Csapágyak

1. Siklócsapágyak (sikló ágyazások)

Borbás Lajos

Prof. Emeritus

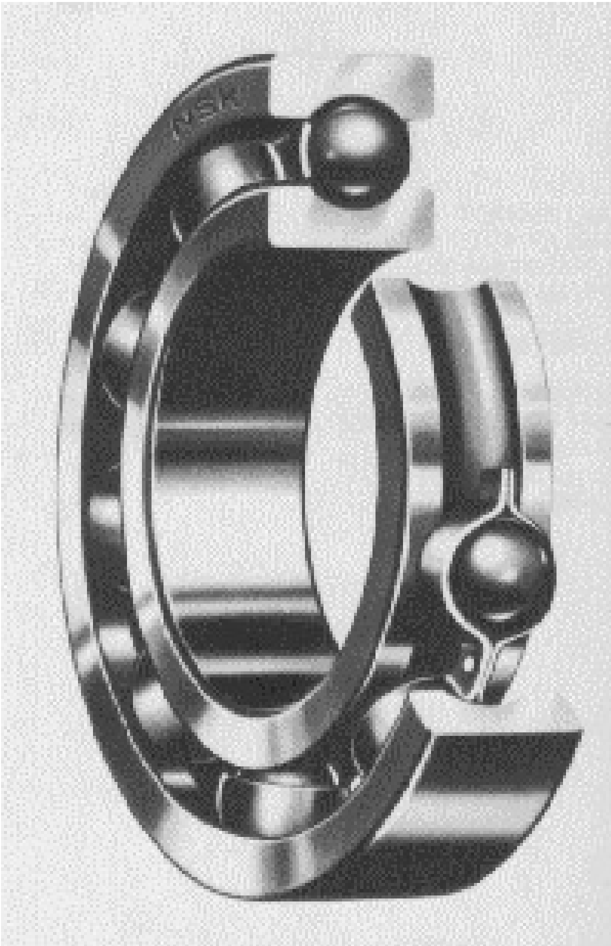
Tartalomjegyzék

Meghatározás

- A csapágyak olyan gépelemek, melyeket egymáshoz képest elforduló alkatrészek közé építünk be, hogy:
  - A forgás minél kisebb ellenállásba ütközzön.

- Járulékos feladatok:
  - Az alkatrészek relatív helyzetének biztosítása (a forgást megengedve).
  - Terhek közvetítése.

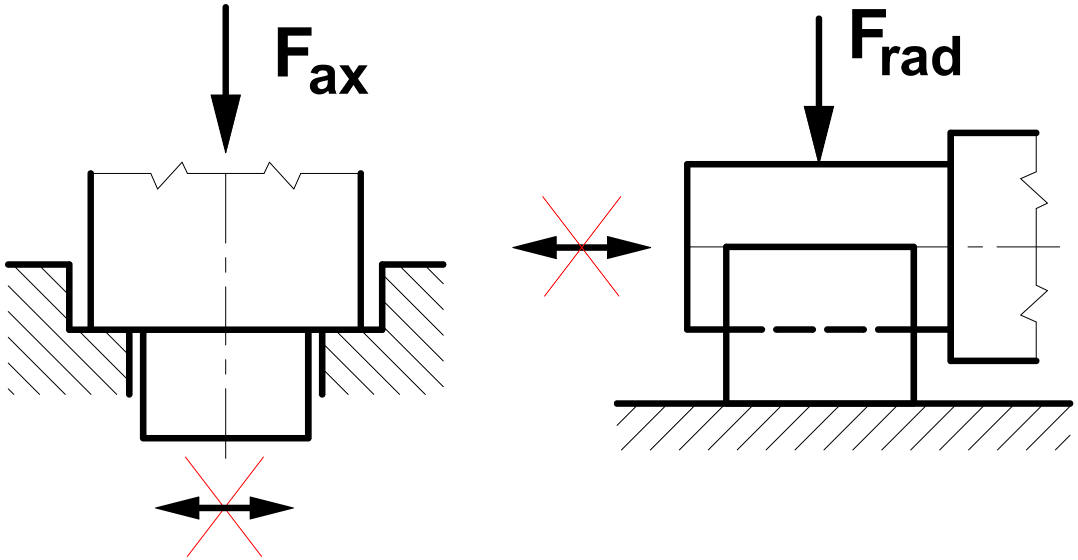
Csapágyak csoportosítása a súrlódás csökkentésének módja szerint



- Gördülőcsapágy
- Siklócsapágy

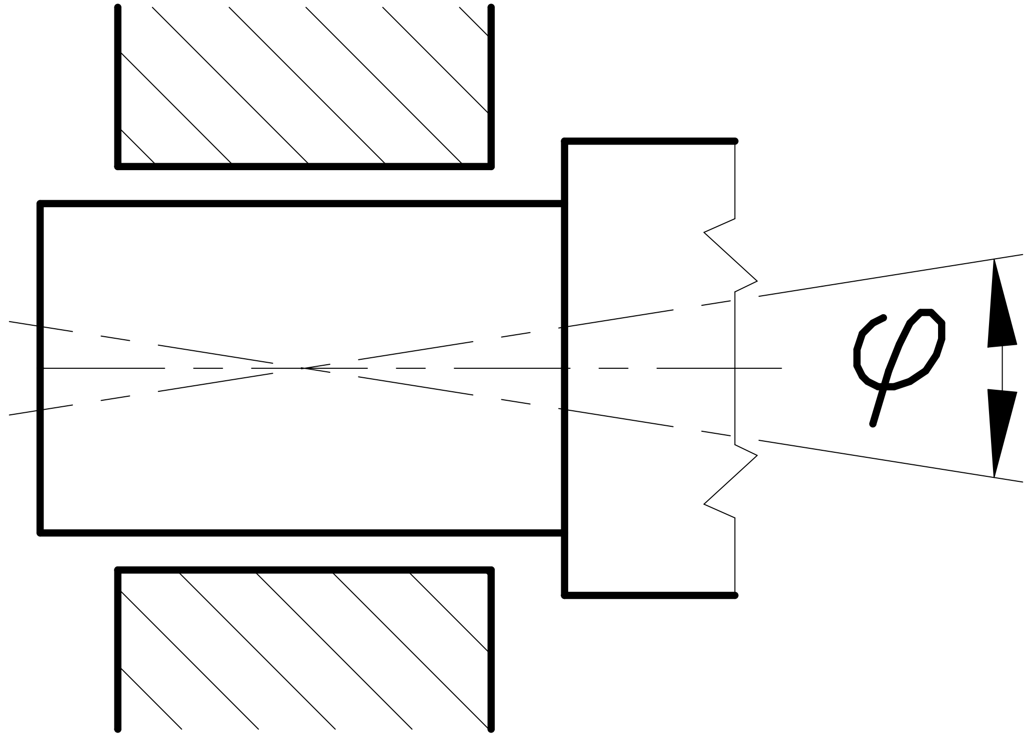
Csoportosítás a terhelés iránya szerint

- Csak radiálisan terhelhető csapágyak (pl. hengergörgős csapágy).
- Csak axiálisan terhelhető csapágyak (axiális golyóscsapágy).
- Radiálisan és axiálisan is terhelhető csapágyak (pl. mélyhornyú golyóscsapágy).

