

# Hátrafolyatás Hengerlés

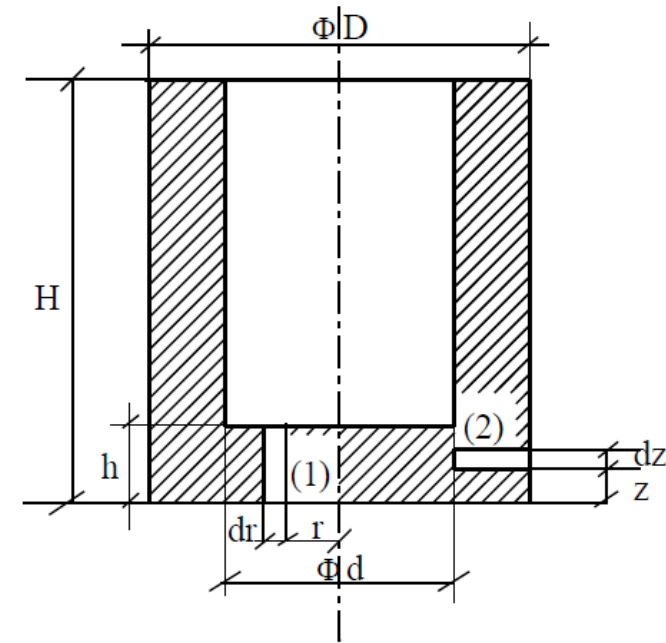
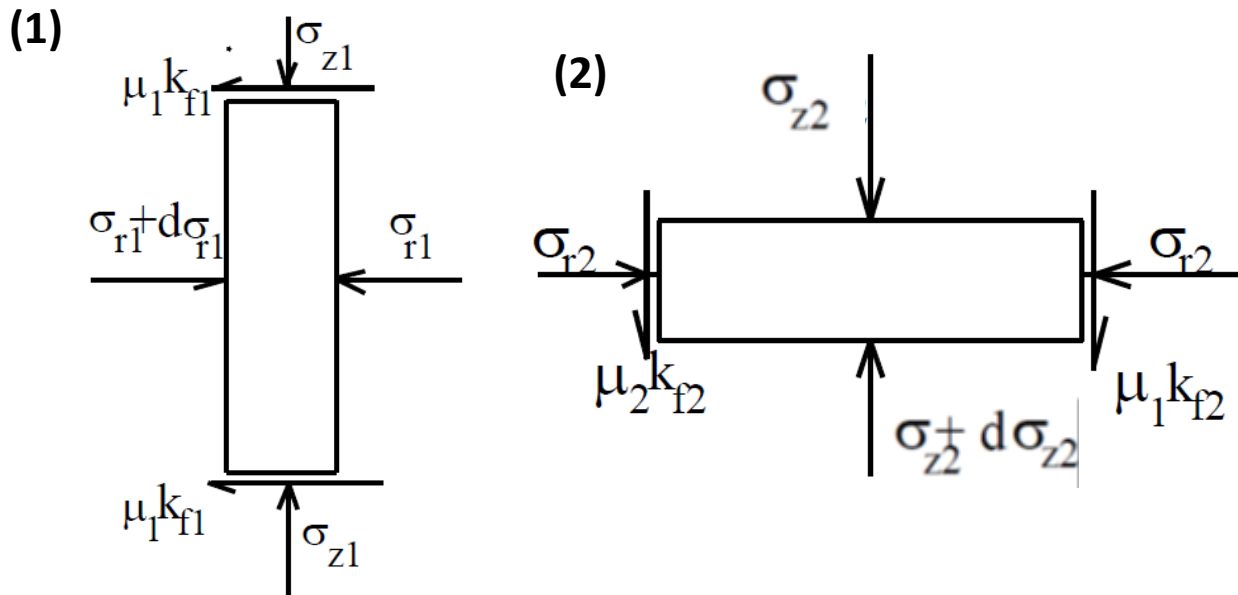
Alakítótechnológiák elmélete  
(BMEGEMTNG00)

- Hátrafolytatás
- Hengerlés

$$p_{\text{hátrafolytatás}} = k_{f1} \left( 1 + \frac{\mu_1 d}{3 h} \right) + k_{f2} \left( 1 + \mu \frac{h}{s} \right)$$

Átlag feszültség módszere. Két zónára bontva a darab térfogatát: (1) zömített hengeres rész és (2) a szerszám sarkában, a folytatott fal alatt található gyűrű alakú anyagész.

A kijelölt térfogati részekre ható erők:



Dipper szerinti elemzés

A középátmérő:  $D_k = \frac{D + d}{2}$

A falvastagság:  $s = \frac{D - d}{2}$

$\longrightarrow D^2 - d^2 = 4D_k s$

A (2) jelű térfogatelemre a statikai egyensúlyi egyenlete a tengely (z) irányban.

$$(\sigma_{z2} + d\sigma_{z2} - \sigma_{z2}) \frac{D^2 - d^2}{4} \pi - 2\mu k_{f2} d_k \pi dz = 0$$

Coulomb súrlódási modell  
Egyszerűsítés(!)

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$$

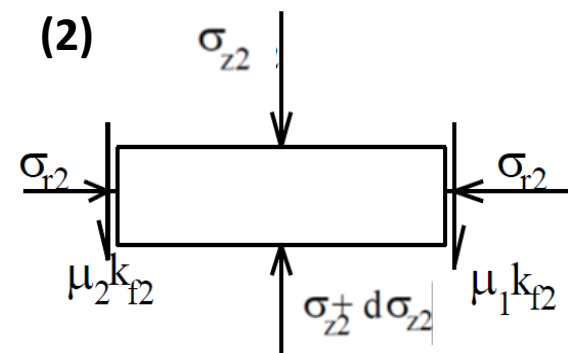
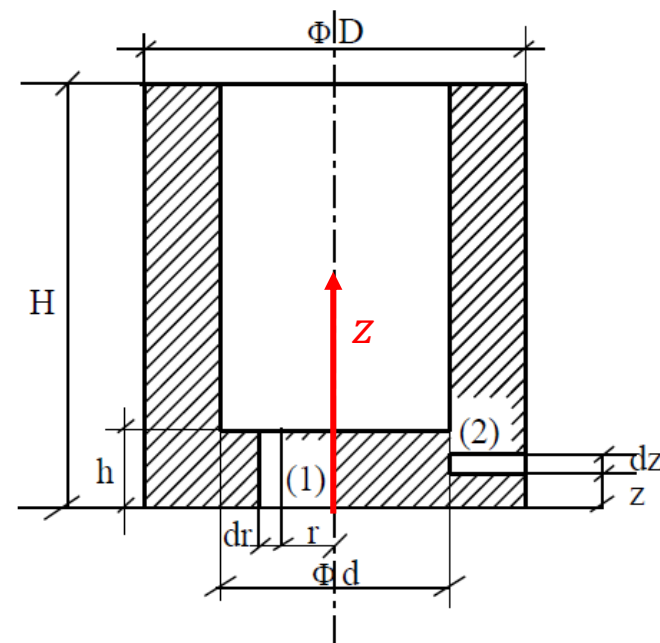
$$\mu_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$$

$\mu_1$  - Coulomb súrlódási együttható a darab és a szerszám fala között.

