Mechanikai tulajdonságok és vizsgálatuk I.

Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat
BMEGEMTBGA1

Az előadás fő pontjai

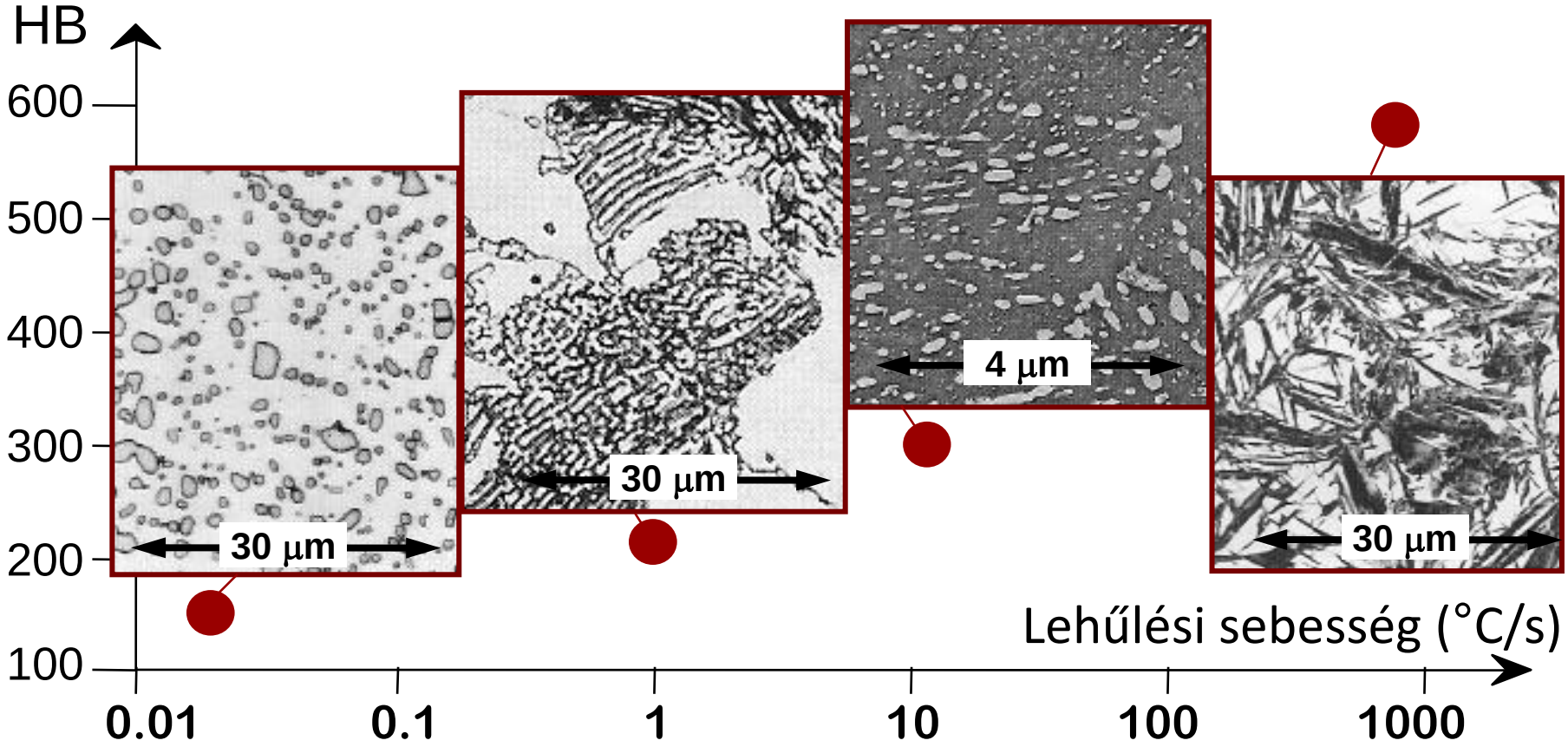
- Bevezetés
- Rugalmas és képlékeny alakváltozás
- Egyszerű igénybevételek
- Szakítóvizsgálat és mérőszámai
- Zömítő-, hajlító- és csavaróvizsgálat

Az előadás során megismerjük:

- az alapvető anyagi tulajdonságok csoportosítását;
- a rugalmas és a képlékeny alakváltozás jellemzőit;
- a valódi és a mérnöki rendszer feszültség és alakváltozás fogalmát;
- a rugalmas test anyagjellemzőit;
- a szakítóvizsgálattal meghatározható alakváltozási, feszültségi és szívóssági mérőszámokat;

