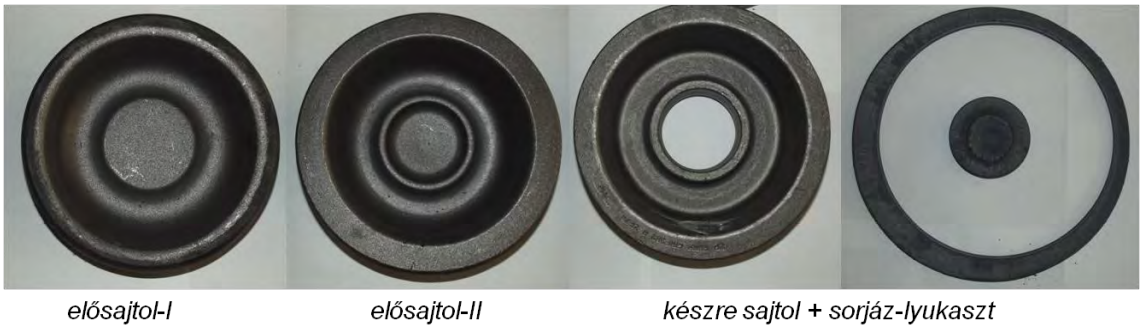
103. ábra: *A készre sajtolás szimulációja*

Poszt-processzálás főbb adatai.

A szimulációt követően az állandó térfogatra beállított munkadarabok képét mutatja a 104.ábra, a valós kovácsdarab képét pedig a 105. ábra.



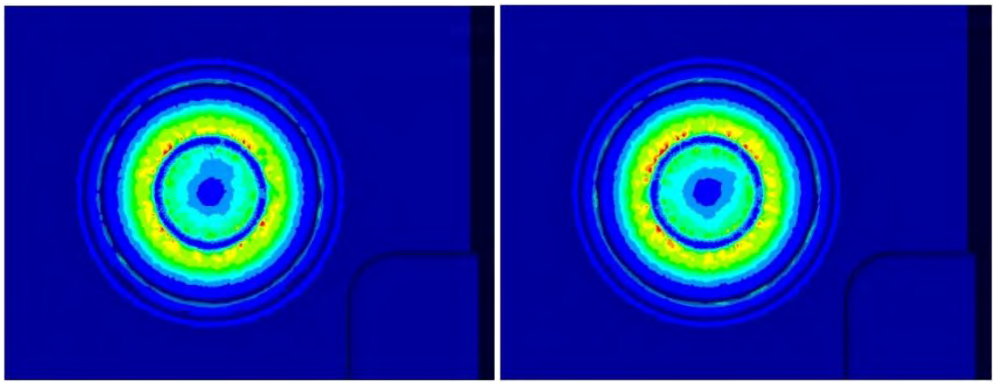
104. ábra: *A SF FVM analízis által generált geometriák*



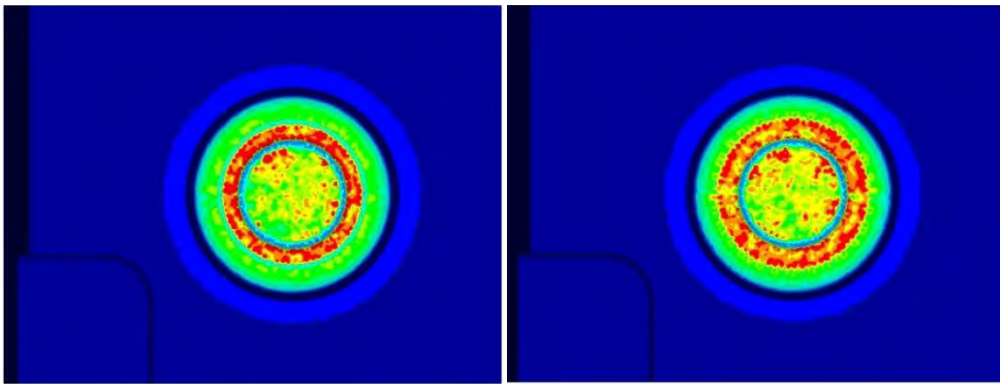
105. ábra: *A valós kovácsolt munkadarabok*

A 104. ábra jelentős hasonlóságot mutat a valós munkadarabok 105. ábrán mutatott képével, ami a szimuláció megfelelő pre-processzálására utal.

Elősajtolás-I *alakítási fázisok összehasonlítása*



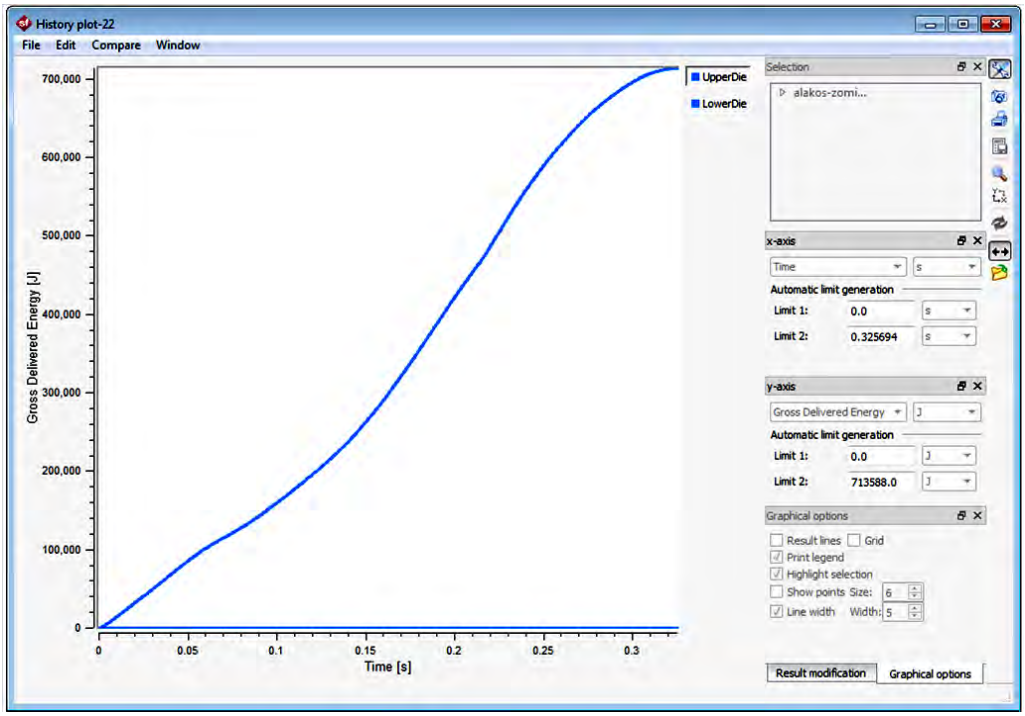
106. ábra: *Az alsó elősajtol–I szerszámok kopásképei*



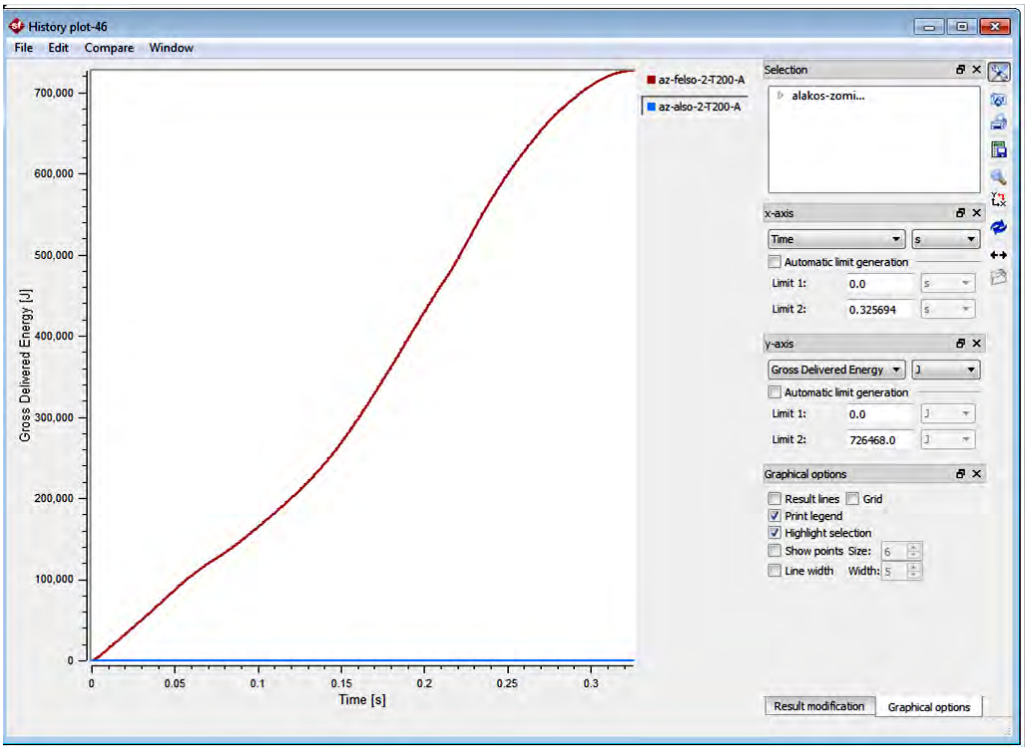
107. ábra: *A felső elősajtol–I szerszámok kopásképei*

A 106. és 107. ábrasorozat az elősajtol–I szerszámok kopásképeit mutatja. Baloldalon az állandó térfogatra beállított, jobb oldalon az állandó térfogat mellett felületre minimalizált szerszámok kopásképei láthatók.