Tapadási súrlódás (!)

Egyszerűsítve a geometriai összefüggéseket figyelembe vételével:

$$d\sigma_{z2} = \frac{2\mu k_{f2}}{s} dz$$



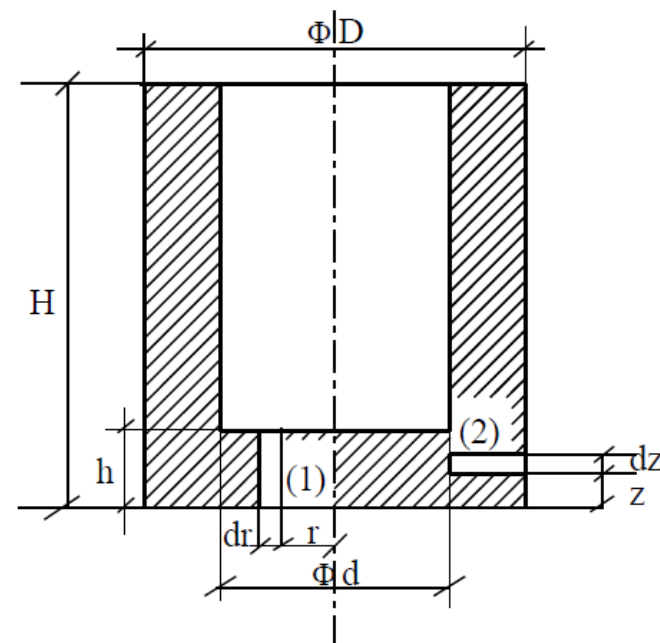
$$d\sigma_{z2} = \frac{2\mu k_{f2}}{s} dz \quad \xrightarrow{\text{Integrálva}} \quad \sigma_{z2} = \frac{2\mu k_{f2}}{s} z + C$$

Peremfeltétel:

$$z = h \quad \sigma_{z2} = 0$$

A hátrafolyatott falrész terheletlen

$$C = -\frac{2\mu k_{f2}}{s} h \quad \xrightarrow{\text{így:}} \quad \sigma_{z2} = -\frac{2\mu k_{f2}}{s} (h - z)$$



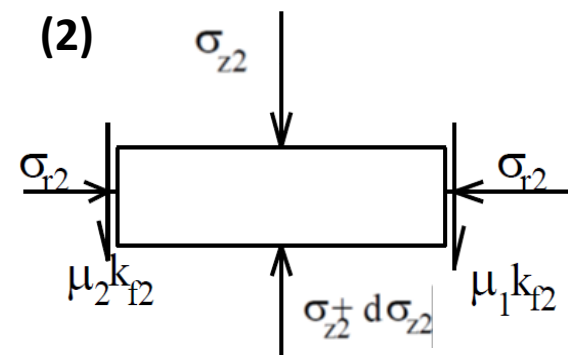
Ennek a  $D_k \pi h$  hengerfelületre számított  $\sigma_{z2m}$  átlaga az alábbi szerint számítható:

$$\sigma_{z2m} D_k \pi h = \int_0^h -\frac{2\mu k_{f2}}{s} (h - z) D_k \pi dz$$

A  $k_{f2}$  értéke állandó.

$$\sigma_{z2m} = -\mu k_{f2} \frac{h}{s}$$

Ezt a feszültségkomponenst használjuk a folyási feltétel vizsgálatához.



A folyási feltétel vizsgálata:

$$\sigma_{z2m} = -\mu k_{f2} \frac{h}{s}$$

A radiális és a tangenciális feszültségkomponensek megegyeznek és a Mises féle folyási feltételbe visszahelyettesítve: (előző előadás anyagában részletezve!)

$$\sigma_{z2m} - \sigma_{r2m} = k_{f2}$$

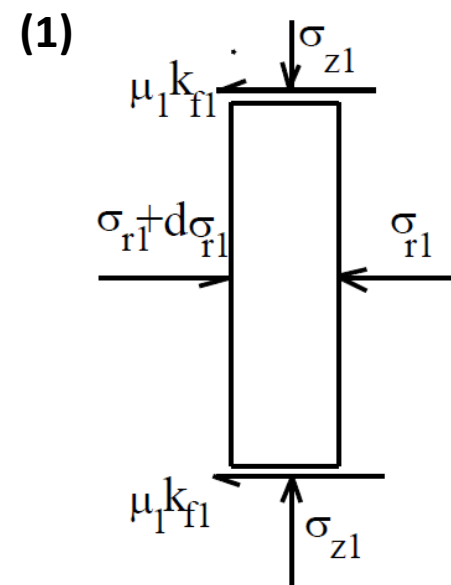
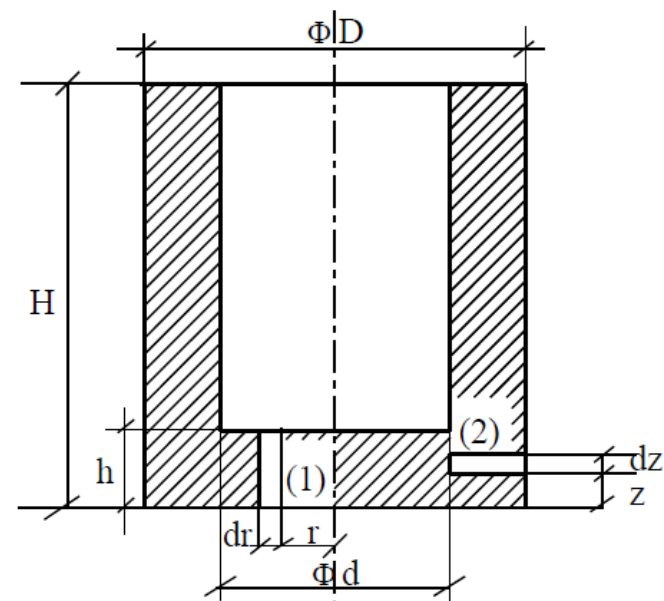
$$\sigma_{r2m} = \sigma_{z2m} - k_{f2} = -k_{f2} \left( \mu \frac{h}{s} + 1 \right) \quad (1)$$