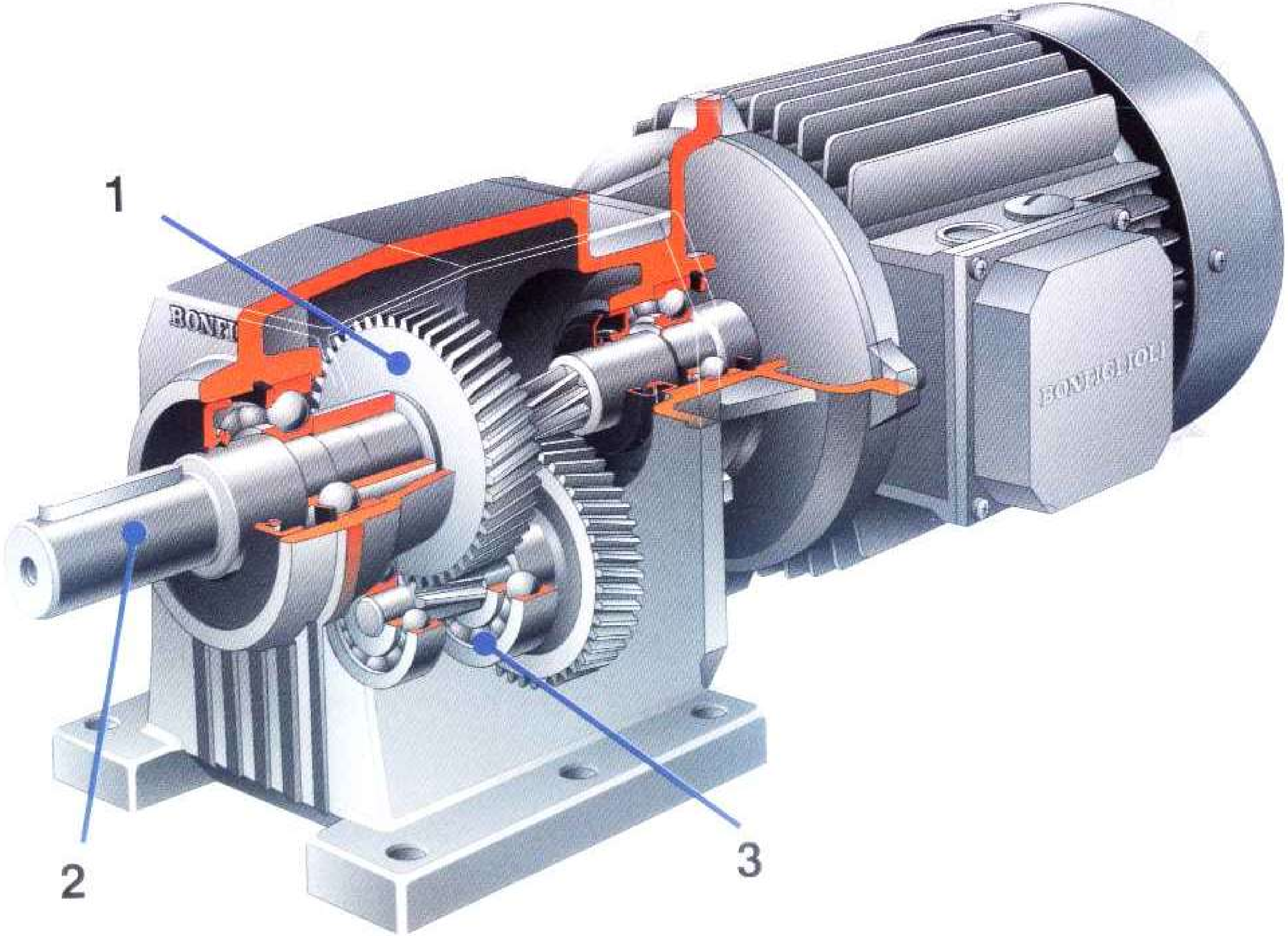


Csoportosítás a szögelfordulás lehetősége szerint

- Merev: φ kicsi
- Önbeálló (v. beálló): φ nagy



Tengelyek csapágyazása motoros hajtóműben



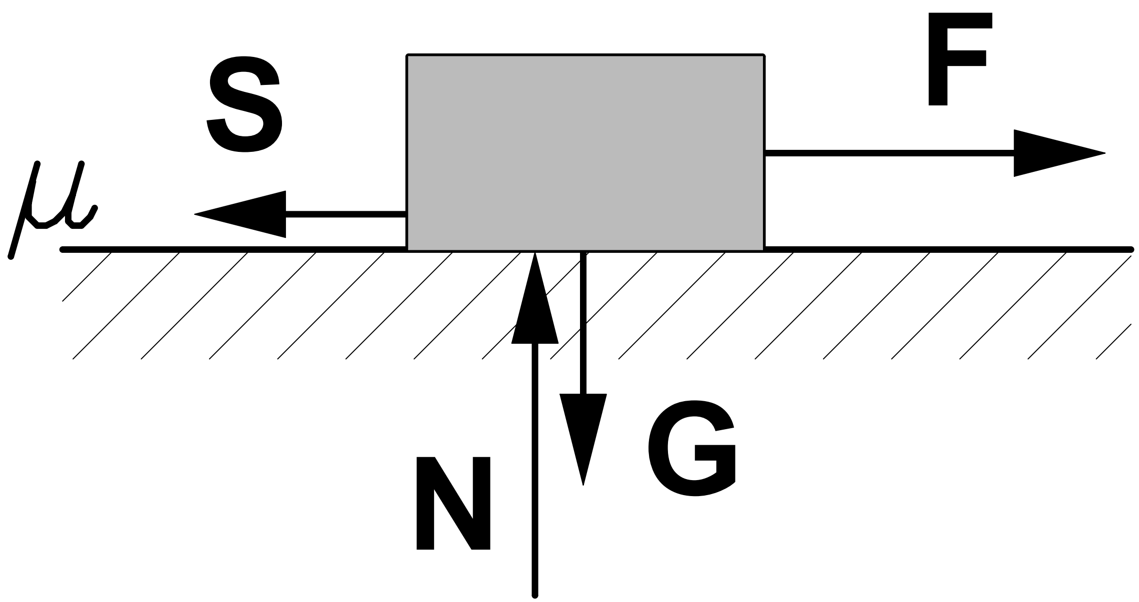
Siklócsapágyak

- A súrlódást úgy csökkentjük, hogy a tengely és a gép váza közé perselyt építünk be, amely:
  - speciális anyagú,
  - finom felületi megmunkálású,
  - általában kent.

- Az üzemi állapot súrlódási jellege szerint a siklócsapágyak lehetnek:
  - Hidrodinamikus (folyadéksúrlódású)
  - Vegyes súrlódású
  - Szárazon futó

A súrlódás típusai

- Száraz súrlódás (nincs kenés)
  - A súrlódási erő nem függ a felületi nyomástól és a csúszás sebességétől.

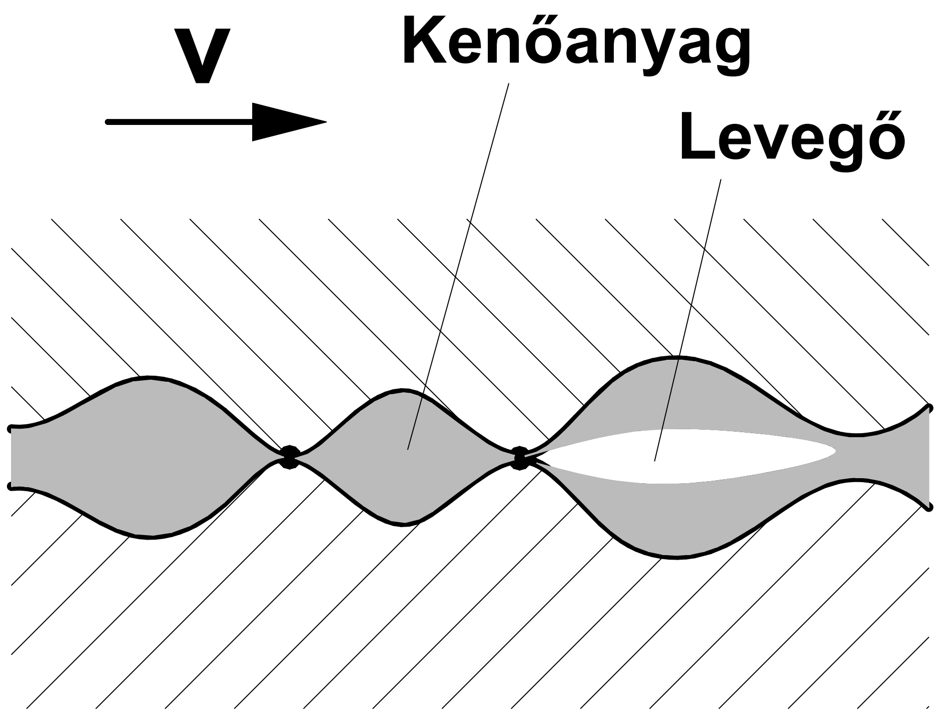


$$S = \mu \cdot N$$

$$\mu \geq 0{,}14$$

(acél + acél)

- Vegyes súrlódás
  - Van kenőanyag, de viszonylag kicsi a sebesség. Az érdességcsúcsok időnként összeérnek.
  - A súrlódási erő függ a felületi nyomástól és a csúszás sebességétől.

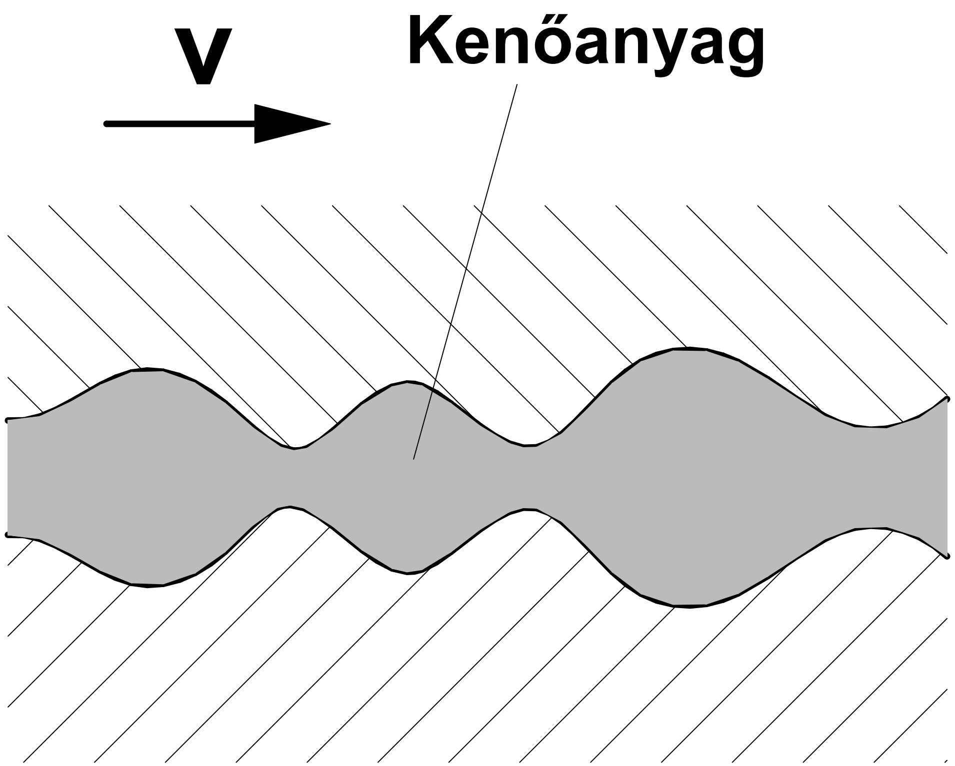


Méretezés :

$$p \cdot v \leq (p \cdot v)_{meg}$$

$$\mu = 0{,}14 \ldots 0{,}01$$

- Folyadéksúrlódás
  - A felületeket kenőanyag választja el.
  - A súrlódási erő függ a felületi nyomástól és a csúszás sebességétől.

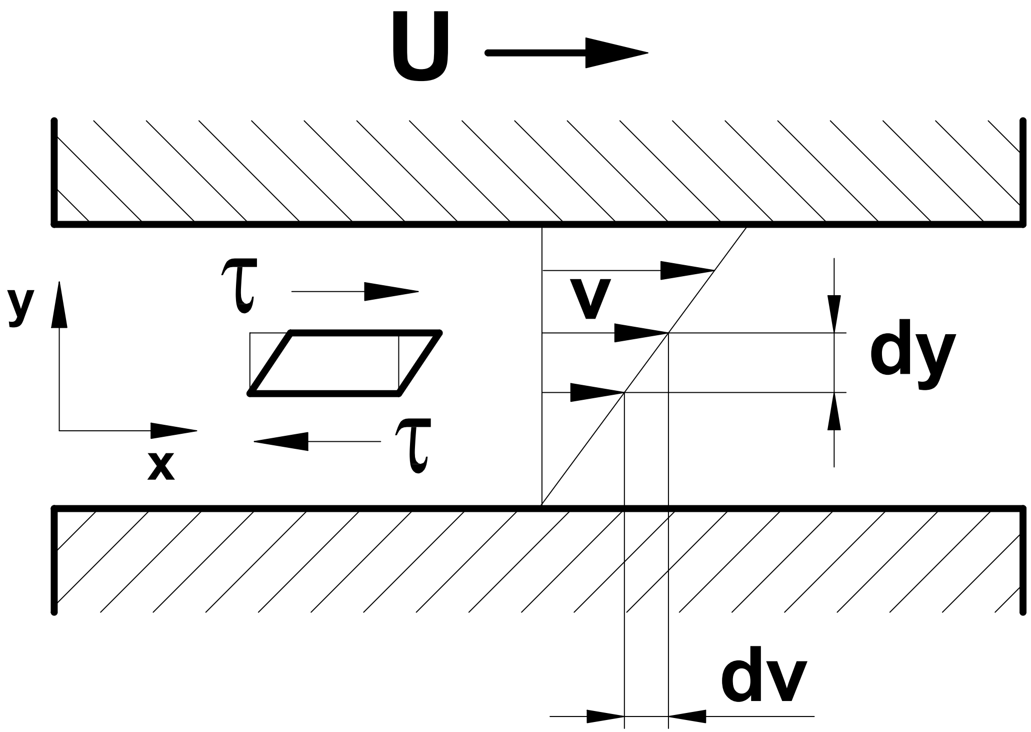


$$\mu = 0{,}01 \ldots 0{,}001$$

Newtoni folyadékok

- A folyadékoknak van belső súrlódásuk.