Az azonos egység szerint beállított kopásképek alapján megállapítható, hogy az állandó térfogatra beállított szerszámfelek kopásképe kedvezőbb, várhatóan kisebb alakítási energiát vesz igénybe a használatuk.



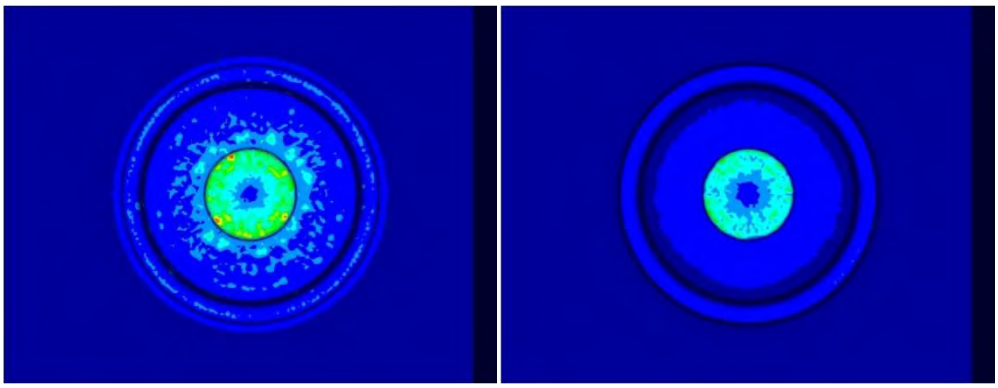
108. ábra: *Az állandó térfogatra beállított elősajtol–I művelet energia igénye*



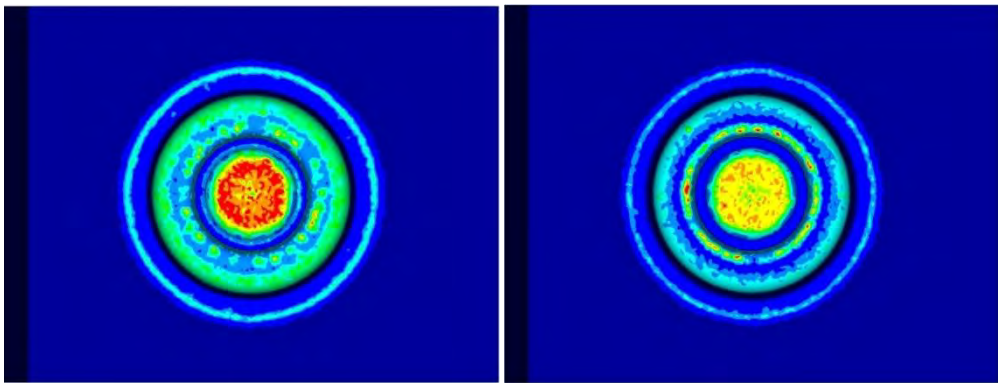
109. ábra: *Az állandó térfogaton felületre minimalizált elősajtol–I művelet energia igénye*

A 108. ábra állandó térfogatra beállított, míg a 109. ábra állandó térfogaton felületre minimalizált szerszámok használatához szükséges alakítási energia-szükségleteket mutatja az elősajtol–I fázisban. Az állandó térfogatra beállított szerszámgeometria használatának **713588** J, míg az állandó térfogaton felületre minimalizált szerszámgeometria használatának 726468 J az energia igénye. Az eredmények hasonlóságot mutatnak a kopásképekkel.

Elősajtol-II *alakítási fázisok összehasonlítása*



110. ábra: *Az alsó elősajtol–II szerszámok kopásképei*



111. ábra: *A felső elősajtol–II szerszámok kopásképei*

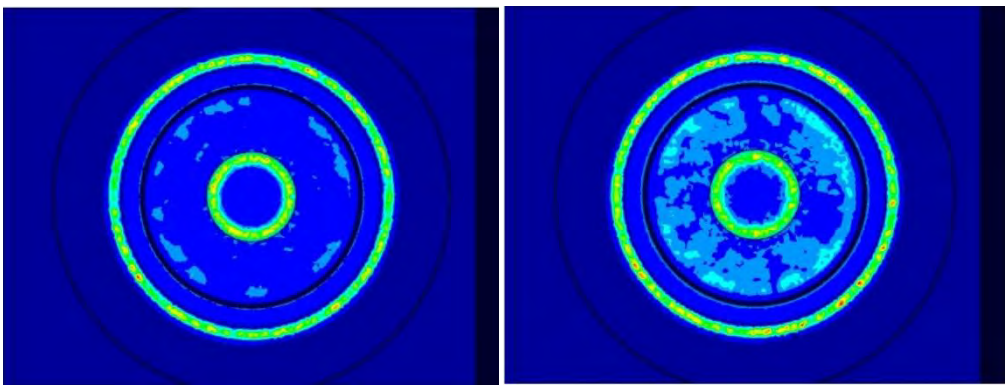
A 110. és 111. ábrasorozat az elősajtol–II szerszámok kopásképeit mutatja. Baloldalon az állandó térfogatra beállított, jobb oldalon az állandó térfogaton felületre minimalizált szerszámok kopásképei láthatók.

Az azonos egység szerint beállított kopásképek alapján megállapítható, hogy az állandó térfogaton felületre minimalizált szerszámfelek kopásképe kedvezőbb, várhatóan kisebb alakítási energiát vesz igénybe a használatuk.

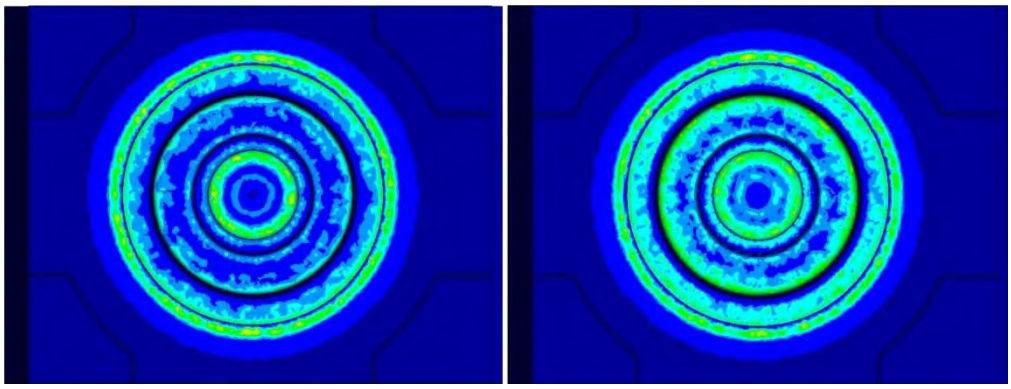
Az elősajtol-II alakítási fázis energiafelhasználási diagramja jellegében azonos a korábban bemutatott diagramokéval, a vizsgálathoz kapcsolódó eltérések a felhasznált energia mennyiségében találhatók, ezért a további ábrázolásoktól eltekintettem.

Az állandó térfogatra beállított szerszámgeometria használatának 147086 J, míg az állandó térfogaton felületre minimalizált szerszámgeometria használatának **121417** J az energia igénye. Az eredmények itt is hasonlóságot mutatnak a kopásképekkel.