Az (1) jelű térfogatelem statikai egyensúlyi egyenlete az  $r$  irányban.

$$(\sigma_{r1} - (\sigma_{r1} + d\sigma_{r1}))2\pi r h + 2\mu_1 k_{f1} 2\pi r dr = 0$$

Ebből a differenciál egyenlet:

$$-d\sigma_{r1} = -2\mu_1 k_{f1} \frac{dr}{h} \xrightarrow{\text{Integrálva}} \sigma_{r1} = 2\mu_1 k_{f1} \frac{r}{h} + C$$



Peremfeltétel: hogy az  $r = d/2$  helyen a radiális feszültségnek azonos nagyságúnak kell lennie a szomszédos zóna radiális feszültségével:

$$+2\mu_1 k_{f1} \frac{d}{2h} + C = \sigma_{r2m} \longrightarrow C = \sigma_{r2m} - 2\mu_1 k_{f1} \frac{d}{2h}$$

Így:

$$\sigma_{r1} = \sigma_{r2m} - \frac{2\mu_1 k_{f1}}{h} \left( \frac{d}{2} - r \right)$$

(1)  $\longrightarrow \sigma_{r1} = -k_{f2} \left( \mu \frac{h}{s} + 1 \right) - \frac{2\mu_1 k_{f1}}{h} \left( \frac{d}{2} - r \right)$

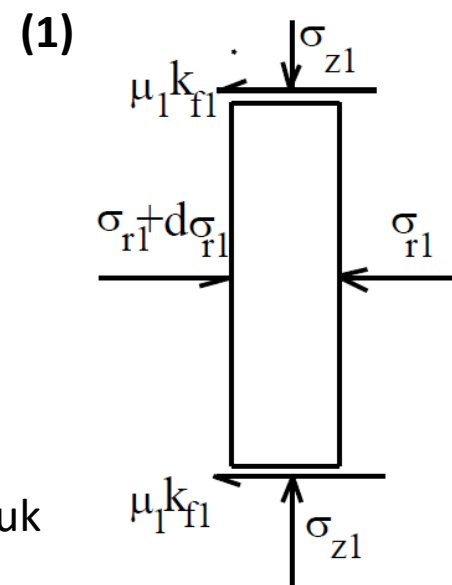
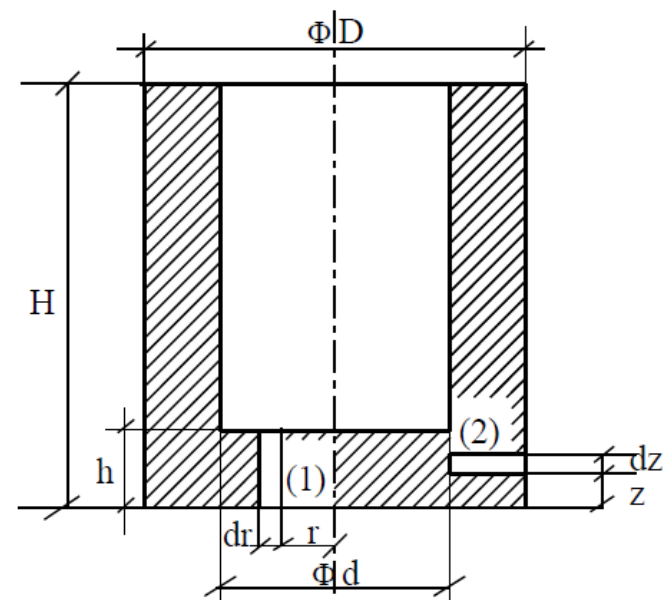
Ennek a folyató bélyeg felületére számított  $\sigma_{r1m}$  átlaga az alábbi szerint számítható:

$$\sigma_{r1m} \frac{d^2 \pi}{4} = \sigma_{r2m} \frac{d^2 \pi}{4} - \frac{2\mu_1 k_{f1}}{h} \int_0^{d/2} \left( \frac{d}{2} - r \right) 2r\pi dr$$

*A  $k_{f1}$  értéke állandó.*

$$\sigma_{r1m} = \sigma_{r2m} - \frac{\mu_1 k_{f1} d}{3 h}$$

Ezt a feszültségkomponenst használjuk a folyási feltétel vizsgálatához.

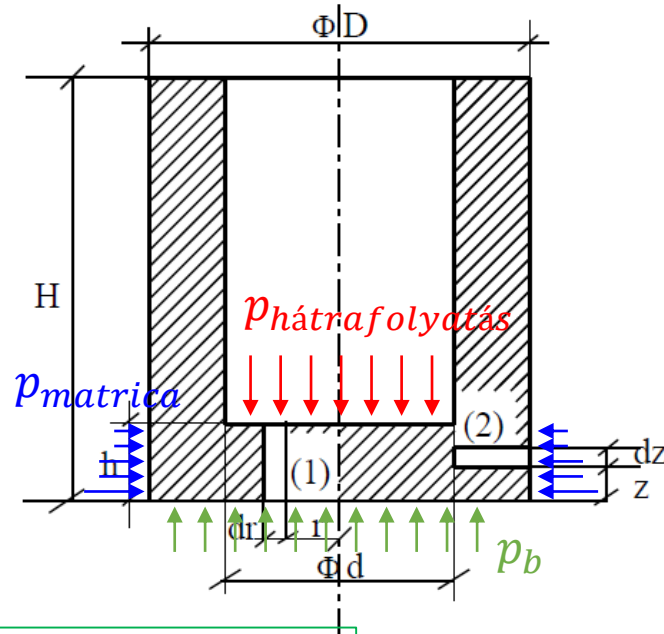


A folyási feltétel vizsgálata:

$$\sigma_{r1m} = \sigma_{r2m} - \frac{\mu_1 k_{f1} d}{3 h}$$

$$\sigma_{r1m} - \sigma_{z1m} = k_{f1}$$

Ebből a folyató bélyeg alatti tengelyirányú átlagfeszültség számítható, ami a hátrafolyatási folyamat alakítási ellenállása



$$\sigma_{z1m} = \sigma_{r1m} - k_{f1} = -p_{hátrafolyatás} = -k_{f1} \left( 1 + \frac{\mu_1 d}{3 h} \right) - k_{f2} \left( 1 + \mu \frac{h}{s} \right)$$