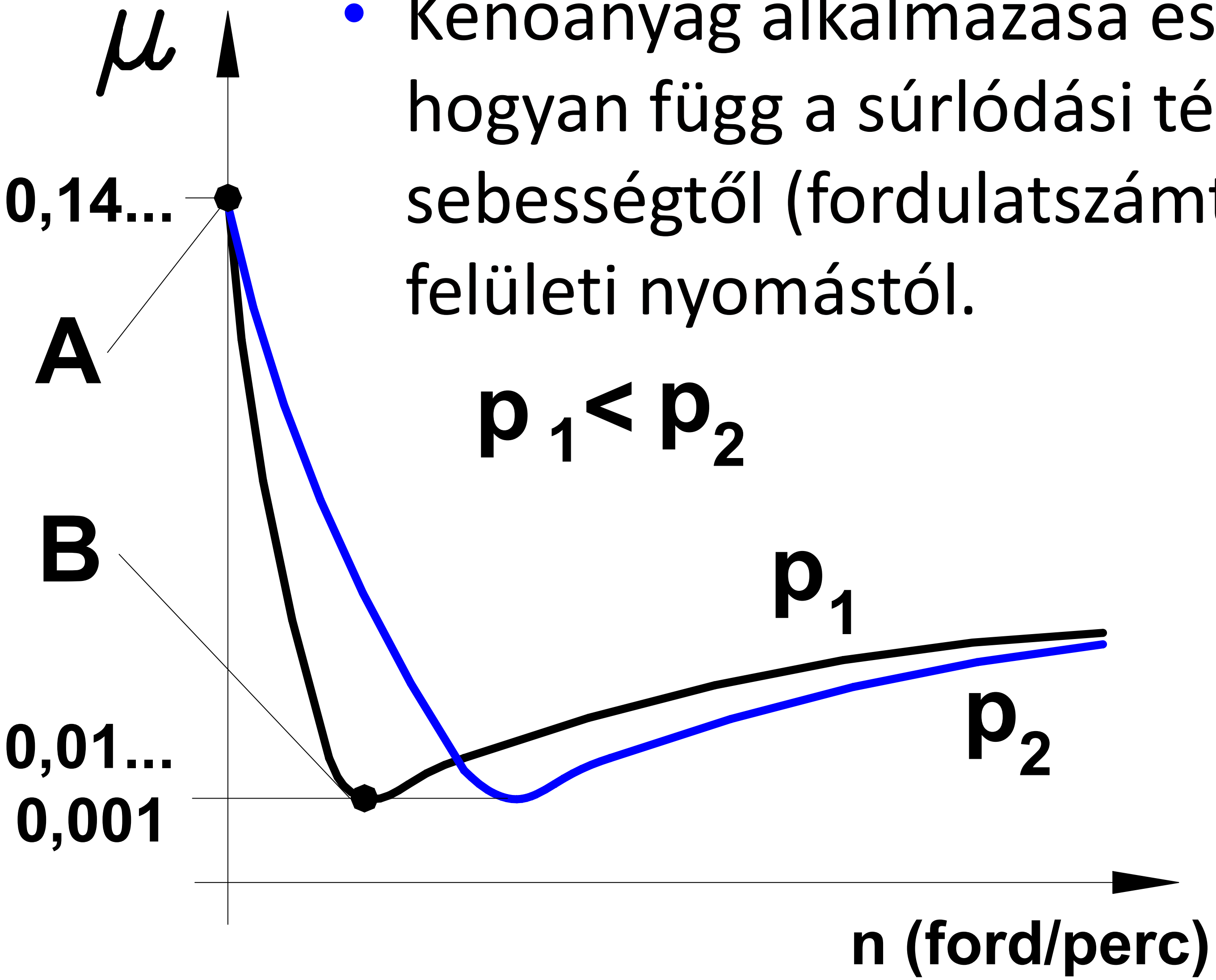
$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy}$$



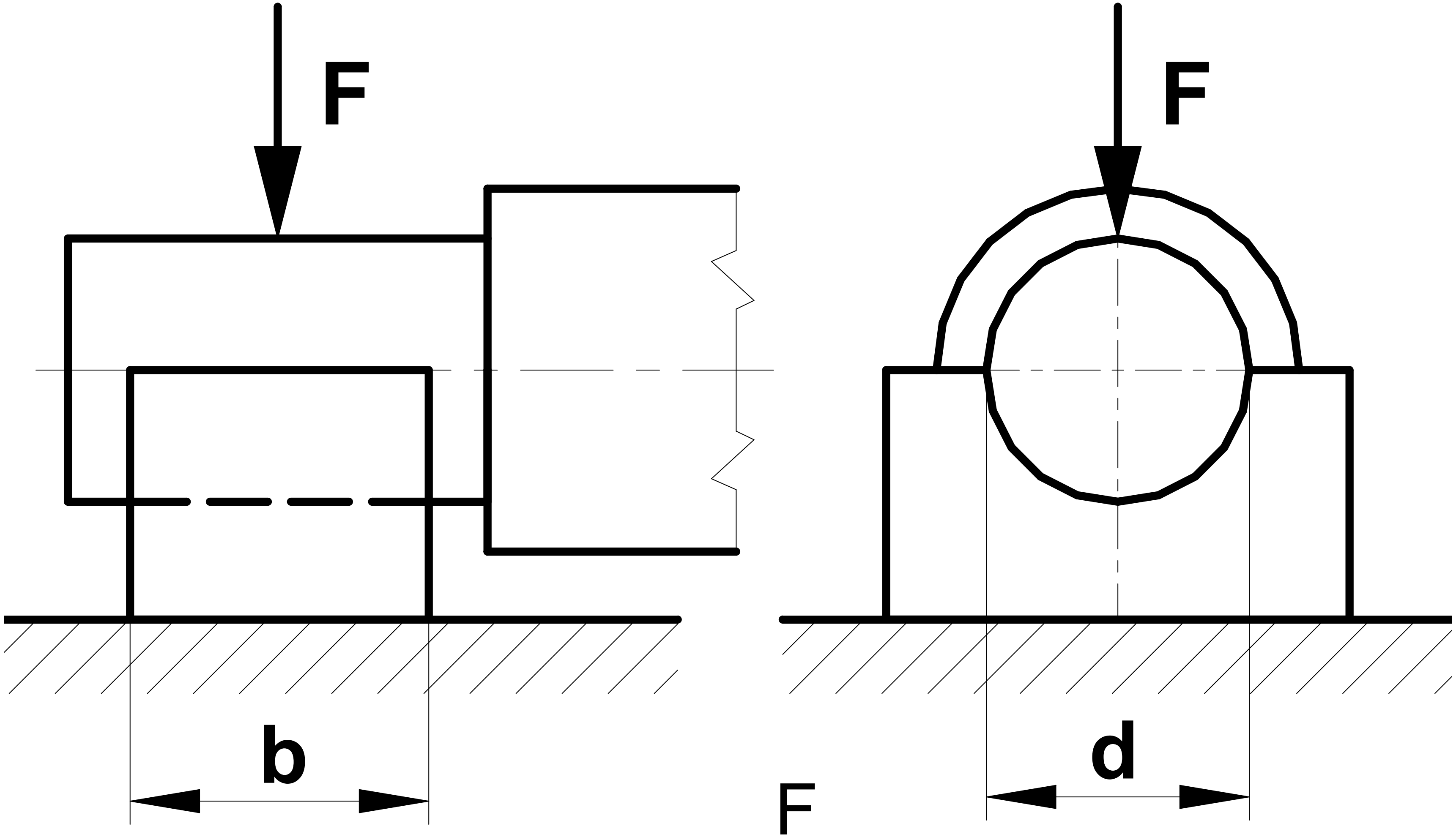
η: dinamikai viszkozitás $[Ns/m^2]$.

Stribeck diagram

- Kenőanyag alkalmazása esetén hogyan függ a súrlódási tényező a sebességtől (fordulatszámtól) és a felületi nyomástól.