Szerkezet, folyamat és tulajdonságok

- Az anyag ***tulajdonsága*** függ a ***szerkezetétől***;
  Pl: az acél keménységének és szerkezetének kapcsolata

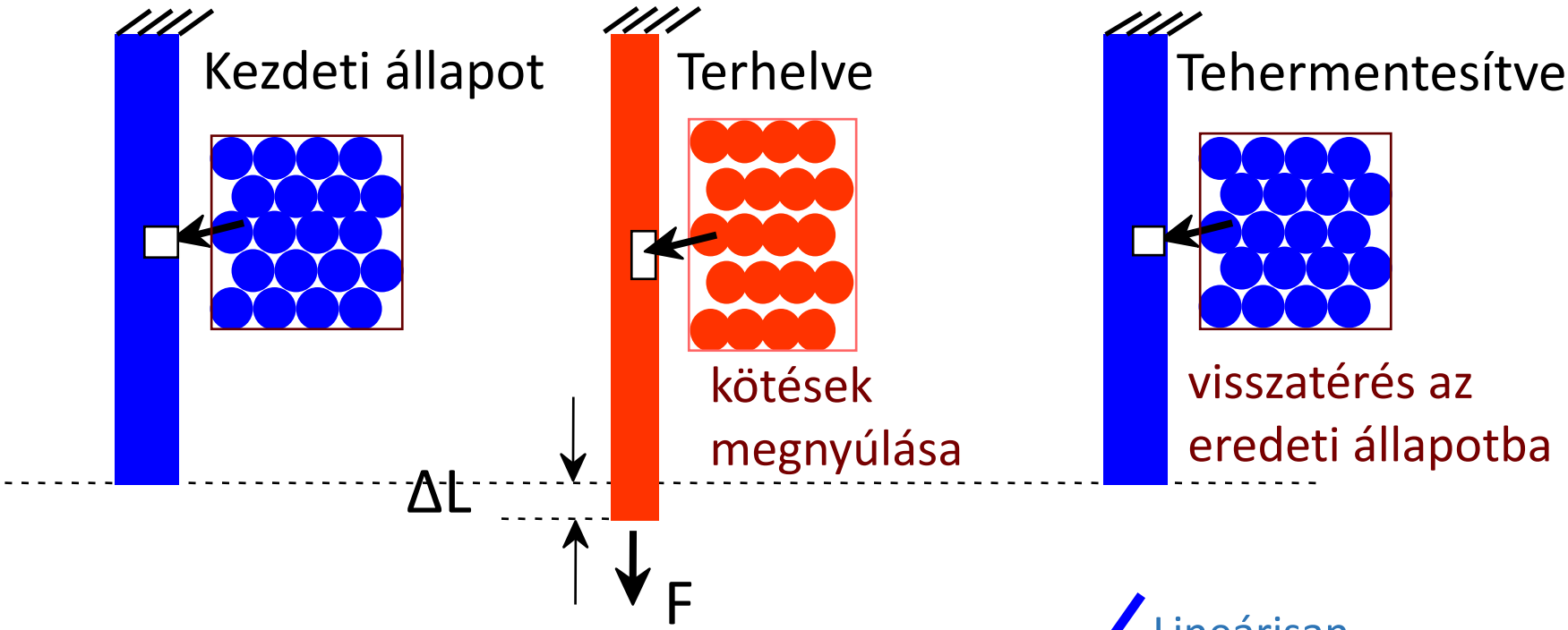


- ***Folyamat*** is megváltoztathatja a ***szerkezetet***;
  Pl.: Szerkezetváltozás a lehűlési sebesség hatására

Anyagtulajdonság csoportok

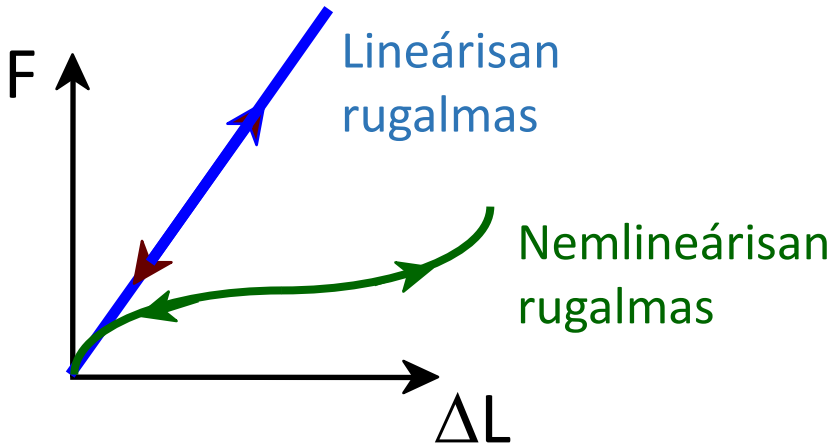
- **Mechanikai** (terhelés és alakváltozás hatása)
- Elektromos (elektromos tér hatása)
- Hő fizikai (hőmérséklet-mező hatása)
- Mágneses (mágneses tér hatása)
- Optikai (elektromágneses tér hatása)
- Károsodási (kémiai reaktivitás hatása)