Az erőszükséglet:

$$F = p_{hátrafolyatás} \frac{d^2 \pi}{4} = p_b \frac{D^2 \pi}{4}$$

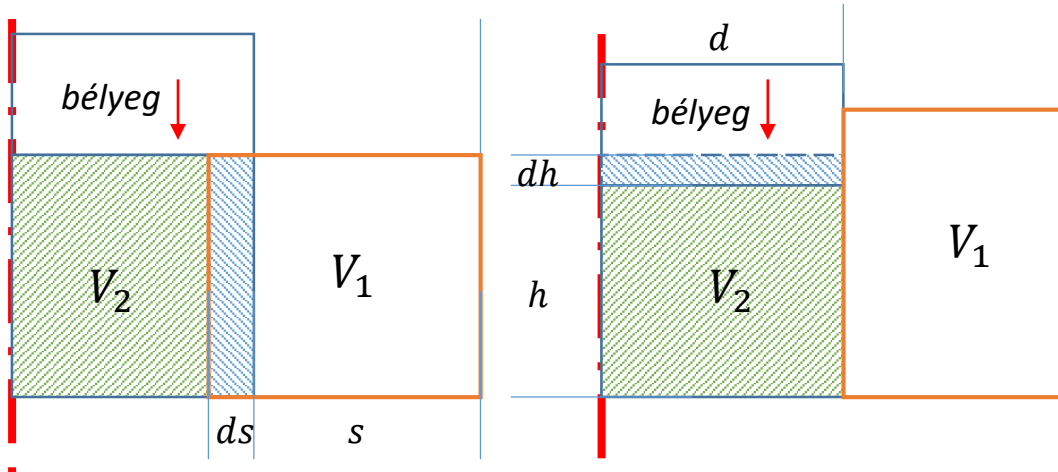
↑  
fenéknyomás

$$k_{f1} = k_f(\varphi_1) \quad \varphi_1 = \ln \frac{h_0}{h}$$

$$k_{f2} = k_f(\varphi_2) \quad \varphi_2 = \varphi_1 + \varphi_1 \frac{d}{8s}$$



A  $dh$  bélyegmozdulással a  $V_1$  térfogatrész radiálisan zömül.  
 A  $V_1$  térfogatrész belső sugara  $ds$ -sel nő. A satírozott térfogatok megegyeznek.



A  $V_1$  anyagrész átlagos alakváltozás növekménye  $h_0$ -tól  $h$ -ig tartó alakítás során:

$$\varphi = \frac{1}{2} \int_{h_0}^h \frac{ds}{s} = \frac{1}{2} \int_{h_0}^h \frac{d}{4hs} dh = \frac{1}{2} \frac{d}{4s} \int_{h_0}^h \frac{dh}{h} = \frac{d}{8s} \ln \frac{h_0}{h}$$

$$V_2 = V_2$$

$$(h + dh) \frac{(d - 2ds)^2 \pi}{4} = h \frac{d^2 \pi}{4}$$

$$(h + dh)(d - 2ds)^2 = hd^2$$

$$(h + dh)(d^2 - 4d ds + 4ds^2) = hd^2$$

Másodrendűen kicsiny tagok elhanyagolása

$$hd^2 - 4hd ds + d^2 dh - 4d ds dh = hd^2$$

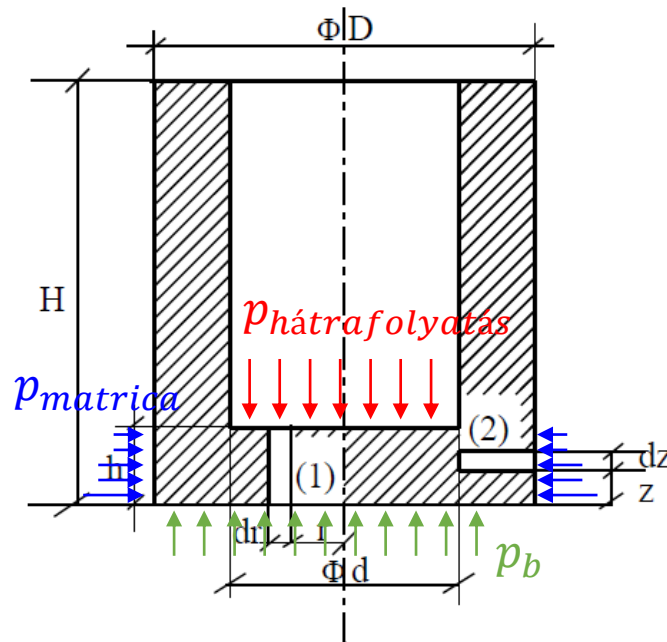
$$h - 4 \frac{1}{d} hds + dh = h$$

$$4 \frac{1}{d} hds - dh = 0$$

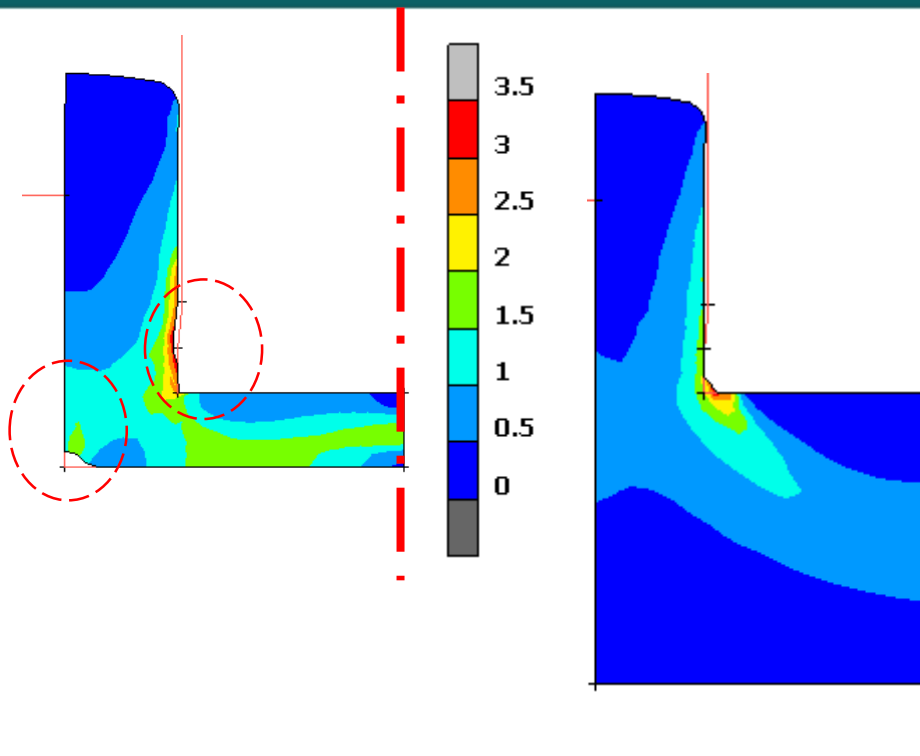
$$ds = \frac{d}{4h} dh$$

A matricára ható nyomás:

$$p_{matrica} = p_{hátrafolyatás} \frac{d^2}{D^2}$$

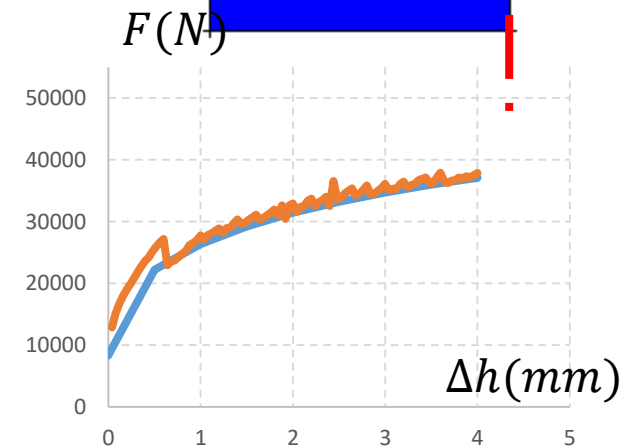
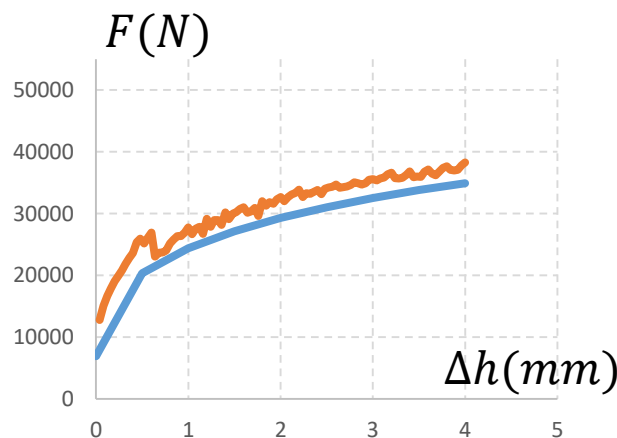
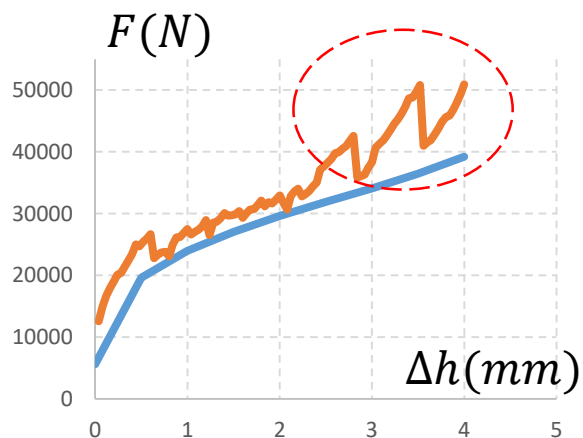


$D = 15 \text{ mm}$   
 $d = 10 \text{ mm}$   
 $H_0 = 5,5; 10,5; 15,5 \text{ mm}$   
 $h = 1,5; 6,5; 11,5 \text{ mm}$   
 $k_f = 25 + 152\varphi^{0,4}$   
 $\mu = 0,1$



*analitikus*

*VE számítás*



Lemez: a szélessége sokkal nagyobb, mint a vastagsága és a hossza.

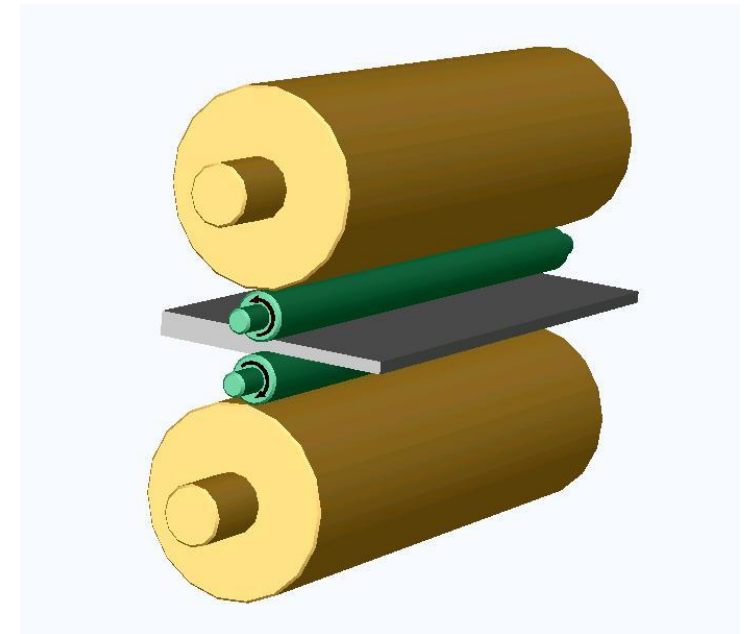
Két ellentétes irányban forgó henger között a lemez vastagsága csökken.

Hideghengerlés:

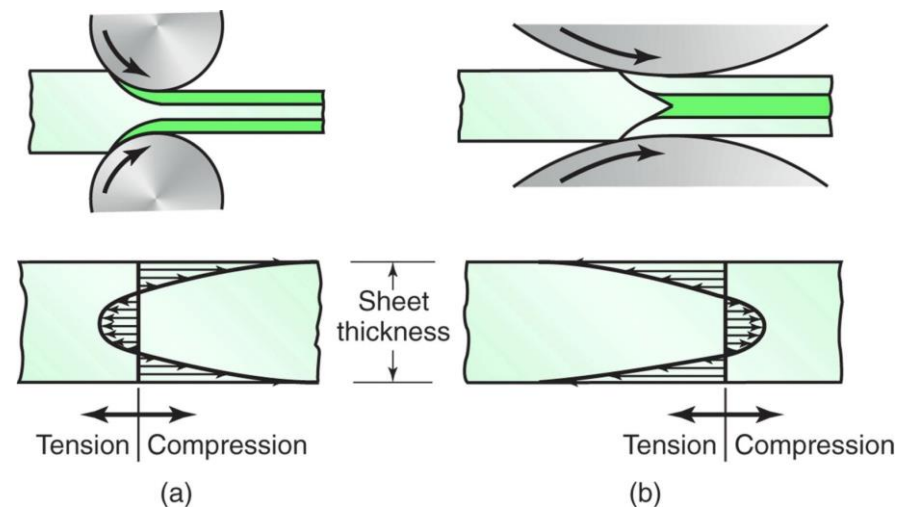
vékony lemezek gyártása  
jó felületi minőség és méretpontosság  
keményedés: negyedkemény, félkemény stb.  
állapotú lemezek gyártása