Készre sajtolások *összehasonlítása*



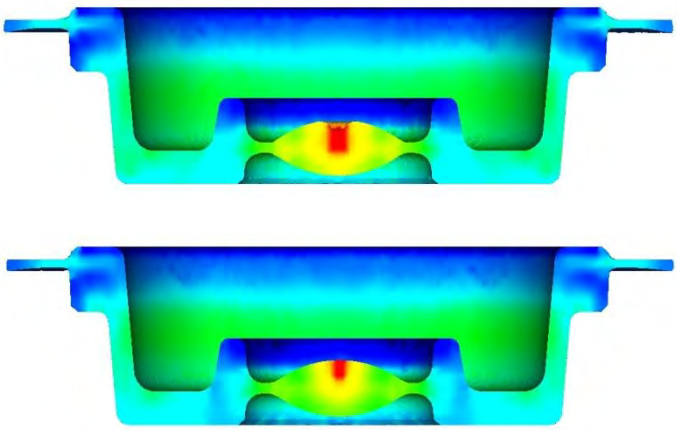
112. ábra: *Az alsó készre sajtoló szerszámok kopásképei*



113. ábra: *A felső készre sajtoló szerszámok kopásképei*

A 112. és 113. ábrasorozat azonos geometriájú, de eltérő alakítási sorozatból kikerült előalakot használó készre sajtoló szerszámok kopásképeit mutatja. Bal oldali ábrákon az állandó térfogaton, míg a jobb oldali ábrákon az állandó térfogaton csökkentett felületű előalakokat használó készre sajtoló szerszámok kopásképei láthatók. A teljes alakítási sorozatban állandó térfogatra beállított előalakot felhasználó szerszámgeometria használatának **167285** J, míg a teljes alakítási sorozatban állandó térfogaton felületre minimalizált szerszámgeometria használatának 182834 J az energia igénye. Az eredmények ugyancsak hasonlóságot mutatnak a kopásképekkel.

Az azonos geometria ellenére, jól látható eltérések mutatkoznak a kopásképekben és az alakítás energiaszükségletében. Az eltéréseket a sorozatban egymásra épülő állandó térfogatra beállított illetve állandó térfogaton felületre minimalizált előalakok közötti geometriai különbségek okozzák. Ezt a megállapítást támasztják alá a készre sajtolt geometriák eltérő alakváltozásaival végbemenő üregtöltődések (114. ábra).



114. ábra: *állandó térfogatra beállított (felül) és állandó térfogaton felületminimalizált (alul) készre sajtolások üregtöltésbeli eltérései*

A 114. ábra felső képén az állandó térfogatra beállított előalak készre sajtolása, míg az alsó képen az állandó térfogaton felület minimalizált előalak készre sajtolása közötti különbségek láthatók. Az eltérés különösen feltűnő a rekompenzációs üregnél.

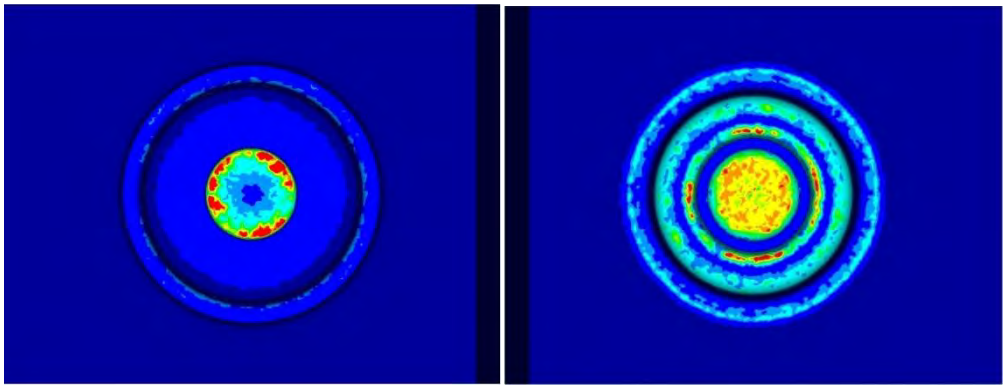
Az eltérő felületek miatt célszerű ellenőrizni a készre sajtolt geometriákon a sorjahidak magassági értékeit. A kovácsrajzon előírt érték 4,0 mm. Az állandó térfogatra beállított előalakot felhasználó készre sajtolt geometria esetén a mért érték 3,99 mm, a másik esetben ez az érték 3,985 mm. Megállapítható, hogy a löketbeállítások megfelelőek, az eltéréseket valóban az eltérő felületek generálják.

Az analízis eredményei alapján célszerűnek tűnik a legkisebb kopást illetve alakítási energiát igénylő előalakító szerszámok kombinált alkalmazása.

3.4.4. Alakítási energia csökkentése térfogat és felület optimumok kombinációjával

A kombináció során a 3.4.3. fejezet szerinti kisebb energia igényű elősajtol–I előalakot, amelyet állandó térfogaton beállítva hoztunk létre, helyezzük az állandó térfogaton felületminimalizálással létrehozott elősajtol–II szerszámba.

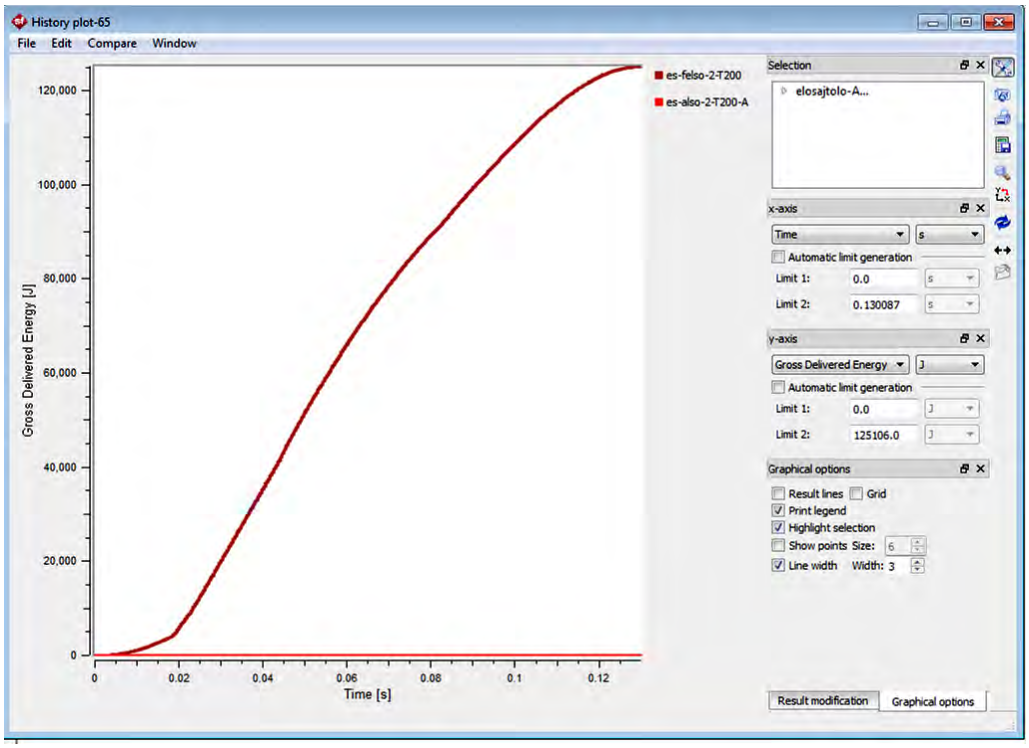
Megismételjük a korábbi analízist (115. ábra).



115. ábra: *A kombinált alsó (bal) és felső (jobb) elősajtol–II szerszám kopásképe*

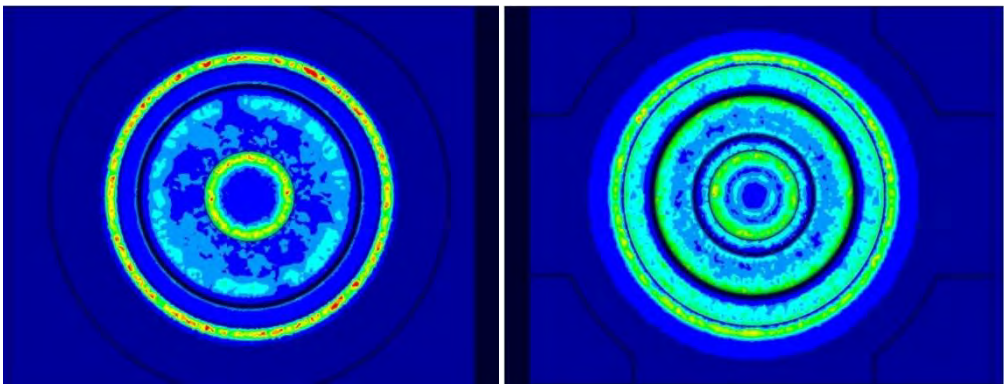
Az azonos alapra hozott kopásképkedvezőbb, mint az állandó térfogatra beállított szerszám esetén és közel hasonló illetve kismértékben kedvezőtlenebb az állandó térfogaton minimalizált felületű szerszámhoz viszonyítva.