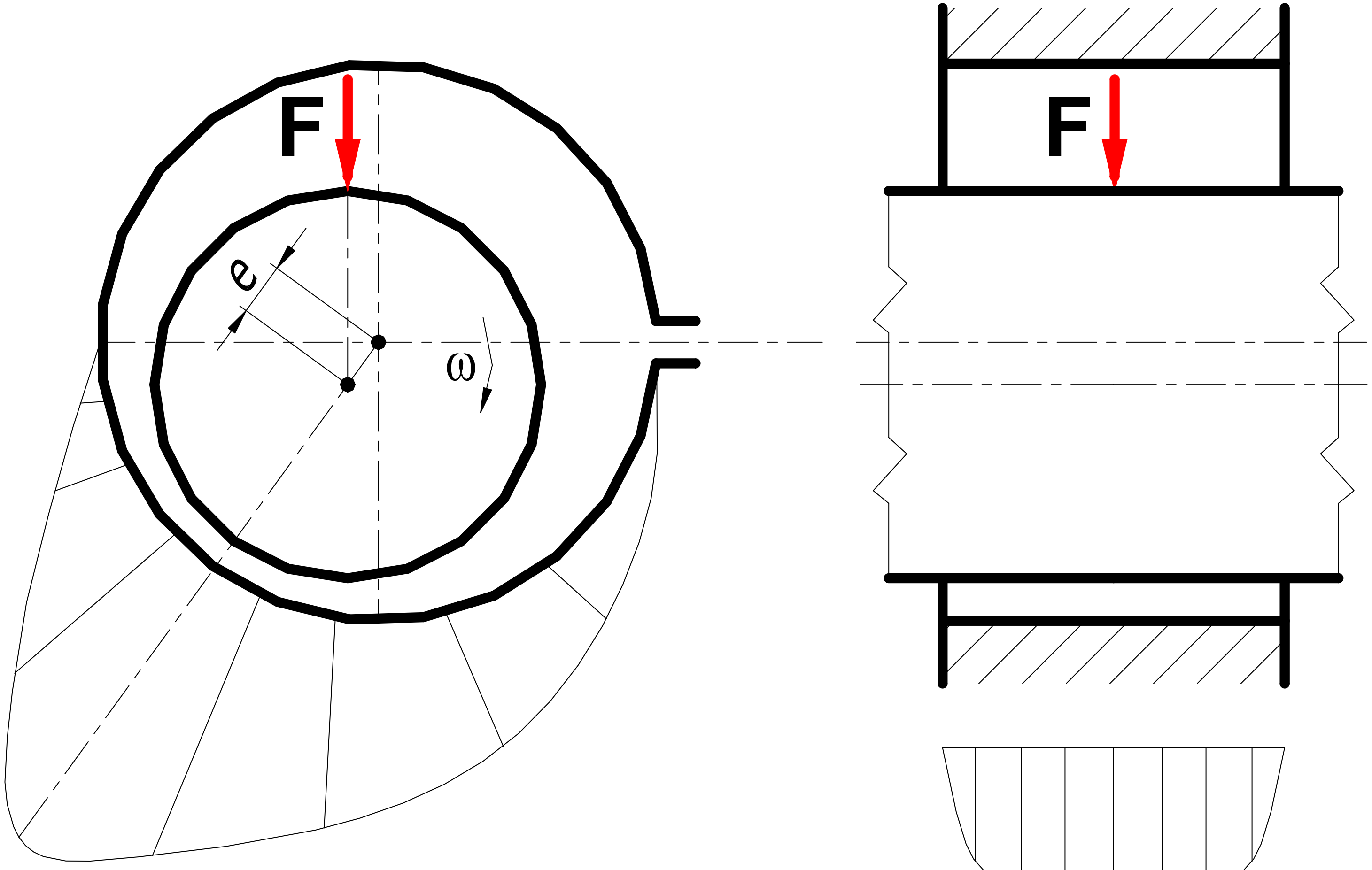


Átlagos felületi nyomás

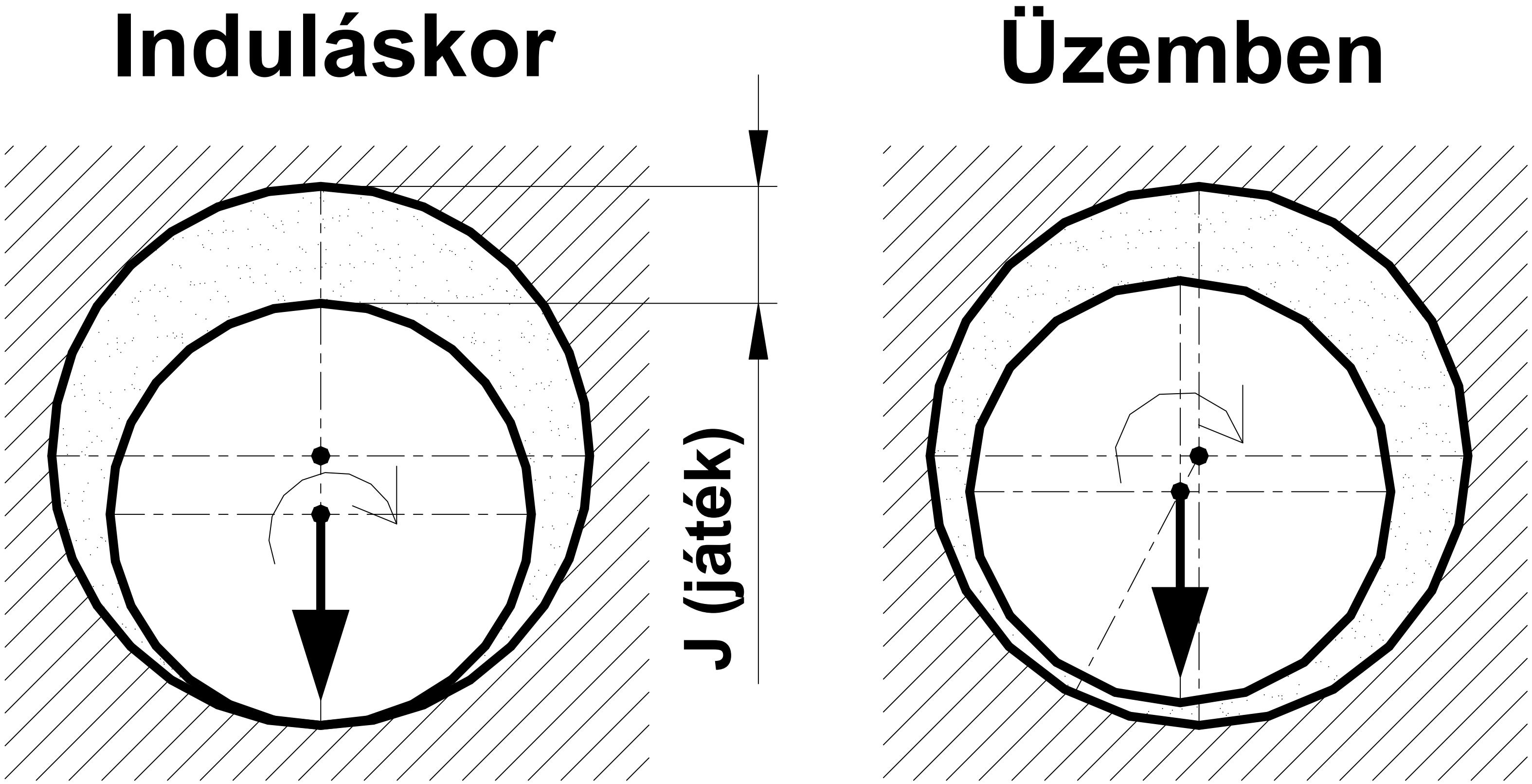


$$p = \frac{F}{d \cdot b}$$

Valóságos nyomáseloszlás



- A tengely helyzete a perselyhez képest folyadéksúrlódás esetén
  - A tengely szivattyúként működik.
  - A homlokfelületen a kenőolaj lassan elfolyik, ezért



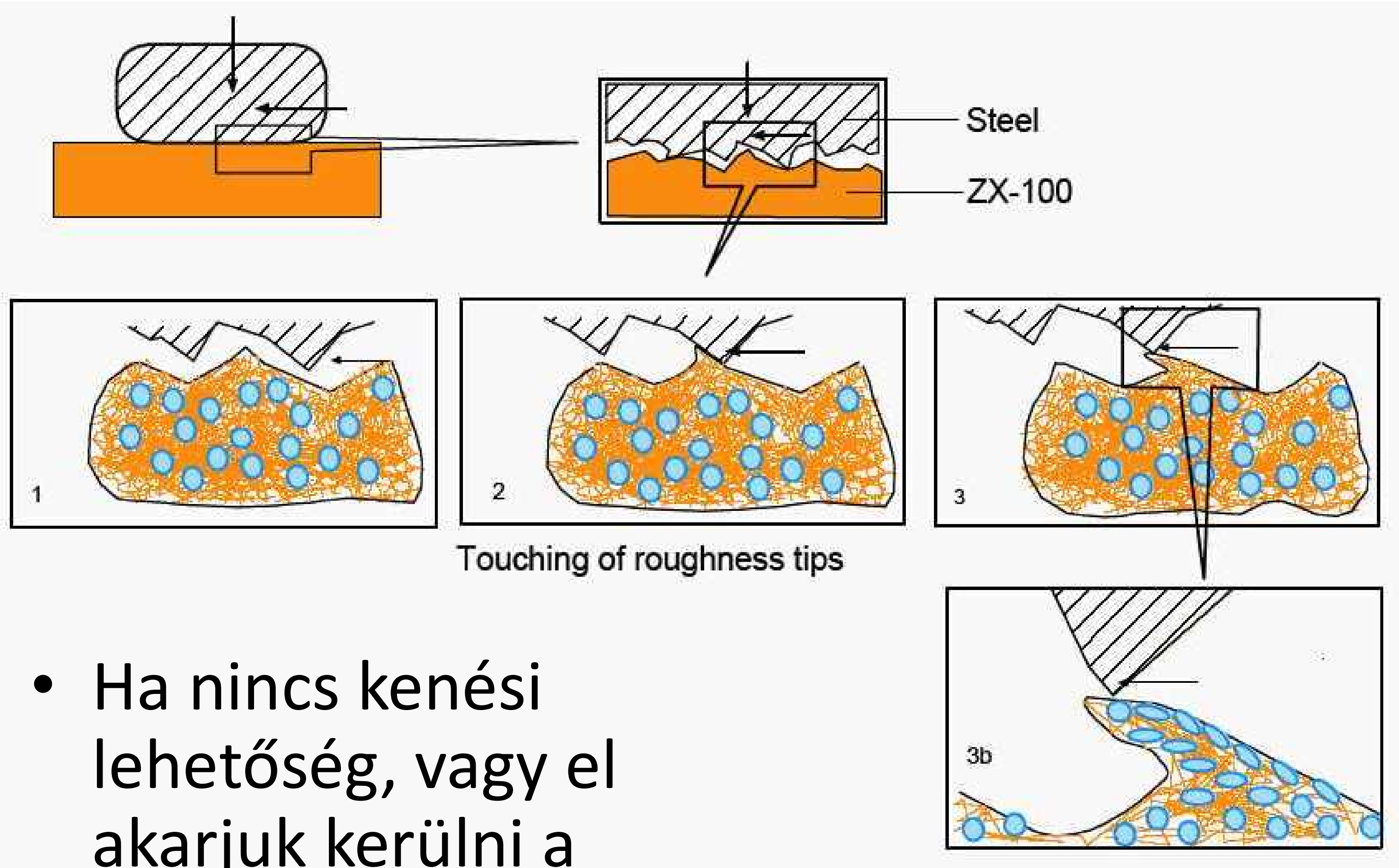
Persely anyagminőségek acél tengelyekhez

- Különféle bronzok (a bronzok réz alapú ötvözetek, réztartalom legalább 60% és a fő ötvöző nem cink). Pl.: Cu-Sn, Cu-Pb, Cu-Al (réztartalom 90% körül).
- Vörösötvözet (Cu-Sn-Zn, réztartalom 90% körül).
- Fehérfém (Ón alapú ötvözet, 80-90% Sn, a többi Cu, Pb, Sb). Vékony rétegben a persely bélelésére használják, mert kis szilárdságú.
- Sárgaréz (réz alapú ötvözet, réztartalom legalább 50% és a fő ötvöző cink).
- Műanyagok: pl. poliamid, teflon (bélésként)
- Kompozitok

– Szinterfémek: különböző fémek, grafit, molibdén-diszulfid poraiból (szemnagyság 0,01-0,2 mm) keveréket készítenek. Ezt néhány ezer bar nyomással a kívánt alakra sajtolják, majd 1000 C^o körüli hőmérsékleten izzítják. A lejátszódó diffúzió révén a szemcsék erősen kötődnek és egy porózus anyag alakul ki (kb 25% pórustérfogat). A csapágyat 120 C^o-on olajjal átitatják. Ez a kenőanyag sokszor a teljes élettartamra elegendő.

- Tengely: acél, edzett acél (finom felületi megmunkálással).

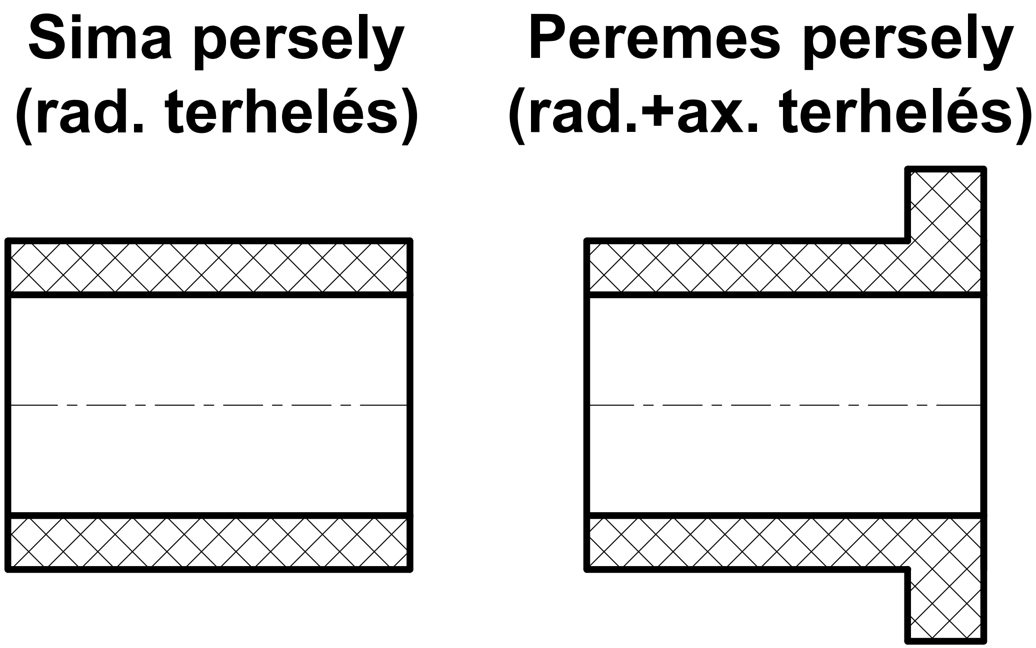
Szárazon futó siklócsapágyakhoz speciális műanyagok és kompozit anyagok



- Ha nincs kenési lehetőség, vagy el akarjuk kerülni a karbantartást.