Meleghengerlés:

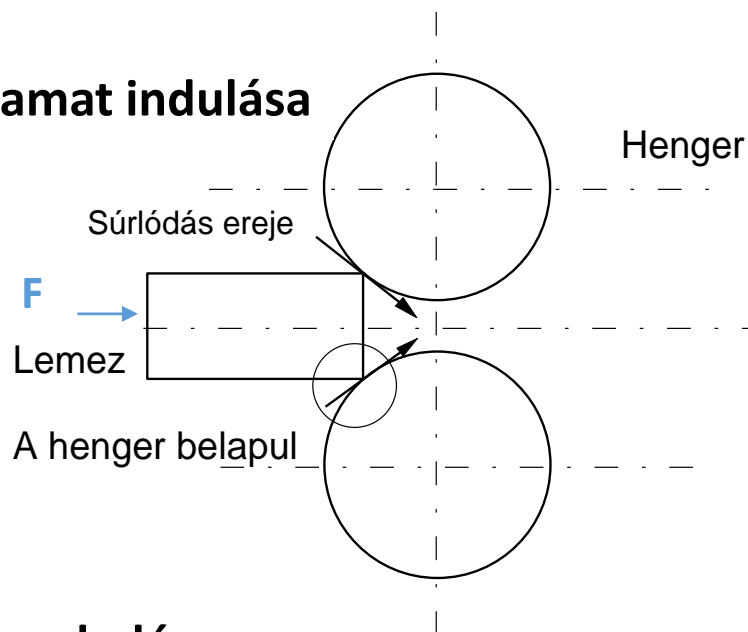
Lágyulási folyamatok (megújulás, újrakristályosodás) (meleg  $k_f$  görbe)  
Fázisátalakulás, kiválások, termomechanikus alakítás



*Négy hengeres, kvartó elrendezés*



## A folyamat indulása

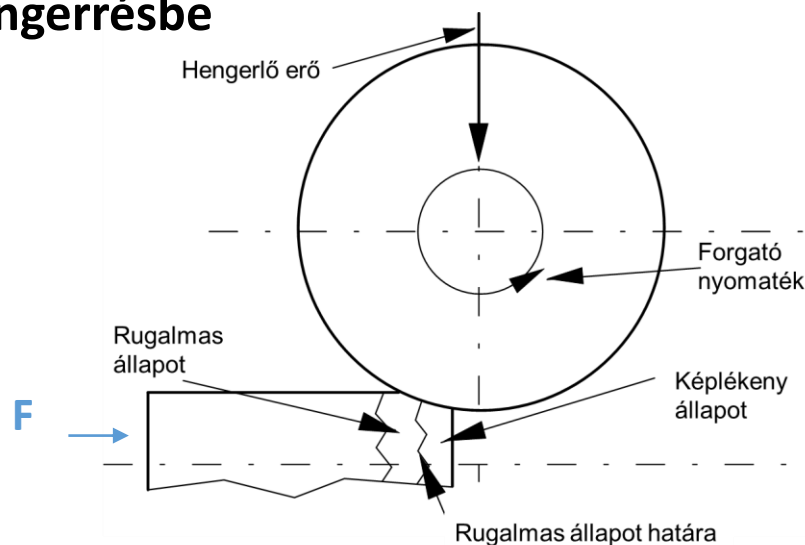


A kialakuló érintkező felületeken fellépő súrlódás húzza be a hengerrésbe a darabot.

A súrlódásnak a szerepe elsődleges a folyamat szempontjából.

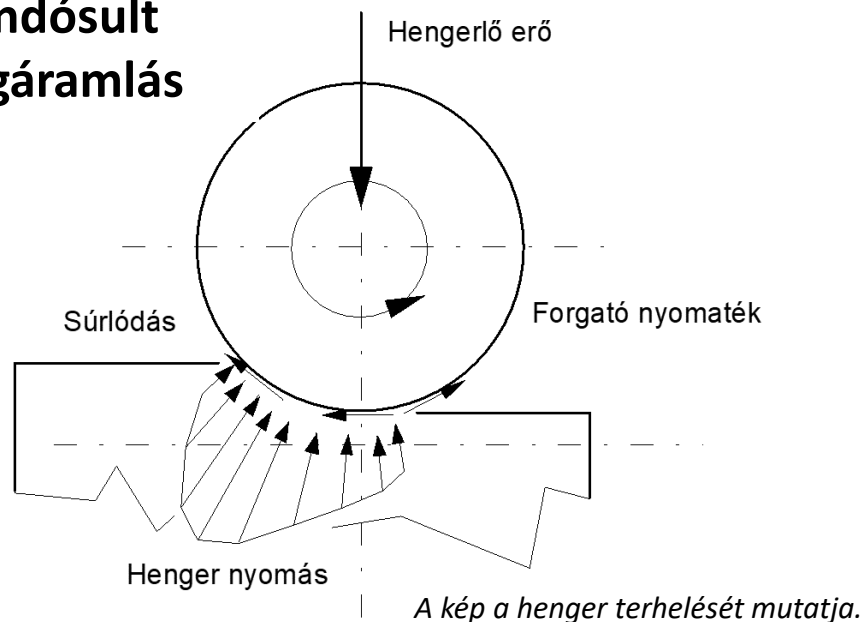
Nulla súrlódási erő esetén nem lehet hengeregni! Nem csak a folyamat elindítása hanem a teljes technika megvalósíthatatlan lenne.

## Az anyag belép a hengerrésbe



A nagyobb fogyások és kis súrlódás esetében a folyamat megindításakor egy bizonyos pontig külső erőre van szükség.

## Állandósult anyagáramlás



A folyamat paramétereit, amiket ismernünk kell hogy tervezni vagy számolni tudjunk:

- Hengerátmérő
- Szűrés (lemezvastagság csökkenés)
- Hengerrés mérete
- Hengerlési sebesség
- Hengerállvány szilárdsága;
- A lemez mérete, folyásgörbéje, hőmérséklete
- Súrlódási tényező (?)