Ezt a megállapítást alátámasztja a kombinált elősajtol–II fázis energia szükségletét bemutató diagram is (116. ábra). A 116. ábrán látható, hogy a kombinált elősajtol–II művelet energia igénye **125106** J.



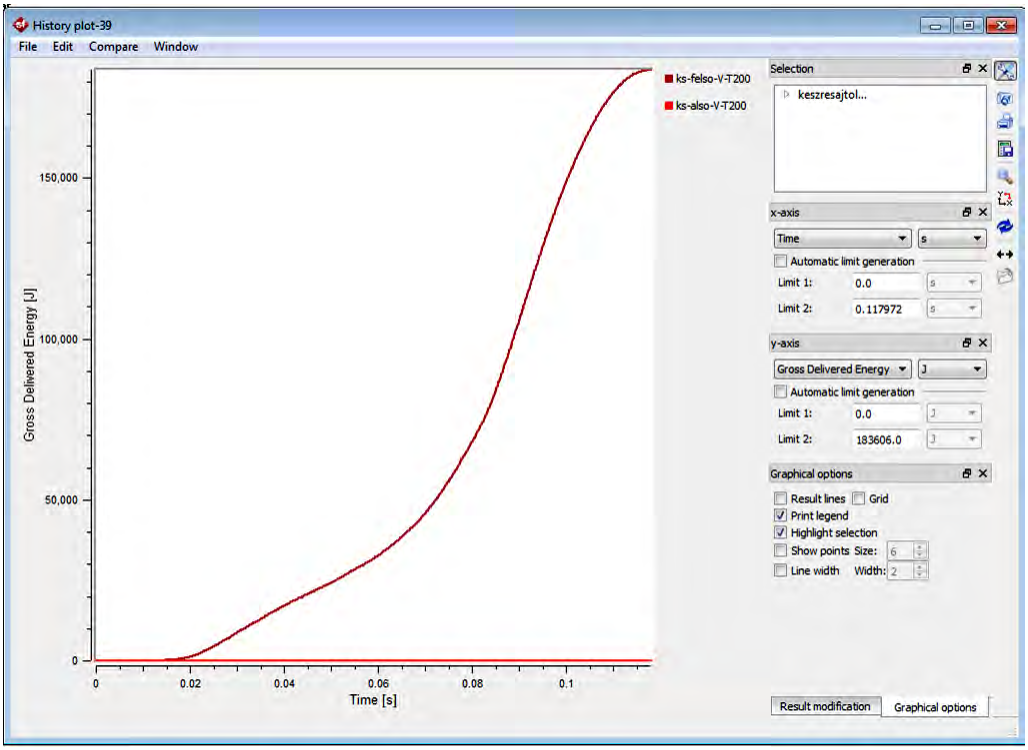
116. ábra: *A kombinált elősajtol-II műveletének energia igénye*

A kombinált módon létrehozott elősajtol–II geometria, amely az eltérő üregtöltődési viszonyok miatt kismértékben eltér a korábban ugyanabból a szerszámból kikerült geometriától, a készre sajtoló szerszámba kerül. A készre sajtolás FVM analízisét megismételjük (117. ábra).



117. ábra: *A kombinált alsó (bal) és felső (jobb) készre sajtoló kopásképe*

Az azonos alapra konvertált kopásképek közel azonosak az állandó térfogaton minimalizált szerszámfelület kopásképeivel. Ezt a megállapítást alátámasztja a kombinált készre sajtolás energia szükségletét bemutató diagram is (118. ábra).



118. ábra: *A kombinált készre sajtolás műveletének teljesítmény igénye*

A 118. ábrán látható, hogy a kombinált készre sajtolási művelet teljesítmény igénye 183606 J.

Az eredményeket összegezve:

- A teljes alakítási sorozatban állandó térfogatra beállított előalakot felhasználó szerszámgeometriák használatának teljes energia igénye: 1027,959 KJ.
- A teljes alakítási sorozatban állandó térfogaton felületre minimalizált szerszámgeometria használatának teljes energia igénye: 1030,719 KJ.
- A kopásképek és teljesítmény igények alapján kombinált alkalmazású szerszámgeometria használatának teljes energia igénye: **1022,300** KJ.

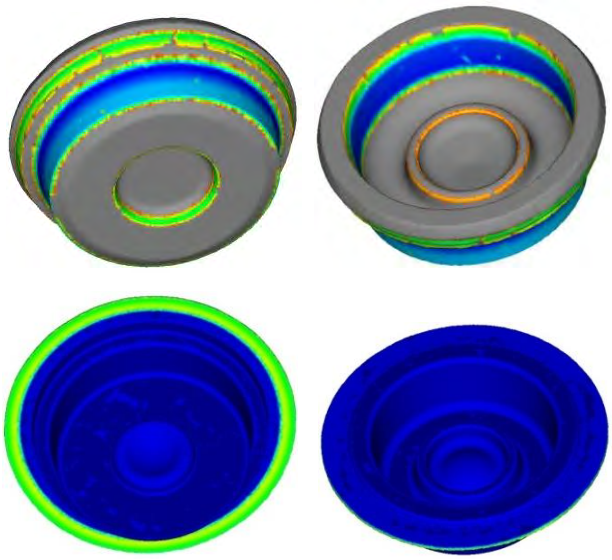
Az eredmények alapján megállapítható, hogy az egyszerűen alkalmazható kombinált eljárással egy kovácsdarab legyártásához a jelenlegi állandó térfogatra beállított geometriák használatához képest **5,66** KJ mennyiséggel kell kevesebb energia. Mindez azt jelenti, hogy megközelítőleg minden 200. kovácsdarab kovácsolási energia szükségletét fedezi az új módszer. A szokásos 2000 db szériamennyiség esetén ez 10 kovácsdarab energia igényének felel meg (0,5%).

Megállapítható, hogy bonyolult, szűk mozgásterű NNS kovácsdarabok esetén alkalmazható az alakítási energia csökkentésére a kombinált eljárás.

Célszerű kiegészítő vizsgálatok:

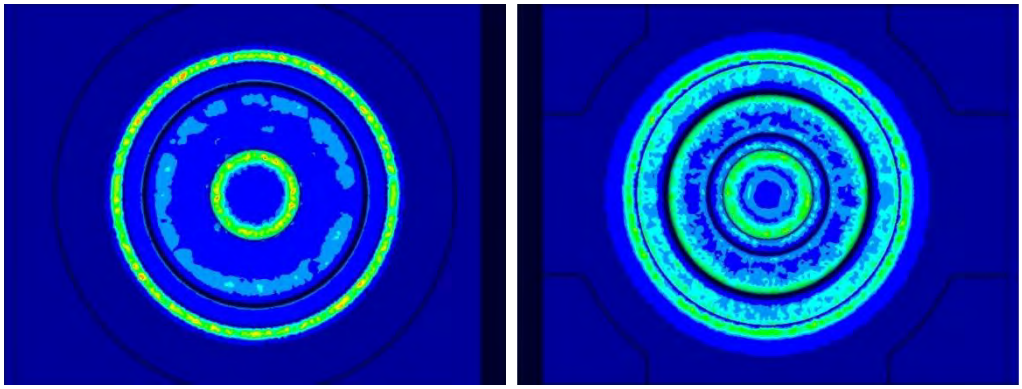
A geometria-optimalizációs módszereket mindig célszerű kiegészíteni a löketbeállítás vagy az üregtöltő kényszerek, elsősorban a sorjahíd felülvizsgálatával is.