Rugalmas alakváltozás

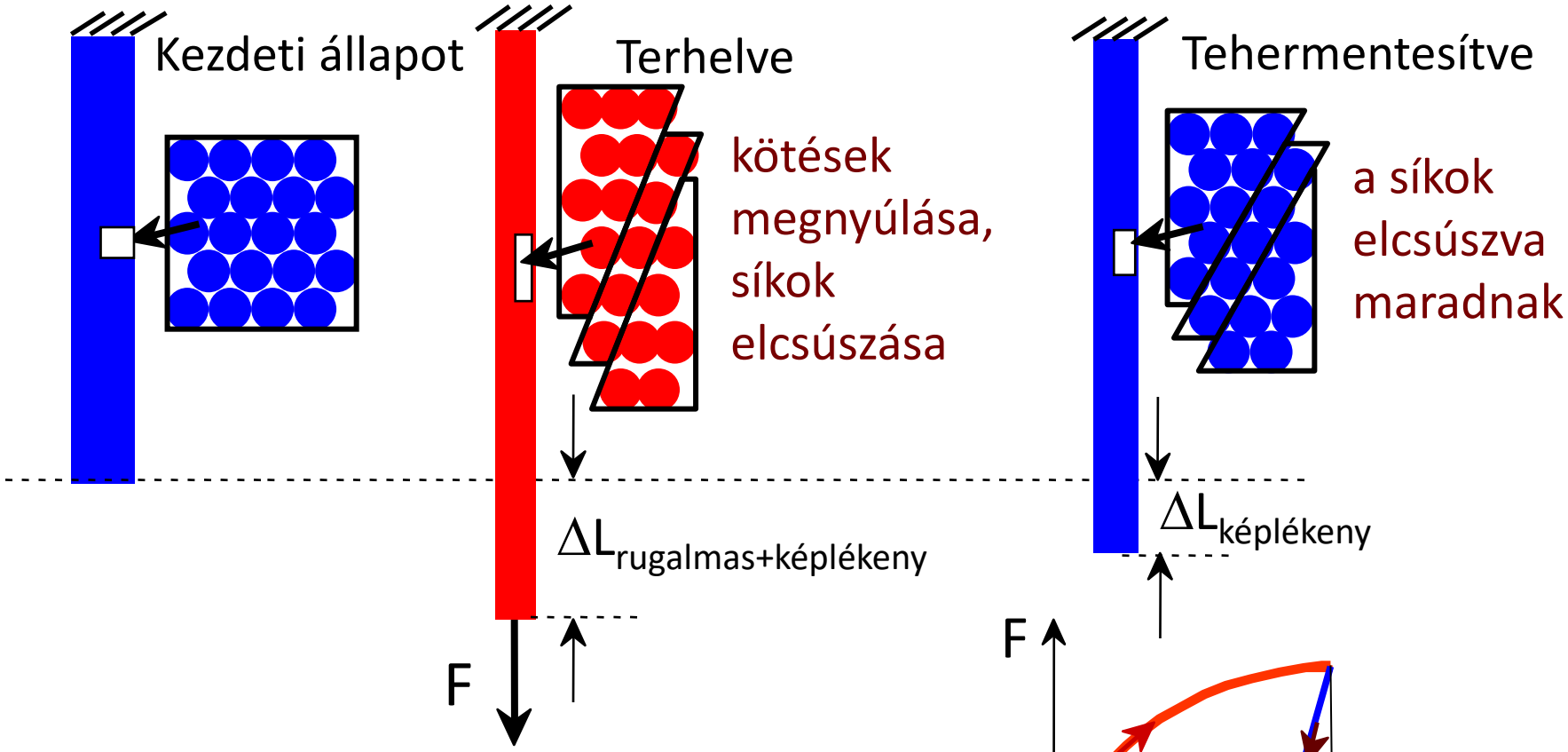


Rugalmas = reverzibilis

Rugalmas alakváltozásnál a térfogat nem állandó.