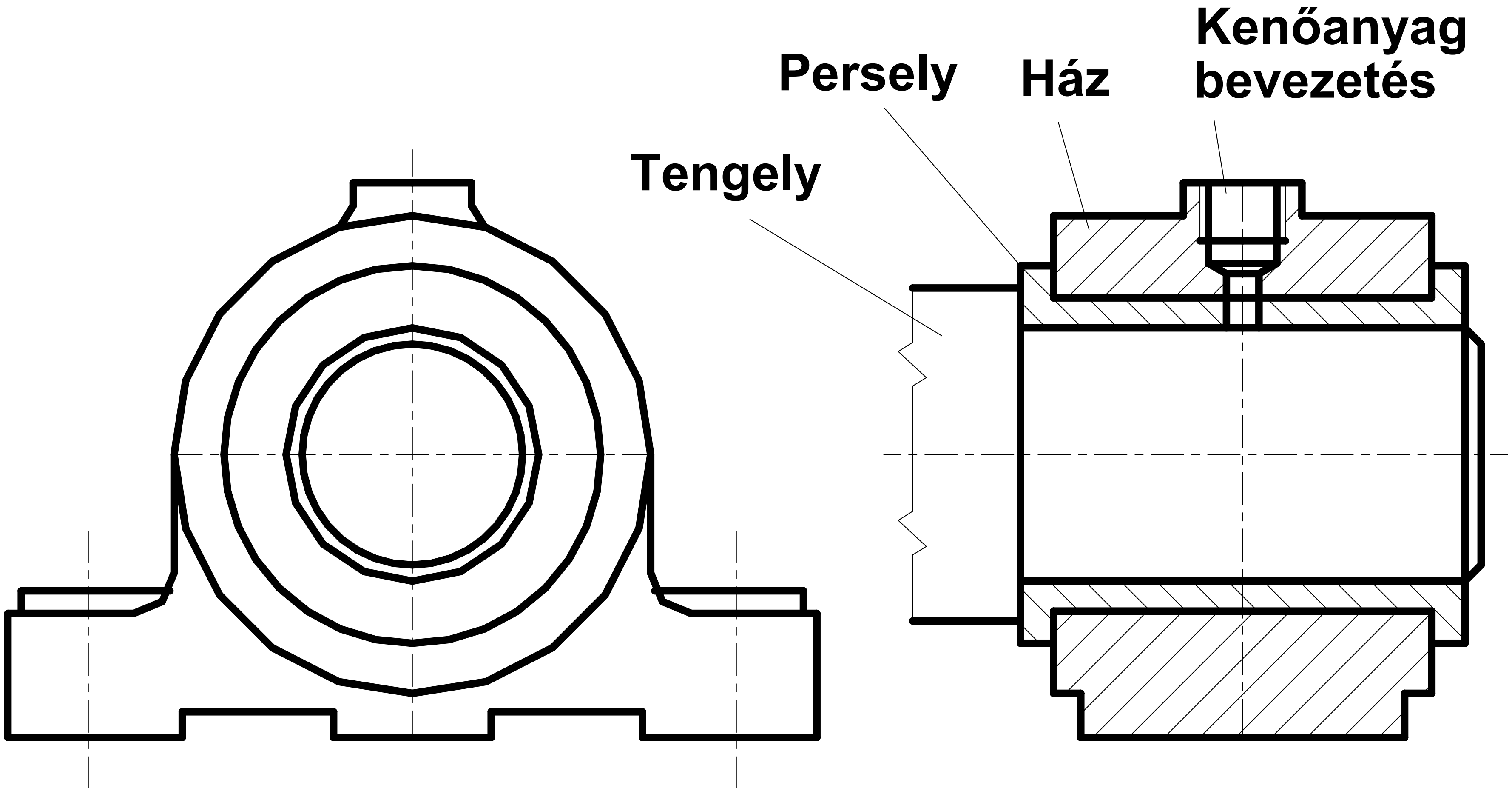
Siklócsapágyak szerkezeti kialakítása

- A legegyszerűbb csapágy egy persely, melyet a gépváz furatába besajtolnak.
  - Kis fordulatszámú, közepes terhelés, gyakori forgásirány irány váltás (csuklós mechanizmusok földmunkagépekben, anyagmozgató gépek). A kenőanyagot a csap furatán keresztül juttatják be.

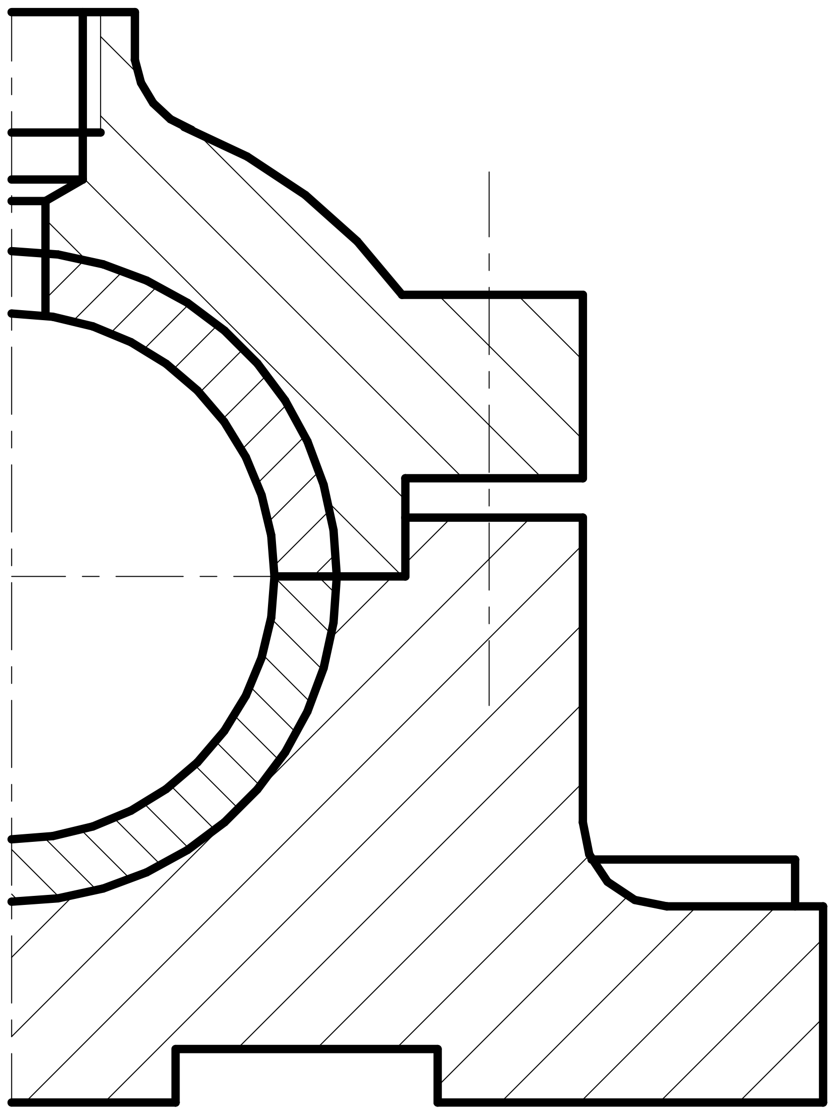


Általában szinterfém, műanyag, kompozit.

- Osztatlan házú merev radiális siklócsapágy



- Osztott házú merev radiális siklócsapágy



Hidrodinamikai kenéselmélet

Folyadéksúrlódási állapot

- Előnyei
  - Nagyin kicsi a forgatással szembeni súrlódási ellenállás.
  - Csekély melegedés és kopás.
  - Hosszú élettartam.

- Kétféle módon érhető el
  - Hidrodinamikai elven (a csap forgó mozgása tartja fenn a teherbíró olajréteget. **A továbbiakban ezzel foglalkozunk.**
  - Hidrosztatikus elven (külön szivattyú szállítja az olajat a csapágyhoz).

Teherbíró olajréteg kialakulásának feltételei hidrodinamikus csapágyakban

- **Viszkózus folyadék** a kenőrésben (pl. olaj).
- A kenőanyag jól **tapadjon** a fémfelületekhez.
- Legyen elegendően nagy **relatív sebesség különbség** a siklófelületek között.
- Legyen **szűkülő rés** a siklófelületek között.

A következő kérdésekre keressük a választ

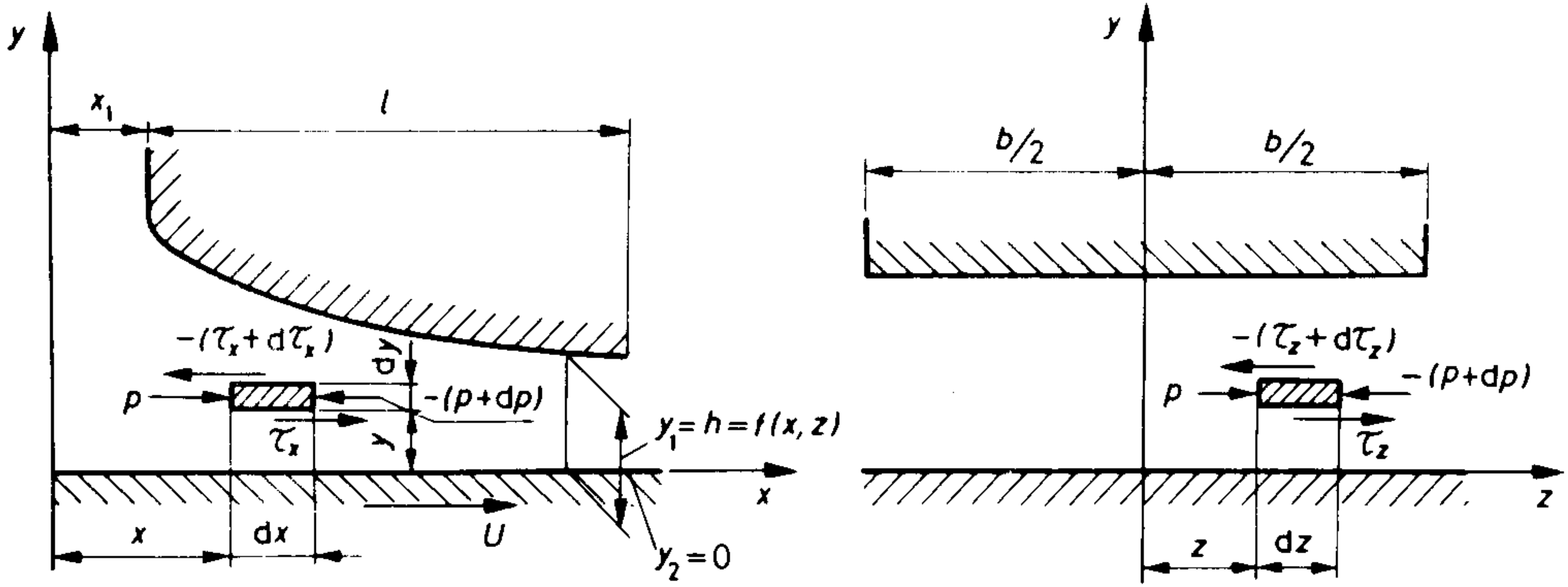
- Mennyi a csapágy teherbírása?
  - Ezt a kenőanyag nyomáseloszlásának ismeretében meghatározhatjuk.
- Mennyi a csapágy olajfogyasztása?
  - Ezt a kenőanyag sebességének ismeretében meghatározhatjuk (a folyamatos olajutánpótlásról gondoskodni kell, mert a rés homlokfelületén az olaj kifolyik).
- Milyen felületi érdesség és illesztés szükséges?
  - Ezt az olajréteg vastagságának ismeretében tudjuk megállapítani.
- Mennyire melegszik a csapágy?
  - Ezt a súrlódási tényező ismeretében tudjuk meghatározni.