Abban az esetben, ha a tűrésmezőn belüli mérési pontossági küszöbérték alatt maradunk, ami kisebb mint a teljes tűrésmező 10%-a, 0,3 mm mértékű löketállítás végrehajtható (hs=4,285 mm). A készre sajtolás energiaszükséglete ezzel a beavatkozással tovább csökken 164014 J értékre. A végrehajthatóság feltételeként az üregtöltődési ellenőrzéseket mindig el kell végezni (119. ábra).



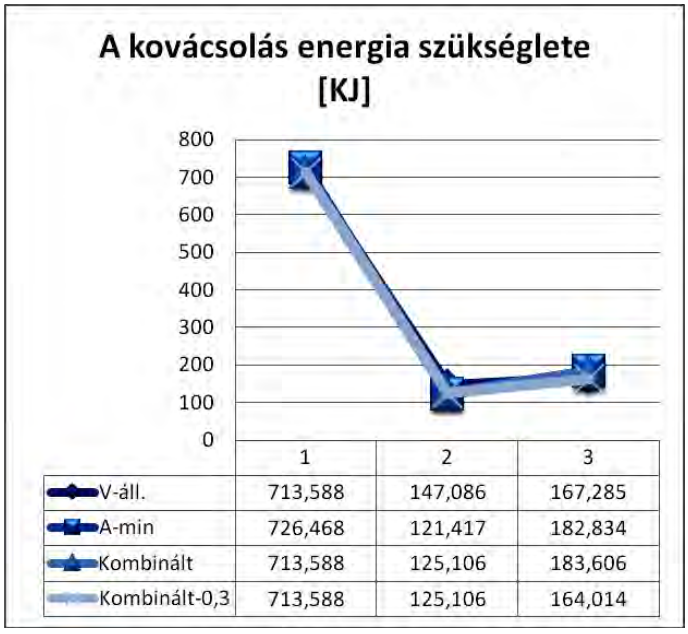
119. ábra: *A munkadarab geometriája alakítás előtt (felül) és alakítás után (alul). A kék szín a szerszámfelülettől zéró távolságra lévő felületeket jelöli.*

Az eredmény a kopásképekben is megmutatkozik (120. ábra).



120. ábra: *A kombinált alsó (bal) és felső (jobb) készre sajtoló kopásképe 0,3 mm-el csökkentett löket esetén*

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a löket mérési hibahatáron belüli csökkentésével **25,251** KJ energia mennyiséggel kell kevesebb energia (121. ábra) egy kovácsdarab előállításához



	1	2	3
V-áll.	713,588	147,086	167,285
A-min	726,468	121,417	182,834
Kombinált	713,588	125,106	183,606
Kombinált-0,3	713,588	125,106	164,014

121. ábra: *A kombinált sajtolás teljesítmény igénye*

A számadatok azt jelentik, hogy megközelítőleg minden 40. kovácsdarab kovácsolási energiaszükségletét fedezi az új módszer. A szokásos 2000 db szériamennyiség esetén ez 50 kovácsdarab energiaigényének felel meg (2,5%).

Napjaink piacvezető CAE rendszerei lehetővé teszik az anyag átalakulásainak mikro-szerkezeti vizsgálatát is [81]. A lehűlési és hőkezelési modulok korábban bemutatott módszerrel kapcsolt alkalmazása az összes energiaszükséglet további csökkenéséhez vezet.

IV. tézis

A teljes alakítási energia csökkentése érdekében a fokozatos alakadású többüregű süllyesztékes kovácsolás virtuális gyártástervezésénél többváltozós korlátozott szélsőérték számítással a térfogat-állandóság biztosításán túl optimalizálható a közbenső alakok felületének nagysága is, ezzel hatékony módszer biztosítható az azonos térfogatú, eltérő méretkombinációjú előalakok minősítésére, kiválasztására.

A IV. tézist alátámasztó saját hivatkozások: [27][28][68][74]

4. Összefoglalás, továbblépési lehetőségek

A *súrlódási tényező 3.1. és 3.2. fejezetekben* ismertetett egyszerűsített meghatározási módszere a megadott korlátok között lehetővé teszi a CAD geometria közvetlen előállítását MathCAD - CAD szoftverek kapcsolt alkalmazásával. Erre konkrét példát mutattam be a 3.4. fejezetben. A profilgörbe-korlátot ellenőrző algoritmus lehetőséget nyújt nemcsak az alkalmazhatóság megítélésére, hanem arra is, hogy milyen kenésmódosítás szükséges a profilgörbe hibahatáron belül tartásához. Ez utóbbi előny akkor mutatkozik meg, amikor a zömített geometria szoros illesztésű üregbe kerül. A profilgörbe ismerete lehetővé teszi a robot kiszolgálású gyártósorokon a megfogó felületek pontosabb tervezését, a valós felülethez illesztését. A súrlódási tényező egyszerűsített meghatározásával a véges-elemes analízisek pre-processzálása pontosabb lehet (súrlódási tényező korrektebb beállítása). A módszert a Rába sikerrel tesztelte többüreges kovácsolásnál használatos előzömített CAD geometria és a robotkar megfogó felületek megtervezésénél. A 3.1. és 3.2. fejezetben bemutatott módszer több fejlesztési irányvonalat is kijelöl. Fejlődési lehetőség a geometriai állandóság, a matematikai korlát szűkítése, melyet a gyakorlati megvalósításban egy számítógépes kenésszabályozás biztosíthat. A digitális fényképeket kiértékelő megoldások még újszerűek a melegalakítás területén, annak ellenére, hogy számos tudományág már régóta alkalmaz terület-specifikus módszereket. A profilgörbék matematikai közelítésénél (3.1.2. fejezet) bemutatott eredmények szintén alkalmasak a területen új fejlesztési irányok kijelölésére, mivel a munkadarab megsemmisítése nélkül nyerhetők mérnöki információk a gyártási folyamatról.

A *3.3. fejezetben ismertetett kopási folyamatok*, kopási tényezők egyszerűsített, mégis jó közelítést adó meghatározhatósága a bemutatott MathCAD algoritmusok alapján egyértelműen segíti a zömítő szerszámok élettartamra tervezhetőségét, a megfelelő szerszámanyag kiválasztását, lehetőséget biztosít különböző felületi eljárások tesztelésére, költséghatékony alkalmazására. Az új zömítő szerszámok bekopási fázisának kezdetén vizsgálható a zömítéskor keletkező lenyomat. A lenyomat kapcsolatba hozható a Kudo-féle súrlódási tényezővel. A kezdeti kopási lenyomat alapján a súrlódási tényező egyszerű képkiértékeléssel is jó közelítéssel meghatározható. Fejlődési potenciált elsősorban a bonyolult alakadó felülettel rendelkező alakító szerszámok területe, azok élettartam növelési lehetőségei jelenthetik.

A *3.4. fejezetben* valós kovácsdarabon bemutatott korlátozott szélsőérték számítás módszere lehetőséget nyújt az energiatakarékosabb és rugalmasabb gyártástervezésre. Az állandó térfogaton felületoptimalizálással tervezett szerszámok alkalmazása elvezetett a kovácsolás teljes energiaszükségletének csökkenéséhez. A javasolt módszer egyszerűen alkalmazható a FEM vagy FVM analízis energia- vagy kopásvizsgálata alapján. A módszert a Rába már beépítette a virtuális tervezői rendszerébe. A fejlesztési potenciált elsősorban a klasszikus dinamikus programozás automatizált megvalósítása jelenti, melynek kifejlesztéséhez további kutatómunkára van szükség.

A bemutatott eredmények, a tudományos értéken és ipari alkalmazhatóságon túlmenően, fejlesztési lehetőséggel rendelkeznek, további kutatásokat igényelnek.

Irodalomjegyzék

[1] ABACHI, S.: *Wear analysis of hot forging dies*, PhD disszertáció: Middle East Technical University, Department of Mechanical Engineering, (2004).

[2] ALFOZAN, A., GUNASEKERA, J.S.: *An Upper Bound Elemental Technique Approach to the Process Design of Axisymmetric Forging by Forward and Backward Simulation*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142 (3), (2003), 619-627.

[3] ALTAN, T., NGAILE, G., SHEN, G.: *Cold and Hot Forging – Fundamentals and Applications*, könyv: ASM International, Materials Park Ohio (2004), 26-49, 67-81.

[4] ANTONIO, C.A.C., DOURADO, N.M.: *Metal-forming Process Optimization by Inverse Evolutionary Search*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 121, (2002), 403-413.

[5] ARCHARD, J.F.: *Contact and Rubbing of Flat Surfaces*, Journal of Applied Physics, Vol. 24 (8), (1953), 981-988.