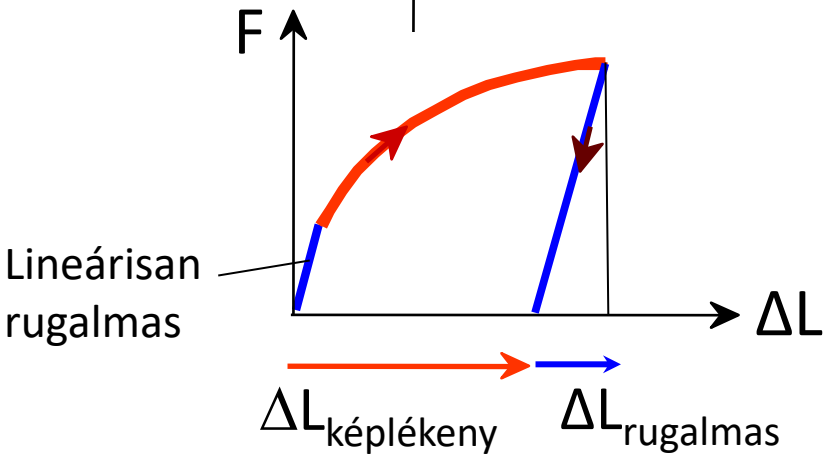


Képlékeny alakváltozás



Képlékeny = maradó

Képlékeny alakváltozásnál a térfogat állandó.