Az alábbi mennyiségeket tudjuk kiszámítani különböző modellek segítségével:

- Hengerlő erő
- Forgató nyomaték
- A szükséges teljesítmény
- A hőmérséklet
- Hengerlés után a szemcseméret, és szilárdság
- Anizotrópia

## Schey-féle empirikus modell

A fajlagos hengerlési erő:  $P_r = 1.15 Q_p k_{fm} L$

Átlagos alakítási szilárdság:

$$k_{fm} = \frac{1}{\varphi_{\max}} \int_0^{\varphi_{\max}} k_f(\varphi, \dot{\varphi}_{\text{átl.}}) d\varphi$$

Átlagos alakváltozási sebesség:

$$\dot{\varphi}_{\text{átl.}} = \frac{v}{L} \ln \frac{h_{be}}{h_{ki}}$$

A belapult hengerszakasz sugara (Hitchcock) :

$$R' = R \left[ 1 + \frac{16(1 - \nu^2)}{\pi E (h_{be} - h_{ki})} P_r \right]$$

Az érintkező hossz:  $L = \sqrt{R' \Delta h}$

$P_r$  = A hengerlő erő (N/m, N/mm);

$M$  = Forgató nyomaték (Nm/m, Nm/mm);

$Q_p$  = szorzó,  $\mu$  és  $L/h$  függvénye;

$L$  = az érintkező ív hossza (m, mm);

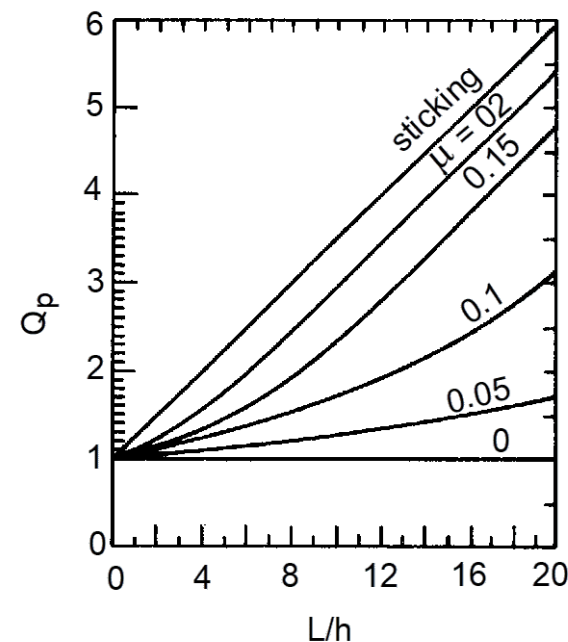
$R'$  = a belapult henger sugara (m, mm);

$v$  = átlagos sebesség (m/s, mm/s);

$h_{be}, h_{ki}$  = A lemez vastagsága, (m, mm);

$\varphi, \dot{\varphi}$  = alakváltozás, alakváltozási sebesség (1/s);

$W$  = szélesség (m, mm)



A hengerlési nyomaték:

$$M = \frac{P_r L}{2}$$

Teljesítményszükséglet:

$$\text{Teljesítmény} = P_r W L \frac{v}{R'}$$

A darab hőmérséklet változása:

$$\Delta T = \frac{\text{Teljesítmény}}{\text{tömegáram} \times \text{fajhő}}$$

$P_r$  = hengerlő erő (N/m, N/mm);

$M$  = forgató nyomaték (Nm/m, Nm/mm);

$Q_p$  = szorzó,  $\mu$  és L/h függvénye;

$L$  = az érintkező ív hossza (m, mm);

$R'$  = a belapult henger sugara (m, mm);

$v$  = átlagos sebesség (m/s, mm/s);

$h_{be}, h_{ki}$  = A lemez vastagsága, (m, mm);

$\varphi, \dot{\varphi}$  = alakváltozás, alakváltozási sebesség (1/s);

$W$  = szélesség (m, mm)

A modell használata egyszerű, a hengerlő erő ismert súrlódási tényezővel megfelelő pontossággal számítható. Minimális számú paraméterre van szükség.

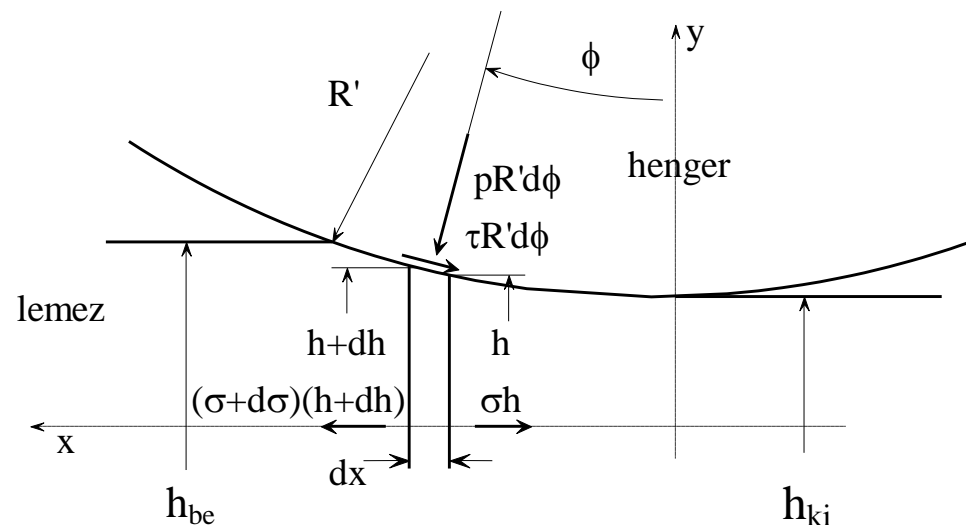
Azonban a súrlódási együttható ismerete szükséges és a forgató nyomaték kevésbé pontosan számítható a módszerrel.



## Átlagfeszültség módszer – Orován-féle számítás (Orowan)

Az erők egyensúlyban vannak a hengerlés irányában:

$$\frac{d(\sigma_x h)}{d\phi} + 2R'(p \sin \phi \pm \tau \cos \phi) = 0$$



Mises képlékenységi feltétel:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2 = 2k_f^2$$

$$\frac{\text{sík alakváltozási állapotra}}{\text{állapotra}} \rightarrow \sigma_x + p = \frac{2}{3}k_f$$

A lemez vastagsága:

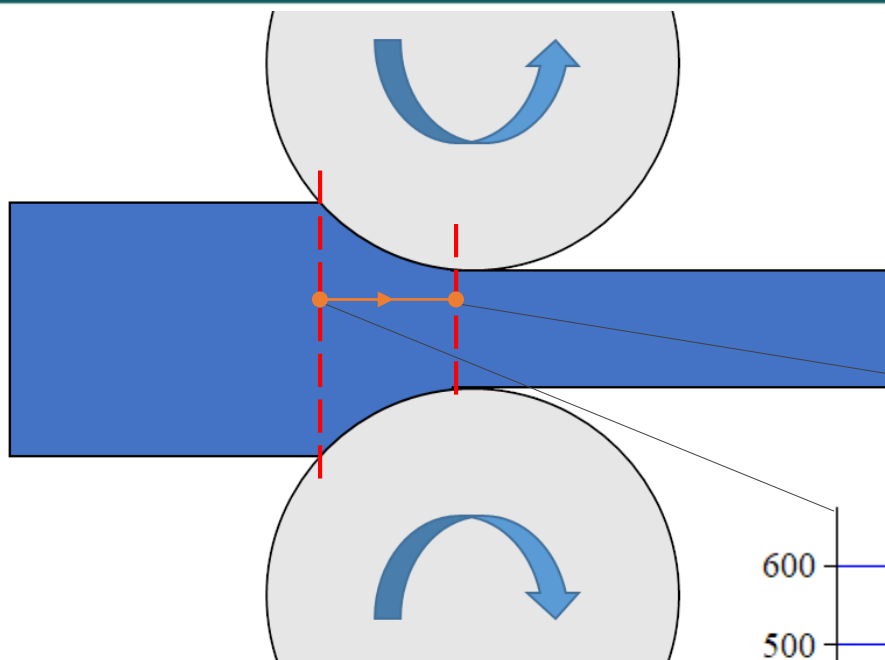
$$h = h_2 + 2R'(1 - \cos \phi)$$

A belapult henger sugara (Hitchcock)

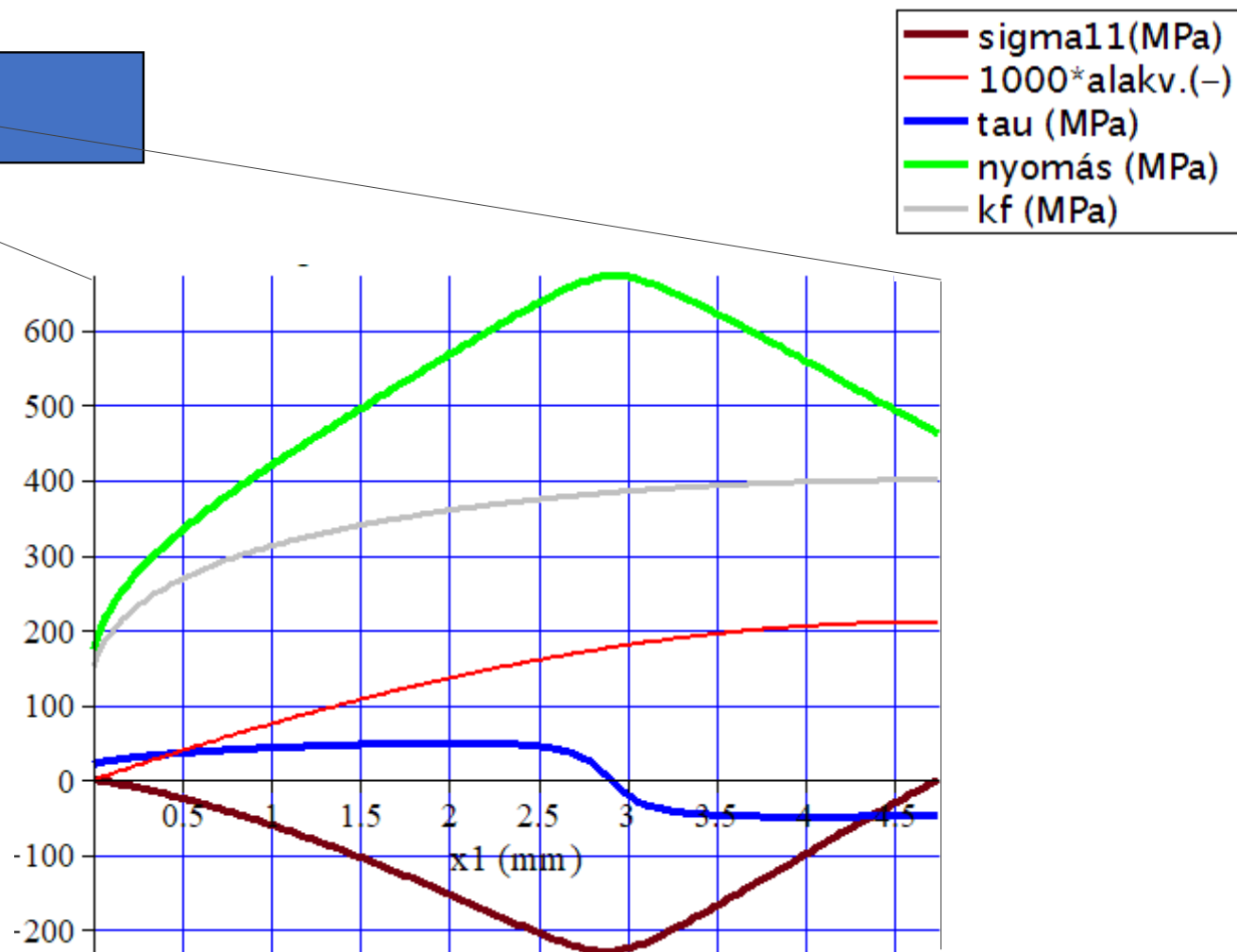
$$R' = R \left[ 1 + \frac{16(1 - \nu^2)}{\pi E \Delta h} P_r \right]$$

1. feltételezés: a henger átmérője nem változik
  2. feltételezés: a súrlódási tényező adott
- 
1. Az egyensúlyi egyenletet integráljuk. Kiszámoljuk a hengernyomást és az érintkező felületen lévő nyírófeszültséget.
  2. Ebből kiszámoljuk az érintkező felületen fellépő nyomatókót és erőt.
  3. A nyomatókból és erőből kiszámoljuk a henger deformációját.
  4. Újrászámoljuk a 1., 2. és 3. lépést a deformált hengersugárral.
  5. Ezeket a számításokat addig ismételjük amíg az előző és az új hengerlő erő különbsége elfogadható nem lesz (~5-10%) .

## Hengerlés Levanov súrlódási modellel



$t_{ki} = 0,75 \text{ mm}$   
 $t_{be} = 0,9 \text{ mm}$   
 $v_{hengerlés} = 1 \text{ mm/sec}$   
 $C = v_{hengerlés}/200$   
 $D = 300 \text{ mm}$   
 $m_L = 0,3$



- Ziaja Gy. Alakítástechnika jegyzet