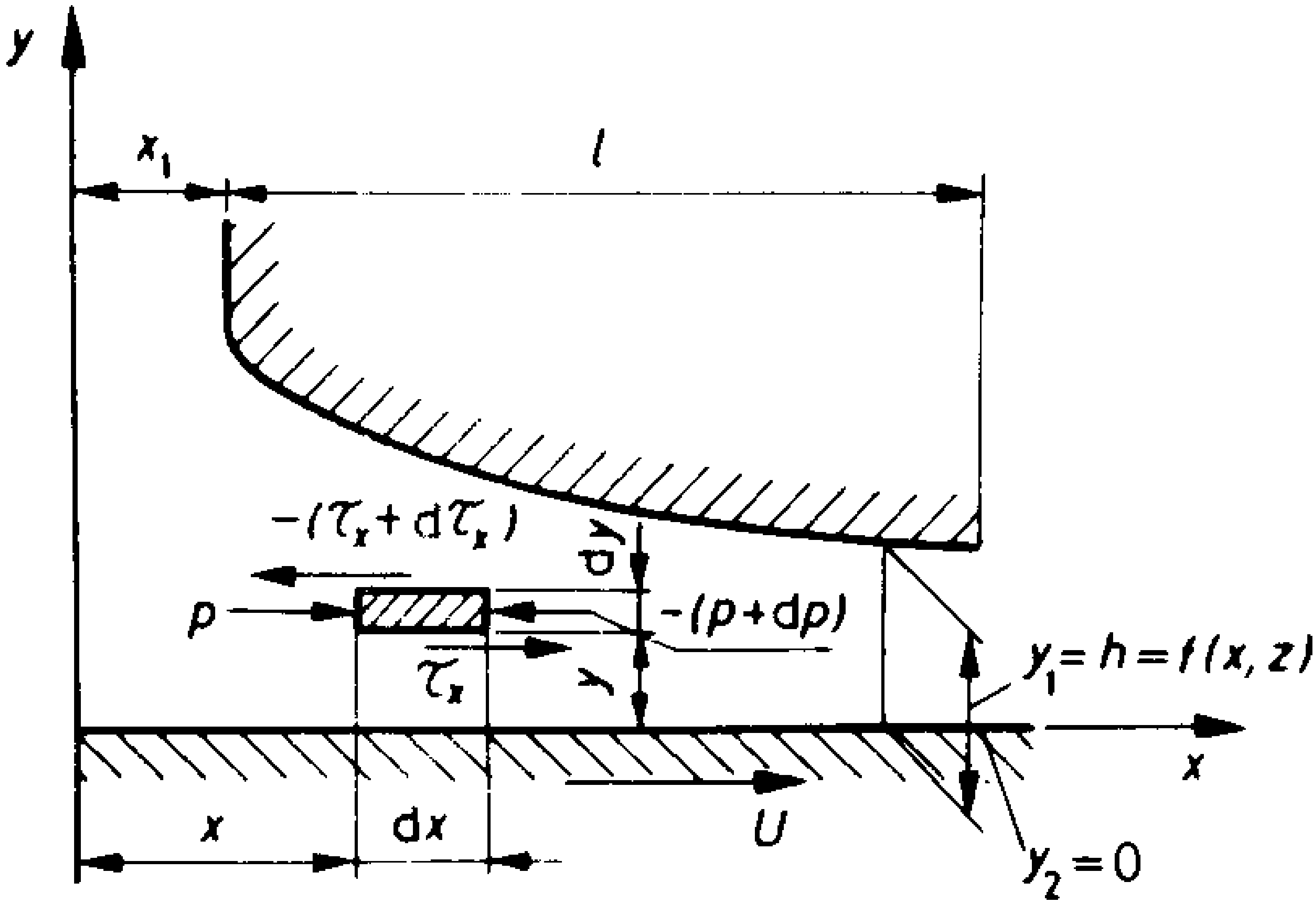
A feladat jellege

- Áramlástani probléma, mert a csap és a persely közötti résben meg kell határozni az olajnyomás és olajsebesség függvényeket. Ezek a hely és idő függvényei.
- A keresett függvényekre parciális differenciálegyenletet lehet levezetni, melyet az adott perem és kezdeti feltételek mellett kell megoldani.
- A feladat megoldása bonyolult, ezért egyszerűsítő feltételeket fogadunk el.

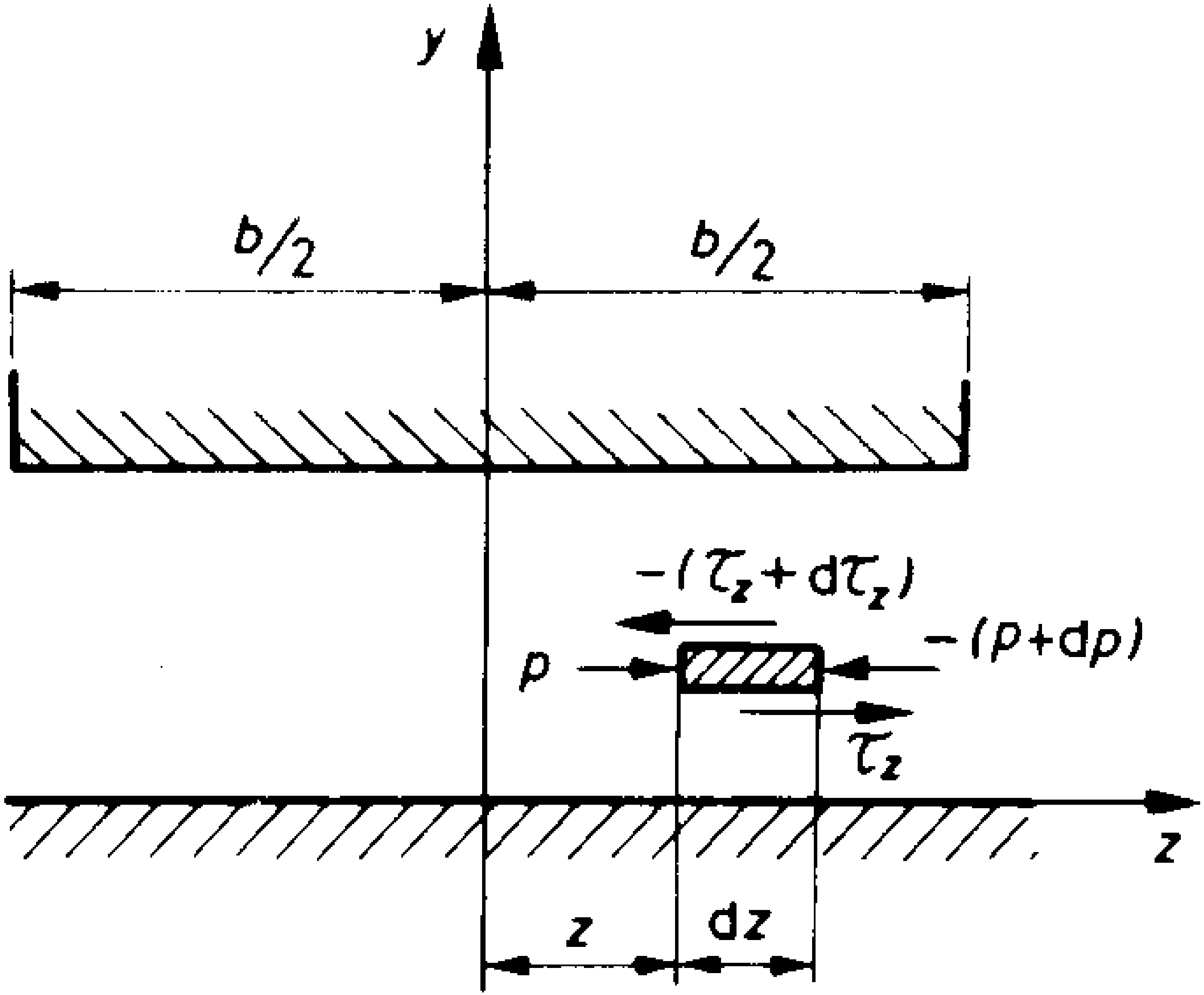
Az egyszerűsített modell

- Először nem a hengeres csapágyat vizsgáljuk, hanem egy szűkülő rést, ahol az alsó felület x irányban U sebességgel mozog.
- A folyadékelem sebességének koordinátái: u, v, w.





y
x_1
l
$-(\tau_x + d\tau_x)$
dy
p
$-(p+dp)$
τ_x
y
$y_1 = h = f(x, z)$
x
x
dx
U
$y_2 = 0$


y
b/2
b/2
−(τ_z + dτ_z)
p
−(p+dp)
τ_z
z
z
dz

Egyszerűsítő feltevések

- Az áramlás satcionárius (egy adott helyen a fizikai mennyiségek időben állandók, állandósult állapotot vizsgálunk).
- Az áramlás lamináris, ezért alkalmazhatjuk a viszkózus folyadékokra érvényes Newton-féle törvényt.
- A rés alakja állandó és a felületek tökéletesen simák.
- A rés h vastagsága kicsi az l és b méretekhez képest.
- Az olaj y irányú sebessége elhanyagolható (w=0). Emiatt y irányú nyomásváltozás sincs.
- A viszkózus erők mellett az olaj súlya és a tömegerők elhanyagolhatók (a folyadékelem tömege zérus). A dinamikai feladat így egyensúlyi feladattá egyszerűsödik.
- A külső terhelés és hőmérséklet állandó.

A feladat megoldása

- Egyensúlyi egyenletek

x irányban

$$p\cdot(dy\cdot dz) - (p + dp)\cdot(dy\cdot dz) + \tau_x\cdot(dx\cdot dz) - \left(\tau_x + d\tau_x\right)\cdot(dx\cdot dz) = 0$$

$$-dp\cdot(dy\cdot dz) - d\tau_x\cdot(dx\cdot dz) = 0$$

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial x}p = -\frac{\partial}{\partial y}\tau_x}$$

z irányban

$$p\cdot(dy\cdot dx) - (p + dp)\cdot(dy\cdot dx) + \tau_z\cdot(dz\cdot dx) - \left(\tau_z + d\tau_z\right)\cdot(dz\cdot dx) = 0$$

$$-dp\cdot(dy\cdot dx) - d\tau_x\cdot(dz\cdot dx) = 0$$

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial z}p = -\frac{\partial}{\partial y}\tau_z}$$

- Anyagtörvény
  - –Newtoni folyadékok esetén a folyadékrétegek között ébredő csúsztató feszültség a sebességgradienstől függ. η: dinamikai viszkozitás.

$$\tau_x = -\eta \cdot \frac{\partial}{\partial y} u \qquad \tau_z = -\eta \cdot \frac{\partial}{\partial y} w$$

- Ezt beírva az egyensúlyi egyenletekbe.

$$\frac{\partial}{\partial x} p = \eta \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2} u \qquad \frac{\partial}{\partial z} p = \eta \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2} w$$

A fenti két egyenletből u(y) és w(y) sebességek jellegére tudunk következtetni, mert p és deriváltjai nem függnek y-tól, így az y szerinti integrálásnál konstansként viselkednek. Az x koordinátát rögzítettnek tekintjük.

- u(y) sebesség számítása kétszeri integrálással

$$\frac{\partial}{\partial y}u = \frac{1}{\eta}\cdot\left(\frac{\partial}{\partial x}p\right)\cdot y + C_1 \qquad u = \frac{1}{2\cdot\eta}\cdot\left(\frac{\partial}{\partial x}p\right)\cdot y^2 + C_1\cdot y + C_2$$

Peremfeltételek: $u(y = 0) = U \quad \rightarrow \quad C_2 = U$

$$u(y = h) = 0 \quad \rightarrow \quad 0 = \frac{1}{2\cdot\eta}\cdot\left(\frac{\partial}{\partial x}p\right)\cdot h^2 + C_1\cdot h + U$$

$$C_1 = -\frac{1}{2\cdot\eta}\cdot\left(\frac{\partial}{\partial x}p\right)\cdot h - \frac{U}{h}$$

$$\boxed{u = \frac{1}{2\cdot\eta}\cdot\left(\frac{\partial}{\partial x}p\right)\cdot\left(y^2 - h\cdot y\right) - U\cdot\left(\frac{y}{h} - 1\right)}$$

Az y tengely mentén a sebességeloszlás parabolikus. A konkrét értékek számításához ismerni kell p deriváltját és h-t.