[6] BALOGH T.: *Érintkező felületek száraz súrlódáskor lejátszódó folyamatok numerikus és kísérleti vizsgálata*, PhD disszertáció: BME, Közlekedésmérnöki Kar, (2007).

[7] BARRAU, O., BOHER, C., VERGNE, C., REZAI-ARIA, F., GRAS, R.: *Investigations of Friction and Wear Mechanisms of Hot Forging Tool Steels*, Konferencia kiadvány: 6th International Tooling Conference, Karlstad, (2002), 95-111.

[8] BARRAU, O., BOHER, C., GRAS, R., REZAI-ARIA, F.: *Analysis of the Friction and Behaviour of Hot work Tool Steel for Forging*, Wear, Vol. 255 (7-12), (2003), 1444-1454.

[9] BEHRENS, B.A., SCHÄFER, F., HUNDERTMARK, A., BOUGUECHA, A.: *Numerical Analysis of Tool Failure in Hot Forging Processes*, Obróbka Plastyczna Metalit. XIX nr 4, (2008), 11-17.

[10] BIGLARI, F.R., O'DOWD, N.P., FENNER, R.T.: *Optimum Design of Forging Dies Using Fuzzy Logic in Conjunction with the Backward Deformation Method*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 38 (8), (1998), 981-1000.

[11] BONET, J., WOOD, R.D.: *Nonlinear Continuum Mechanics For Finite Element Analysis*, Könyv: Cambridge University Press, Cambridge, (1997), chapter seven: 1-28, chapter eight: 1-42.

[12] BURGDORF, M.: *Untersuchungen über das Stauchen und Zapfenpressen*, könyv: Girardet, Stuttgart (1966), 18-184.

[13] BUSCHHAUSEN, A., WEINMANN, C., LEE, J.Y., ALTAN, T.: *Evaluation of Lubrication and Friction in Cold Forging Using a Double-backward Extrusion Process*, Journal of Material Processing Technology, Vol. 33 (1-2), (1992), 95-108.

[14] CASTRO, C.F., ANTONIO, C.C., SOUSA, L.C.: *Accounting Uncertainties int he Optimal Design of Multi-stage Hot Forging,* Konferencia kiadvány: EngOpt-2008 3rd International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro, (2008), 1-8.

[15] CECIL, M.R., VELU, R.: *Spike and Disc Forming Test for Friction Measurement in Cold Forming of Aluminium Alloys*, Indian Journal of Science and Technology, Vol. 4 No. 6, (2011), 652-656.

[16] CHEN, Z.Y., XU, S.Q., DONG, X.H.: *Deformation Behavior of AA6063 Aluminium Alloy After removing Friction Effect Under Hot Working Conditions*, Acta Metallurgica Sinica, Vol. 21 No. 6, (2008), 451-458.

[17] CINTRÓN, R., SAOUMA, V.: *Strain Measurements with the Digital Image Correlation System Vic-2D*, Kutatási jelentés: Center for Fast Hybrid Testing, Department of Civil Environmental and Architectural Engineering University of Colorado, (2008), 1-23.

[18] EBRAHIMI, R., NAJAFIZADEH, A.: *A New Method for Evaluation of Friction in Bulk Metal Forming*, Journal of Materials Processing Technology, Vol.152 (2), (2004), 136–143.

[19] GANDER, W., HŘEBIČEK, J.: *Solving Problems in Scientific Computing Using MAPLE and MATLAB*, könyv: Springer, Berlin, (1995), 219–236.

[20] GELEJI S.: *A fémek képlékeny alakításának elmélete*, könyv: Akadémiai kiadó, Budapest, (1967), 79-116.

[21] GROBASKI, T.C.: *Preliminary Research for the Development of a Hot Forging Die Life Prediction Model*, PhD disszertáció: Ohio State University, Department of Mechanical Engineering, (2004).

[22] GRÜEBLER, R.: *Simulation des Umformtechnischen Tribosystems*, PhD disszertáció: Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich, (2002).

[23] HALBRITTER E.: *Modeling of Material Flow During Upsetting Between Parallel Pressure Plates*, Hungarian Electronic Journal of Sciences, Vol. 1, (1999), 1-11.

[24] HALBRITTER E.: *Multivariate Optimalization Problem with a Constraint Sing the Pro/Engineer Software,* Konferencia kiadvány: OGÉT-2007 15th International Conference on Mechanical Engineering, Kolozsvár, (2007), 135-139.

[25] HALBRITTER E., MOLNÁRKA GY.: *Calculation of the Optimal Shape of No Conical Dies by Minimizing Necessary Forces*, Advances in Engineering Software, Vol. 30 (9-11), (1999), 735-740.

[26] HALBRITTER E., SOLECKI L., TANCSICS F.: *The Effect of the Pressing Plate's Surface Roughness on Sticking,* Konferencia kiadvány: OGÉT-2008 16th International Conference on Mechanical Engineering, Brassó, (2008), 155-159.

[27] HALBRITTER E., TANCSICS F., GERGYE T.: *Alakváltozási munkaszükséglet optimalizálása kovácsoláskor CAD-CAE módszerekkel,* A Jövő Járműve, 3-4, (2008), 8-11.

[28] HALBRITTER E., TISZA M., TANCSICS F.: *Szálgyűrődési problémák vizsgálata térfogat-alakításnál véges-elemes módszerrel,* A Jövő Járműve, 3-4, (2006), 41-43.

[29] HAN, H.: *Determination of Flow Stress and Coefficient of Friction for Extruded Anisotropic Materials under Cold Forming Conditions*, PhD disszertáció: Royal Institute of Technology, Department of Production Engineering, (2002).

[30] HATZENBICHLER, T., HARRER, O., BUCHMAYR, B., PLANITZER, F.: *Effect of Different Contact Formulations Used in Commercial FEM Software Packages on the Result of hot Forging Simulations*, La Metallurgia Italiana, n. 11-12, (2010), 11-15.

[31] HORLACHER, U.: *Prüfung des Einflusses von Schmierstoffadditiven auf das Tribosystem bei der Kaltmassivumforming*, Könyv: Springer-Verlag, Stuttgart, (1989), 16-36.

[32] JHALAI, R.L., KOTHARI, K.D., KHANDARE, S.S.: *Geometry and Size Optimization for a Steering Knuckle with no Change in Attachment Geometry by Reducing Production Cost and Weight*, International Journal of Advanced Engineering & Application, Vol.1, (2010), 322-327.

[33] JOLGAF, M., SULAIMAN, S.B., ARIFFIN, M.K.A., FAIEZA, A.A.: *Billet Shape Optimization for Minimum Forging Load*, European Journal of Scientific Research Vol.24 No.3, (2008), 420-427.

[34] KIM, D.H., KIM, B.M., KANG, C.K.: *Die Life Estimation of Hot Forging for Surface Treatment and Lubricants*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 5 No.4, (2004), 5-13.

[35] KO, D.C., KIM, D.H., KIM, B.M.: *Finite Element Analysis for the Wear of Ti–N Coated Punch in the Piercing Process*, Wear, Vol. 252 (11), (2002), 859–869.

[36] KOZMA I., TANCSICS F.:*Simplified Determination of the Friction Coefficient Based on Abrasion Mark,* Konferencia kiadvány: OGÉT-2013 21st International Conference on Mechanical Engineering, Arad, (2013), 220-223.

[37] KOZMA I., TANCSICS F., HALBRITTER E.: *Modelling of the Expectable Shape of the Barrelling Working Piece*, Konferencia kiadvány: OGÉT 2010 18th International Conference on Mechanical Engineering, Nagybánya, (2010), 261-264.

[38] LEWIS R., OLOFSSON, U.: *Mapping rail wear regimes and transitions*, Wear, 257 (7-8), (2004), 721-729.

[39] LI, Y., ONODERA, E., CHIBA, A.: *Friction Coefficient in Hot Compression of Cylindrical Sample*, Materials Transactions, Vol. 51, No. 7, (2010), 1210-1215.

[40] LIM, S.C.: *Recent developments in wear mechanism.*, Tribology International, Vol.31 No's 1–3, (1998), 87–97,

[41] LIN, Y.T., WANG, J.P.: *A New Upper-Bound Elemental Technique Approach*, Journal of Computers & Structures, Vol. 65 No.2, (1997), 601-611.