Húzó és nyomó igénybevétel

Alakváltozás

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

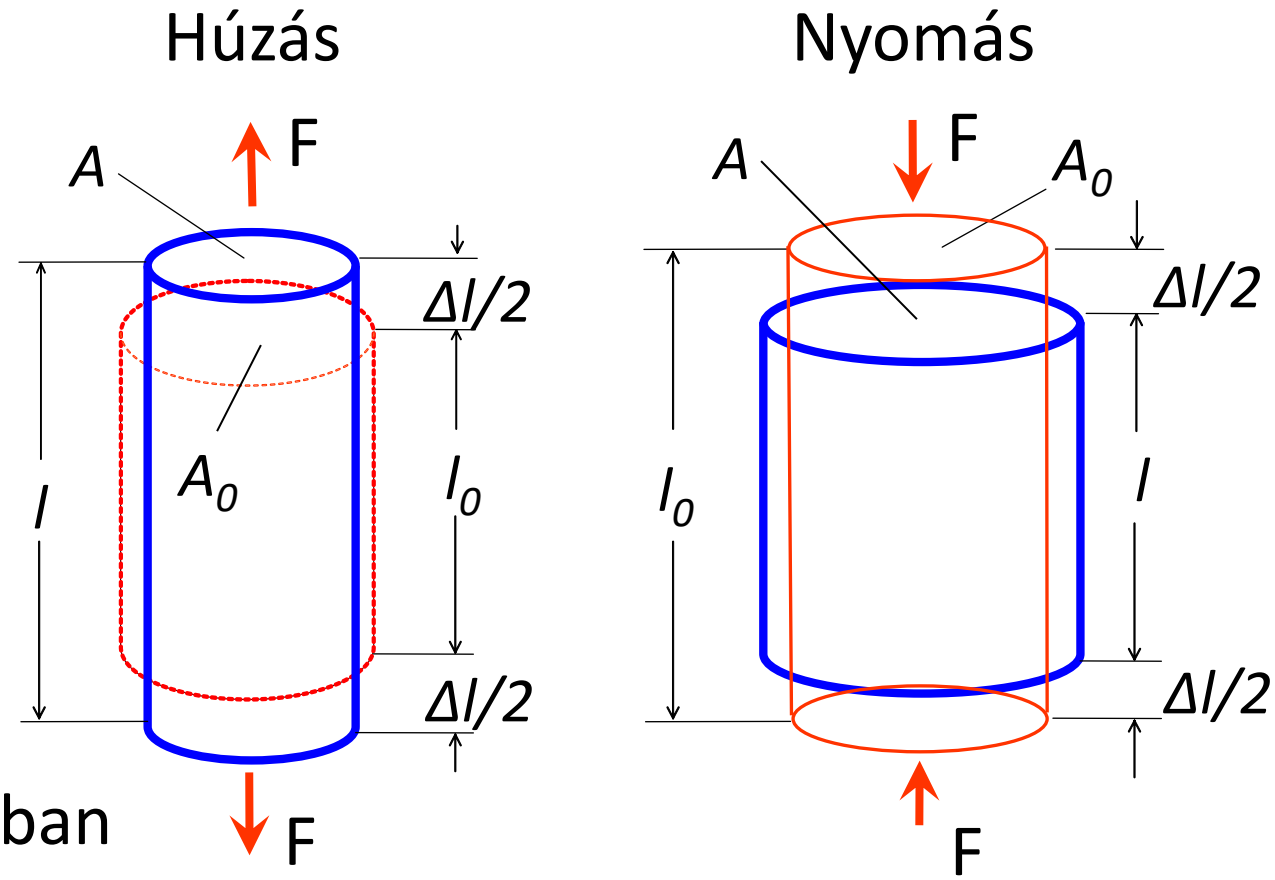
Feszültség

$$\sigma = \frac{F}{A} \approx \frac{F}{A_0}$$

Rugalmas állapotban

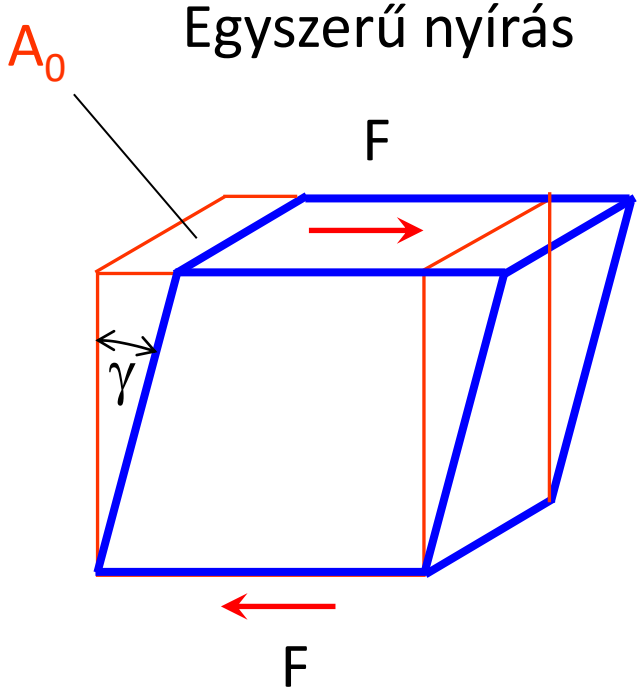
$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

(Hooke-törvény)