- w(y) sebesség számítása kétszeri integrálással

$$\frac{\partial}{\partial y} w = \frac{1}{\eta} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial z} p \right) \cdot y + C_3 \qquad w = \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial z} p \right) \cdot y^2 + C_3 \cdot y + C_4$$

Peremfeltételek: $w(y = 0) = 0 \quad \rightarrow \quad C_4 = 0$

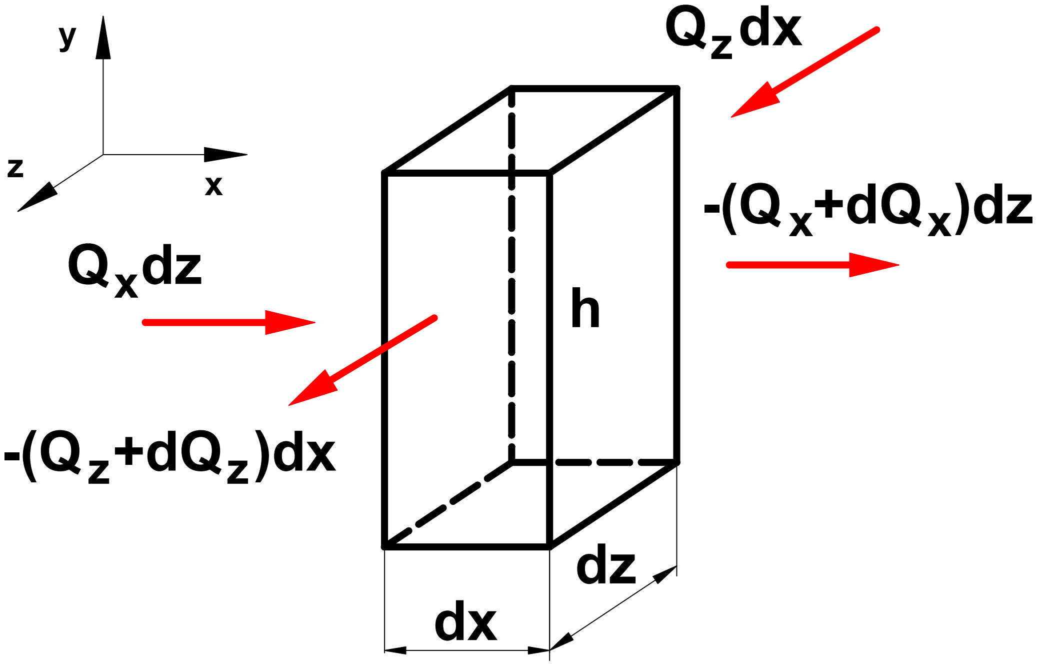
$$w(y = h) = 0 \quad \rightarrow \quad 0 = \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial z} p \right) \cdot h^2 + C_3 \cdot h$$

$$C_3 = -\frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial z} p \right) \cdot h$$

$$\boxed{w = \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial z} p \right) \cdot \left(y^2 - h \cdot y \right)}$$

Az y tengely mentén a sebességeloszlás parabolikus. A konkrét értékek számításához ismerni kell p deriváltját és h-t.

- A nyomásfüggvény számításához fel kell használni a kontinuitási egyenletet

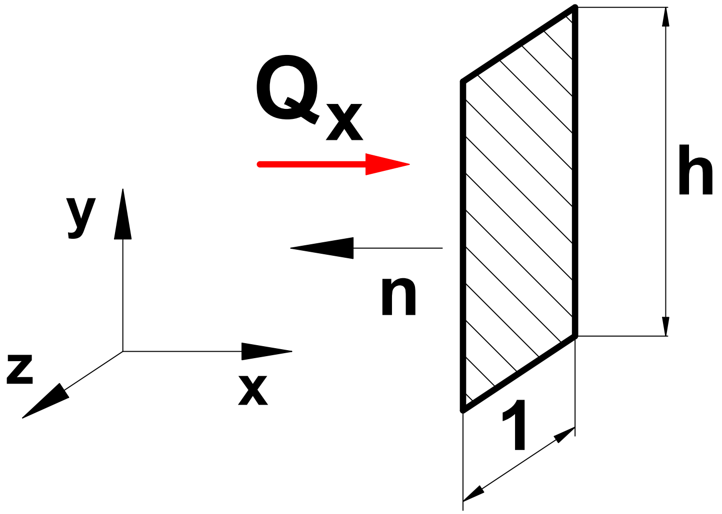


A h magasságú elemi hasábba időegység alatt annyi olaj lép be, mint amennyi kilép, mert az olaj összenyomhatatlan.

$$Q_x \cdot dz - \left(Q_x + dQ_x\right) \cdot dz + Q_z \cdot dx - \left(Q_z + dQ_z\right) \cdot dx = 0$$

$$-dQ_x \cdot dz - dQ_z \cdot dx = 0 \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{\partial}{\partial x} Q_x + \frac{\partial}{\partial z} Q_z = 0}$$

- Q_x és Q_y fajlagos térfogatáramok értelmezése



A h magasságú, egységnyi szélességű felületen, időegység alatt átáramlott folyadék mennyisége.

($m^3/s/m = m^2/s$)

Q_z értelmezése hasonlóan.

Előjeles mennyiség. Előjele a felület normálisának (n) irányításától függ. Kifejezhető a sebességekkel:

$$Q_x = \int_0^h u\, dy \qquad Q_z = \int_0^h w\, dy$$

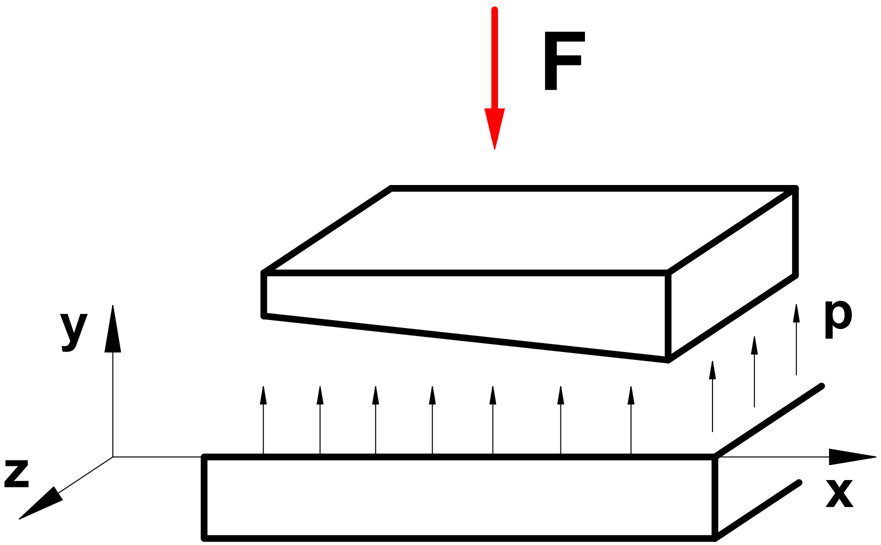
- A fenti egyenletek felhasználásával levetethető a nyomáseloszlásra vonatkozó Reynolds-féle differenciálegyenlet

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3 \cdot \frac{\partial}{\partial x} p\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(h^3 \cdot \frac{\partial}{\partial z} p\right) - 6 \cdot \eta \cdot U \cdot \frac{dh}{dx} = 0$$

Adott résfüggvény esetén meghatározható a nyomáseloszlás (a peremfeltételeket is ismerni kell).

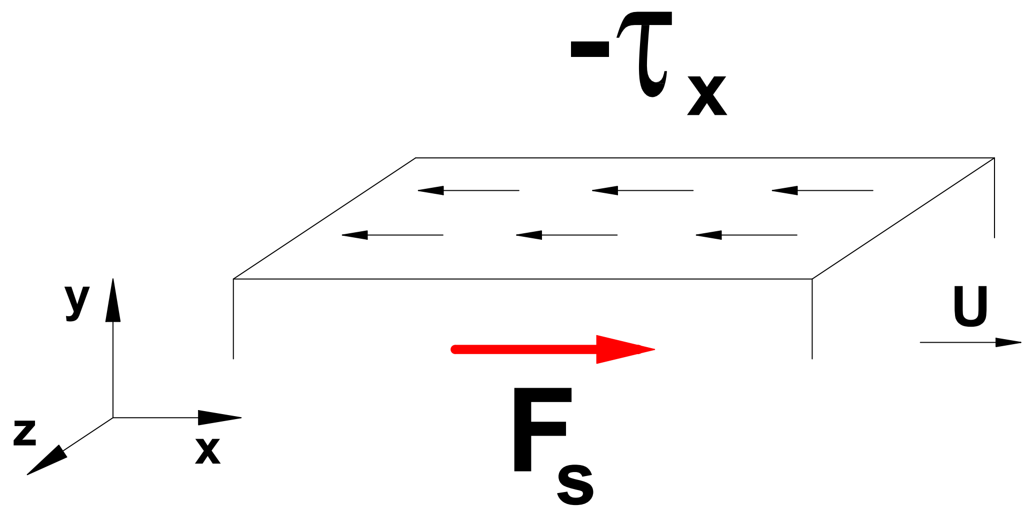
Zárt alakú megoldás nincs. Numerikus módszerekkel megoldható.

- A nyomáseloszlás ismeretében számítható az F terhelőerő



$$F = \int_{x=x_1}^{x=x_1+l} \int_{z=\frac{-b}{2}}^{z=\frac{b}{2}} p(x,z)\,dx\,dz$$

- A súrlódási erő is számítható

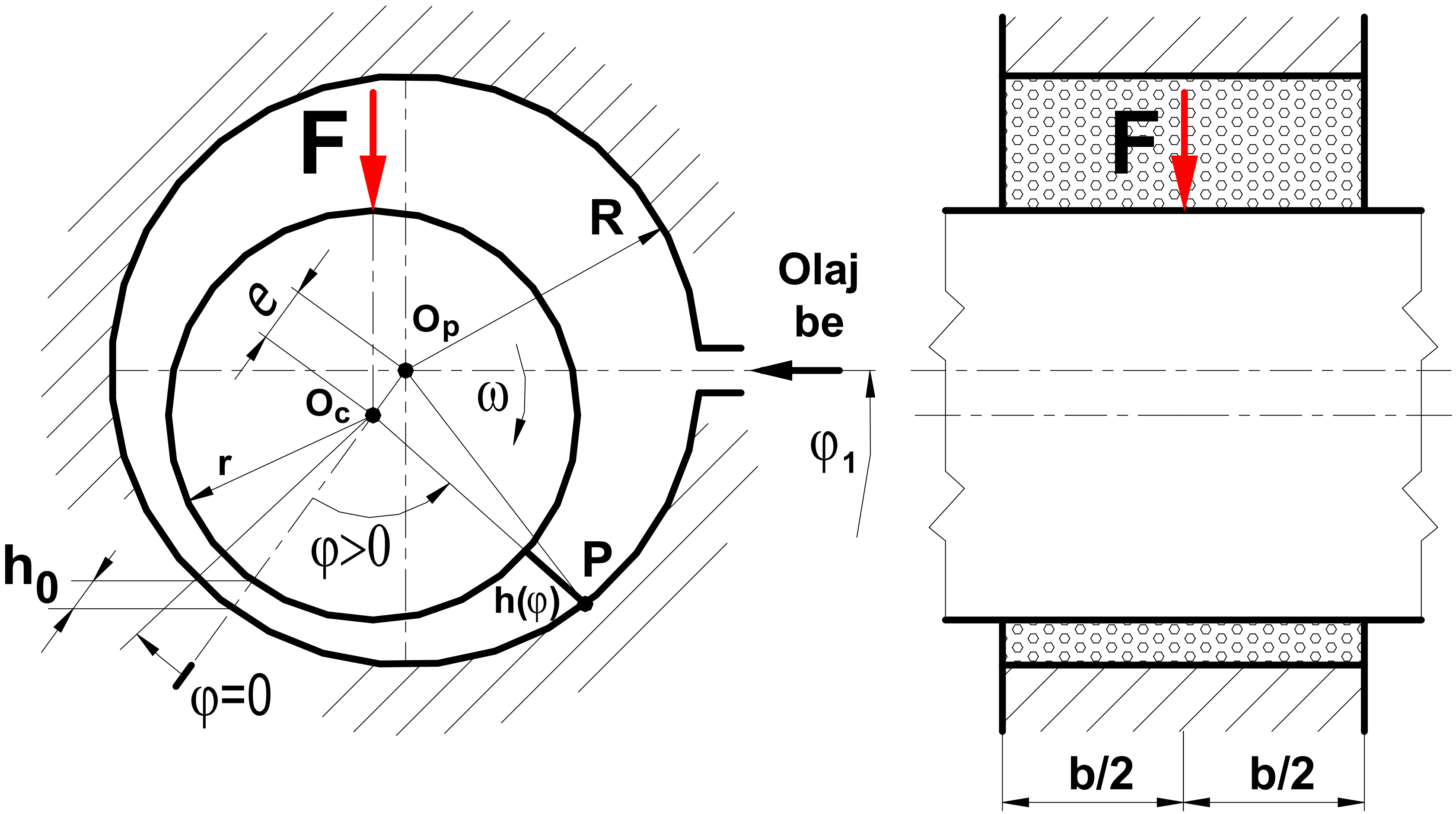


$$F_s = \int_{x=x_1}^{x=x_1+l} \int_{z=\frac{-b}{2}}^{z=\frac{b}{2}} -\left(\tau_x\right) dx\, dz \qquad \mu = \frac{F_s}{F}$$

(τ_x az y=0 helyen értendő)

Hengeres, radiális siklócsapágy esete

- Az előző számítás eredményét fogjuk felhasználni.