[42] MAJD, H.M., AZIZPOUR, M.J., SAADI, F.: *Prediction the deformation in Upsetting Process by Neural Network and Finite Element*, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 74, (2011), 276-279.

[43] MARSCHNER, S.R., WESTIN, S.H., LAFORTUNE, E.P.F., TORRANCE, K.E., GREENBERG, D.P.: *Image-Based BRDF Measurement Including Human Skin*, Konferencia kiadvány: Proceedings of the 10th Euro graphics Workshop on Rendering, Granada, (1999), 139-152.

[44] MATVEESKY, R.M.: *The Critical Temperature of Oil with Point and Line Contact Machines,* ASME Transactions*,* 87, (1965), 754.

[45] MASEN, M.A.: *Abrasive Tool Wear in Metal Forming Processes*, PhD disszertáció: University of Twente, Enschede, (2004).

[46] MENEZES, P.L., KAILAS, K., KAILAS, S.V.: *Subsurface Deformation and the Role of Surface Texture-A Study with Cu Pins and Steel Plates*, Sãdhanã, Vol. 33 (3), (2008), 191–201.

[47] NARAYANAN, R.G., GOPAL, M., RAJADURAI, A.: *Influence of Friction in Simple Upsetting and Prediction of Hardness Distribution in a Cold Forged Product*, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 36 No. 4, (2008), 1-13.

[48] PANESAR, S.S.: *Evaluation of Wear Coefficient of Hot Forging Dies in Hammer Forging*, PhD disszertáció: Thapar University, Patiala, (2008).

[49] PETERSON, K.A.: *Introduction to Basic Measures of a Digital Image for Pictorial Collections*, Konferencia kiadvány: 5th Library of Congress, Washington, (2005), 1-8.

[50] PICKLE, J.: *Measuring the Area of Irregular Shaped Objects in Digital Images Using Image Analysis Software,* könyv: Museum of Science, Boston, (2005), 1-14.

[51] PODRA, P., ANDERSSON, S.: *Simulating sliding wear with finite element method*, Tribology International, Vol.32 No2, (1999), 71-81.

[52] POURSINA, M., PARVIZIAN, J., ANTONIO, C.A.C.: *Optimum Pre-form Dies in Two-stage Forging*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 174, (2006), 325-333.

[53] PRAGER, W., HODGE, P.G.: *Theory of Perfectly Plastic Solids*, Könyv: Wiley, New York, 1951, 1-264.

[54] RAMALHO, A., MIRANDA, J.C.: *The Relationship Between Wear and Dissipated Energy in Sliding Systems*, Wear, 260, (2006), 361-367.

[55] REPALLE, J., GRANDHI, R.V.: *Design of Forging Process Variables under Uncertainties*, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 14(1), (2005), 123-131.

[56] ROQUE, C.M.O.L., BUTTON, S.T.: *Application of the Finite Element Method in Cold Forging Processes*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. 22 No.2, (2000), 189-202.

[57] RUBINIEČ, M.P., DOBRAZAŃSKI, L.A.: *Comparison of the CrN and TiN/(Ti,Al)N PVD Coatings Deposited onto Plasma Nitrited Steel*, International Scientific Journal, Vol. 54 (2), (2012), 78-85.

[58] RUBINIEČ, M.P., DOBRAZAŃSKI, L.A., ADAMIAK, M.: *The Properties and Wear Resistance of the CrN PVD Coatings*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 30 (2), (2008), 165-171.

[59] SHAHRIARI, D., SADEGHI, M.H., EBRAHIMI, G.R., KIM, K.T.: *Effects of Lubricant and Temperature on Friction Coefficient During Hot Forging of Nimonic 115 Super Alloy*, Metallic Materials, Vol. 49 (5), (2011), 375-383.

[60] SIEBEL, E.: *Die formgebung im bildsamen zustand*, könyv: Verlag Stahleisen, Düsseldorf, (1932), 32-46.

[61] SOFUOUGLU, H., GEDIKLI, H., RASTY, J.: *Determination of Friction Coefficient by Employing the Ring Compression Test*, ASME Transactions, Vol. 123, (2001), 338-348.

[62] SOLECKI L., HALBRITTER E.: *Macro- and Micro geometrical Comparison of the Surfaces of Forming Dies*, Konferencia kiadvány: ICT-2012 13th International Conference on Tools, Miskolc, (2012), 245-250.

[63] SRIKANTH, A., ZABARAS, N.: *Shape Optimization and Preform Design in Metal Forming Processes*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 190, (2000), 1859-1901.

[64] SOFUOGLU, H.: *Physical Modelling and Finite Element Analysis of Friction Encountered in Large Deformation Processes*, PhD disszertáció: Texas Technical University, Department of Mechanical Engineering, (1993).

[65] STÄLBERG, U., HALLSTRÖM, J.: *A comparison between two wear models*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87(1-3), (1999), 223-229.

[66] TAKEMATSU, T., VAZQUEZ, V., PAINTER, B., ALTAN, T.: *Investigation of Metal Flow and Preform Optimization in Flashless Forging of a Connecting Rod*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 59 (1-2), (1996), 95-105.

[67] TANCSICS F.: *Melegalakító kovácsoló szerszámok kopáselméleti kutatásainak rendszerezése,* Műszaki és informatikai rendszerek és modellek, III/1, (2009), 69-89.

[68] TANCSICS F., GERGYE T., HALBRITTER E.: *Technological Improvement and Optimization in Multiple-Cavity Forging Process with Finite Element Method (FEM),* Konferencia kiadvány: FISITA-2010 33th World Automotive Congress, Budapest, (2010), 22-25.

[69] TANCSICS F., HALBRITTER E.: *Determination of Friction Coefficient During Upsetting Using a Kinematically Admissible Velocity Field,* Strojnícky Časopis, Journal of Mechanical Engineering, Vol.63 No.4, (2012), 197-223.

[70] TANCSICS F., HALBRITTER E.: *PVD Coating and Up-To-Date Wear Test of Hot Forming Tools,* Hungarian Journal of Industrial Chemistry, Vol. 40 (1), (2012), 19-24.

[71] TANCSICS F., HALBRITTER E.: *Melegalakító szerszámok kopásvizsgálata*, A Jövő Járműve, 01-02, (2012), 29-35.

[72] TANCSICS F., HALBRITTER E.: *A súrlódási tényező újszerű meghatározása és felhasználása a Pro/Engineer és MathCAD szoftverek segítségével*, GÉP, LXI/7, (2010), 34-42.

[73] TANCSICS F., HALBRITTER E.: *Inspection of Barrelling of Upset Forgings Based on Digital Photographs,* Acta Technica Jaurinensis, (lektorált, megjelenése folyamatban).

[74] TANCSICS F., HALBRITTER E., GERGYE T.: *Using Up-to-Date Software in Technological Improvements and Optimization of Multiple Cavity Forging,* Strojnícky Časopis, Journal of Mechanical Engineering, Vol.62 No.4, (2011), 191-203.

[75] TANCSICS F., HALBRITTER E., KISS B.: *Simplified Determination of Friction Coefficient by Upsetting*, Konferencia kiadvány: OGÉT-2009 17th International Conference on Mechanical Engineering, Gyergyószentmiklós, (2009), 384-387.

[76] TANCSICS F., HALBRITTER E., KISS B.: *Limit Analysis of Adaptation of the Mathematical Model Made to Determine Friction Coefficient,* Konferencia kiadvány: OGÉT-2011 19th International Conference on Mechanical Engineering, Csíksomlyó, (2011), 355-359.

[77] TANCSICS F., KOZMA I., KISS B., HALBRITTER E.: *A tengelycsonk kovácsolásánál használatos robot munkadarab-befogó pofájának alakhelyes tervezése, a súrlódási tényező figyelembe vételével,* A Jövő Járműve, 3-4, (2009), 16-21.

[78] TANCSICS F., SOLECKI L., HALBRITTER E.: *Development of a New Wear Test Method For Hot Forming,* Acta Technica Jaurinensis, (lektorált, megjelenése folyamatban).

[79] THIYAGARAJAN, N., GRANDHI, R.V.: *Multi-level Design for 3-D Preform Shape Optimization in Metal Forming*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 170, (2005), 421–429.

[80] TILLMANN, W., VOGLI, E., BAUMANN, I., HOFFMANN, F.: *Functional Wear Resistant Tool Surfaces for Hot Metal Forming Processes*, Konferencia kiadvány: CHS2-2008 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High Performance Steel, Cassel, (2008), 133-143.

[81] TISZA M., LUKÁCS ZS., GÁL G.: *Numerical Modelling of Hot Forming and Heat Treatment of Annular Gears*, Production Processes and Systems, Vol.5 No.1, (2012), 115-126.

[82] TOMOV, B., RADEV., R.: *An Example of Determination of Preforming Steps in Hot Die Forging*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 157–158, (2004), 617–619.

[83] VÉGVÁRI F.: *Felületen bevont szerszámok gyakorlati alkalmazásának eredményei a képlékenyalakításban*, Konferencia kiadvány: FMTÜ-2009 14th International Scientific Congress, Kolozsvár, (2009), 233-238.

[84] VERGNE, C., BOHER, C., LEVAILLANT, C., GRAS, B.: *Analysis of the Friction and Wear Behavior of Hot Work Tool Scale: Application to the Hot Rolling Process*, Wear, 250 (1-12), (2001), 322-333.

[85] WANG, S.L., RAMAEKERS, J.A.H., SMEETS, M.J.H.: *Development of a Plane Strain Compression Tribometer, Laboratory for Forming Technology*, Konferencia kiadvány: 1st International Symposium on Tribology, Beijing, (1993), 637-645.

[86] YANHUI, Y., DONG, L., ZIYAN, H., ZIJIAN, L.: *Optimization of Preform Shapes by RSM and FEM to Improve Deformation Homogeneity in Aerospace Forgings*, Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 23 (2), (2010), 260-267.

[87] ZAMANI, M., BIGLARI, F.R.: *Finite-element Investigation of Wear in Hot Forging*, Konferencia kiadvány: TICME-2005 1st International Congress on Manufacturing Engineering, Tehran, (2005), 1-9.

[88] ZMITROWITZ, A.: *Wear Patterns and Laws of Wear - a Review*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 44 (2), (2006), 219-253.

A disszertáció eredményeinek rövid kivonata

A *3.1. fejezetben* egy új, **CAD** (*Computer Aided Design*) - MathCAD rendszerek kapcsolt alkalmazásán alapuló módszert mutatok be a Kudo-féle súrlódási tényező egyszerű és gyors meghatározására. Az alakítási folyamat fizikai modellezésére a párhuzamos nyomólapok között végzett zömítést alkalmazom. A matematikai modell egy kiválasztott sebességmező megoldása **UBET** (*Upper Bound Element Technique*) módszerével. A megoldás során kiemelten kezelem a zömítés során, szabadon deformálódott felületi kontúrok (profilgörbék) valamint a virtuális sebességmező anyagáramlási tényezője és a Kudo-féle súrlódási tényező közötti kapcsolatrendszert a pillanatnyi zömített magasság függvényében. A hordósodó profilgörbéket másodfokú regressziós görbével közelítettem és egy megengedett határeltérés alapján jelöltem ki az új módszer alkalmazhatóságának matematikai korlátait. A fejezet végén bemutatom a módszert leíró új algoritmust.

A *3.2. fejezetben* az első fejezetben felhasznált sebességmezőt általánosabb alakban is megfogalmazom. A sebességmező általánosabb alakja lehetőséget ad a valós melegzömítési körülmények eredményezte profilgörbe eltolódások értelmezésére. Ilyen valós esetek a felső és alsó szerszámfelületeken kialakuló eltérő súrlódási viszonyok, érintkezési idők (hőátadás), valamint a munkadarab inhomogén belső hőeloszlása.

A *3.3. fejezetben* egy olyan új módszert ismertetek, amely lehetővé teszi a robot-kiszolgálású gyártósorok zömítő szerszámfelületein fellépő súrlódási tényező kopási lenyomat alapján történő közvetett meghatározását. A módszer inverz módon is alkalmazható, algoritmizálható. A kopási folyamatok matematikai modellezésére (zömítésre jellemző a kenés nélküli súrlódási állapot) elsősorban az *Archard* és az *energetikai* kopásmodelleket alkalmazom. A modellek megoldása során kiemelten foglalkozom az első fejezetben ismertetett, a virtuális sebességmezőből levezethető elmozdulás mező és a Siebel-féle nyomáseloszlás közötti kapcsolatrendszerrel. Az alkalmazáshoz MathCAD program készült. A program alkalmas a Kudo-féle súrlódási tényező függvényében különböző felületi minőségű szerszámacélok (nemesített, **PVD** (*Physical Vapour Deposition*) bevonattal ellátott, stb.) kopási tényezőjének meghatározására, összehasonlítására, felhasználható a kopással összefüggő várható élettartam meghatározására. A virtuális sebességmező *UBET módszerének*, és a nyomáseloszlás *átlagfeszültség módszerének* együttes alkalmazása $k \neq 1$ anyagáramlási

tényező esetén elvi pontatlanságot vihet a programba (lokális sebesség és nyomás kérdésköre), ezért **FVM** (*Finite Volume Method*) segítségével közvetett módon támasztom alá a MathCAD program alkalmazhatóságát.

A *3.4. fejezetben* egy konkrét, többüreges süllyesztékes kovácsolási technológia megtervezésén keresztül bemutatok egy lehetséges megoldást az alakítás energiaszükségletének csökkentésére egy széleskörűen alkalmazott CAD-FVM rendszer (*Pro/Engineer Wildfire-4 - Simufact 11.0*) segítségével. A kovácsolási folyamat virtuális tervezésénél többváltozós korlátozott szélsőérték számítással figyelembe vehető a térfogat-állandóságon kívül a közbenső alakok felületének nagysága is. Ezzel hatékony módszer biztosítható az azonos térfogatú, eltérő méretkombinációjú előalakok minősítésére, az alakítási energia csökkentésére.

Munkámban azokat a megoldásokat részesítettem előnyben, melyek jól illeszthetők virtuális tervezői rendszerekbe.

Short abstract of the results of the thesis

In chapter 3.1. I present a new method based on connected application of **CAD** (*Computer Aided Design*) - MathCAD systems for determining Kudo friction coefficient in a prompt and easy way. I apply the upsetting between parallel pressing plates for physical modelling of the forming process. The mathematical model is a solution of a selected velocity field by **UBET** (*Upper Bound Element Technique*). During the solution I put emphasis on the relation system between freely deformed surface contours (profile curves) and the material flow factor of virtual velocity field and the Kudo friction factor at upsetting. The barreling profile curves were approached with a second-degree regression curve and I assigned the mathematical limitation of the adaptability of the new method based on a permissible boundary difference. At the end of the chapter I present the algorithm of the new method.

In chapter 3.2. I formulate the velocity field used in the first chapter in a more general way. The more general formula of the velocity field gives an opportunity to interpret the profile curves dislocations as a result of the real circumstances of hot upsetting. Such real cases are the different friction relations appearing on the upper and lower die surfaces, contact times (heat transmission) and the inhomogeneous inner heat distribution of the work piece.

In chapter 3.3. I outline a new method based on imprint of abrasion and gives possibility for an indirect determination of friction factor occurring on the pressing plates surfaces on production lines with a robot service. The method is applicable in an inverse way i.e. an algorithm can be determined. Basically I apply the *Archard* and *energetic* abrasion model for the mathematical modeling of the abrasion processes (dry friction is typical of upsetting). During the solution I put emphasis on the relation system between dislocation field derived from virtual velocity field presented in the first chapter and the pressure distribution by Siebel. A MathCAD program has been made for the application. The program is suitable for determining and comparing the abrasion factor of the tool steel surfaces based on different qualities (quenched and tempered, **PVD** (*Physical Vapour Deposition*) coated) and available for determining expectable lifetime of tool related to wear. Applying the *virtual velocity field by UBET* and *pressing distribution based on average tension methods* together with the case of the $k \neq 1$ material flow factor can cause conceptual imprecision when using the program

(issue of the local velocity and pressure). Therefore I had to confirm the applicability of the MathCAD program in an indirect way by using the **FVM** (*Finite Volume Method*).

In chapter 3.4. I illustrate the possible reduction of the forming energy through designing a concrete multi-cavity forging technology by means of widely applicated CAD-FVM (*Pro/Engineer Wildfire-4 - Simufact 11.0*) system. It is possible to take the value of pre-formed surfaces into consideration along with the volume stability by the multiple variable limited extreme value calculation at the virtual designing of the forging process. Thus efficient method is available for qualifying pre-formed pieces which have equal volume but different size combination and for reducing the forging energy as well.

In my work I preferred those solutions which can be fitted into virtual designer systems.