- Fontos jelölések

Csapágyjáték: $J = D - d$ (D: persely átmérõje
d: csap átmérõje)

Relatív játék: $\psi = \frac{J}{d} = \frac{D - d}{d} = \frac{R - r}{r} = \frac{\Delta r}{r}$

Excentricitás: e

Relatív excentricitás: $\varepsilon = \frac{e}{\Delta r}$

Csapágyrés: h

Legkisebb csapágyrés: h_o

Relatív résméret: $\delta = \frac{h}{\Delta r}$

- A h(φ) résfüggvény meghatározása.
  - Azt keressük, hogyan függ a résméret az „e” excentricitástól és az átmérőktől.
  - Cosinus-tételt írunk fel az O_cO_PP háromszögre.

$$(r+h)^2 = e^2 + R^2 - 2\cdot e\cdot R\cdot\cos(\varphi)$$

$$r^2 + 2\cdot r\cdot h + h^2 = e^2 + R^2 - 2\cdot e\cdot R\cdot\cos(\varphi)$$

$$h^2 + 2\cdot r\cdot h - \left(R^2 - r^2 + e^2 - 2\cdot e\cdot R\cdot\cos(\varphi)\right) = 0$$

$$h = -r + \sqrt{r^2 + \left(R^2 - r^2 + e^2 - 2\cdot e\cdot R\cdot\cos(\varphi)\right)}$$

$$h = \sqrt{R^2 - 2\cdot e\cdot R\cdot\cos(\varphi) + e^2\cdot\cos(\varphi)^2} - r$$

$$h = \left(R - e\cdot\cos(\varphi)\right) - r = \Delta r - e\cdot\cos(\varphi)$$

A dimenziótlan menyiségekre térünk át, felhasználva:

$$\Delta r = \psi \cdot r$$

$$e = \varepsilon \cdot \Delta r = \varepsilon \cdot \psi \cdot r$$

$$h = \psi \cdot r - \varepsilon \cdot \psi \cdot r \cdot \cos(\varphi)$$

$$\boxed{h = r \cdot \psi \cdot (1 - \varepsilon \cdot \cos(\varphi))}$$ a keresett résfüggvény.

Ha $\varphi = 0$, akkor: $h_o = r \cdot \psi \cdot (1 - \varepsilon)$ legkisebb rés.

$$\delta_o = \frac{h_o}{\Delta r} = 1 - \varepsilon$$ legkisebb relatív rés.

- A korábban levezetett Reynolds féle egyenletbe behelyettesítünk:

$$x \rightarrow r \cdot \varphi \qquad U \rightarrow -r \cdot \omega$$

$$h \rightarrow r \cdot \psi \cdot \left(1 - \varepsilon \cdot \cos\left(\varphi\right)\right)$$

A $p = p(\varphi, z)$ függvény meghatározható.

E függvényben a csapágy egyéb adatai paraméterként szerepelnek. η, ω, ψ

ε, φ_1, b/d

Hidrodinamikus siklócsapágy tervezése a gyakorlatban

- Terhelhetőség számítása:

$$\vec{F} = \int_{\varphi} \int_{z} \vec{p}(\varphi, z)\, d\varphi\, dz \qquad F = |F|$$

Integrálás után adódó kifejezés:

$$F = b \cdot d \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{\psi^2} \cdot \Phi\left(\varepsilon, \varphi_1, \frac{b}{d}\right)$$

Φ csapágyjellemzõ szám, vagy terhelési szám. Szakirodalomban diagrammokkal megadott

$$p = \frac{F}{b \cdot d}$$ átlagos felületi nyomás.

$$\boxed{p = \frac{\eta \cdot \omega}{\psi^2} \cdot \Phi\left(\varepsilon, \varphi_1, \frac{b}{d}\right)}$$ tervezéshez használt összefüggés.

- Felvesszük ε-ont és ebből számoljuk a teherbírást.
- Felvesszük p-t és ebből számoljuk ε-ont.
- A többi adat ismert paraméter.

ε nem lehet tetszőleges, mert ettől függ a legkisebb résméret és ez nagyobb kell legyen, mint a felületi érdességek összege.

$$h_o = r \cdot \psi \cdot (1 - \varepsilon) > \delta_1 + \delta_2 \qquad h_{omin} = 3 \ldots 5 \cdot \mu m$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{h_o}{r \cdot \psi_{ü}} \qquad 0.5 < \varepsilon < 0.95$$

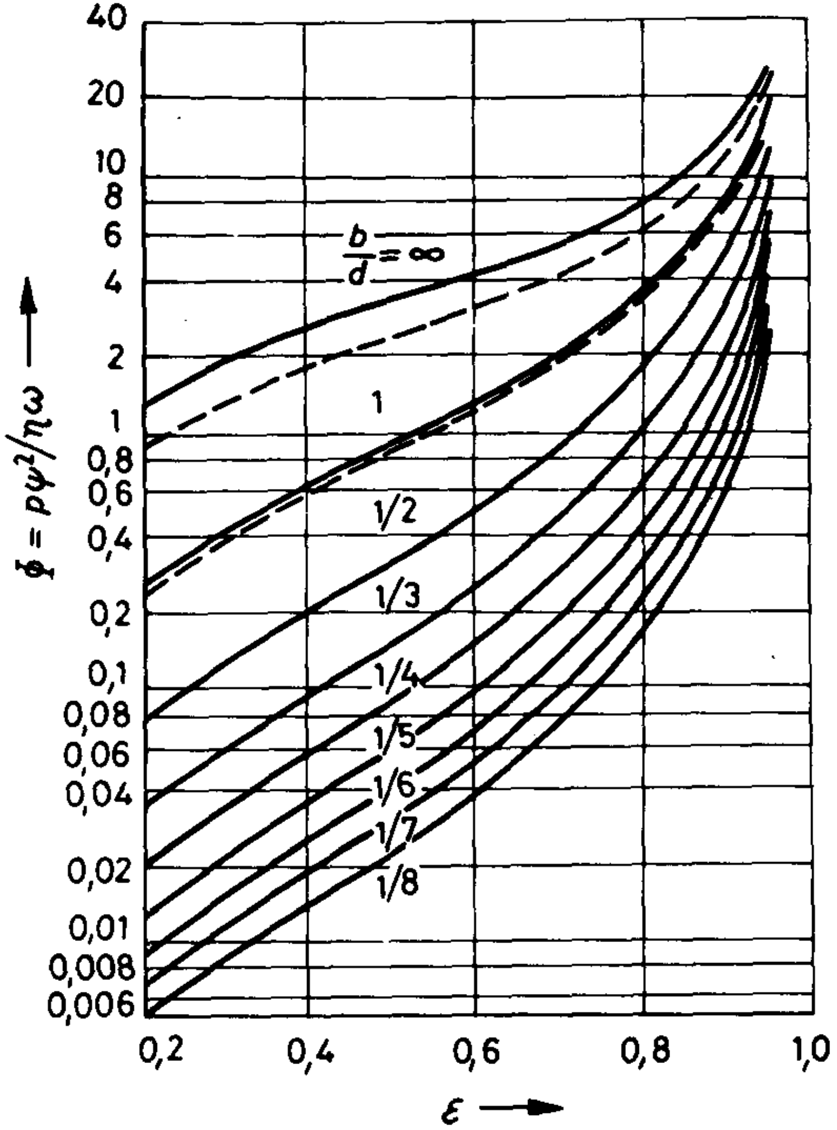
- Súrlódási tényező számítása:

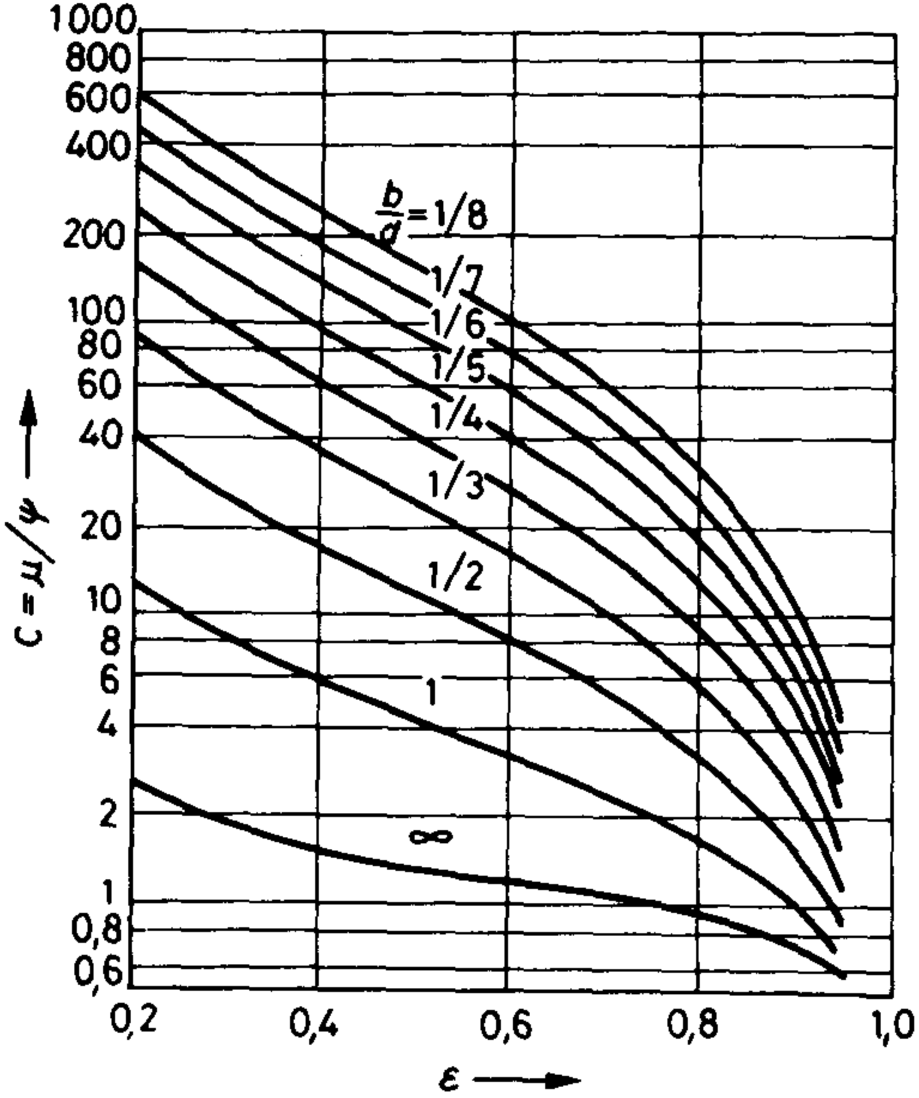
$$F_s = \int_{\varphi}^{\blacksquare} \int_{z}^{\blacksquare} \tau \, d\varphi \, dz \qquad \mu = \frac{F_s}{F}$$

$$\mu = \psi \cdot C\left(\varepsilon, \varphi_1, \frac{b}{d} \right)$$

C a súrlódási szám, diagrammokkal adott.

További számításokkal a csapágy hõmérséklete meghatározható.





- Terhelési szám
- Súrlódási szám

- Olajfogyasztás számítása

A fajlagos olajfogyasztásra levezethető:

$$q_A = \omega \cdot \psi \cdot J\left(\varepsilon, \varphi_1, \frac{b}{d}\right)$$

Olajfogyasztás (m^3/óra):

$$q = q_A \cdot (b \cdot d)$$