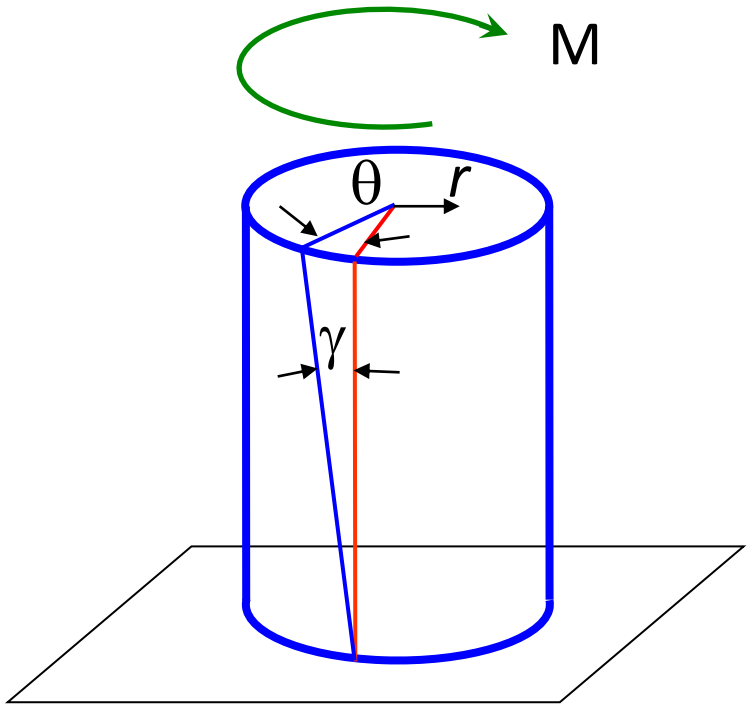


Nyíró igénybevétel

Egyszerű nyírás



Csavarás



Rugalmas állapotban

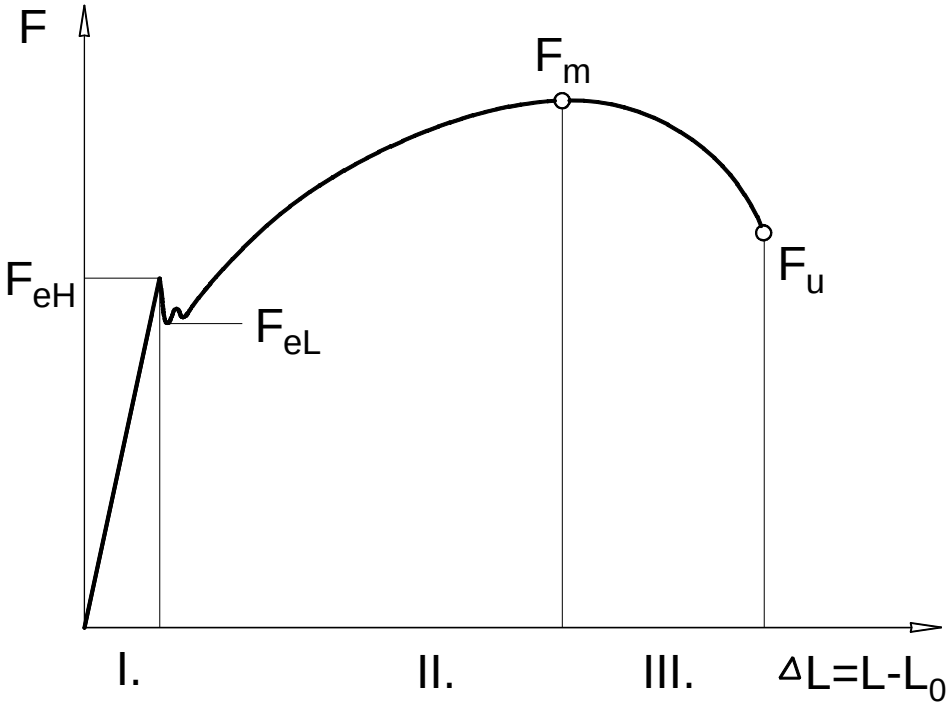
$$\tau = \frac{F}{A} \approx \frac{F}{A_0}$$

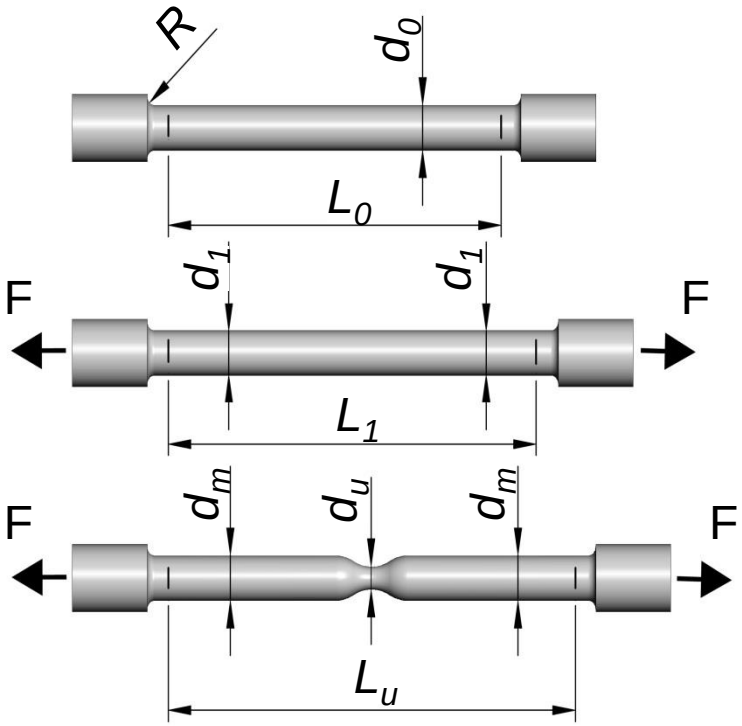
$$\tau = G\gamma$$

$$\tau = \frac{M}{I_p} r$$

$$I_p = \frac{D^4 \pi}{64}$$

Szakítódiagram





I. Rugalmas alakváltozás

II. Egyenletes alakváltozás

III. Kontrakció

Szabványos mérőszámok

Feszültségi mérőszámok

Folyáshatár (MPa)

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}, \quad R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$$

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$$

Szakítószilárdság (MPa)

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

Alakváltozási mérőszámok

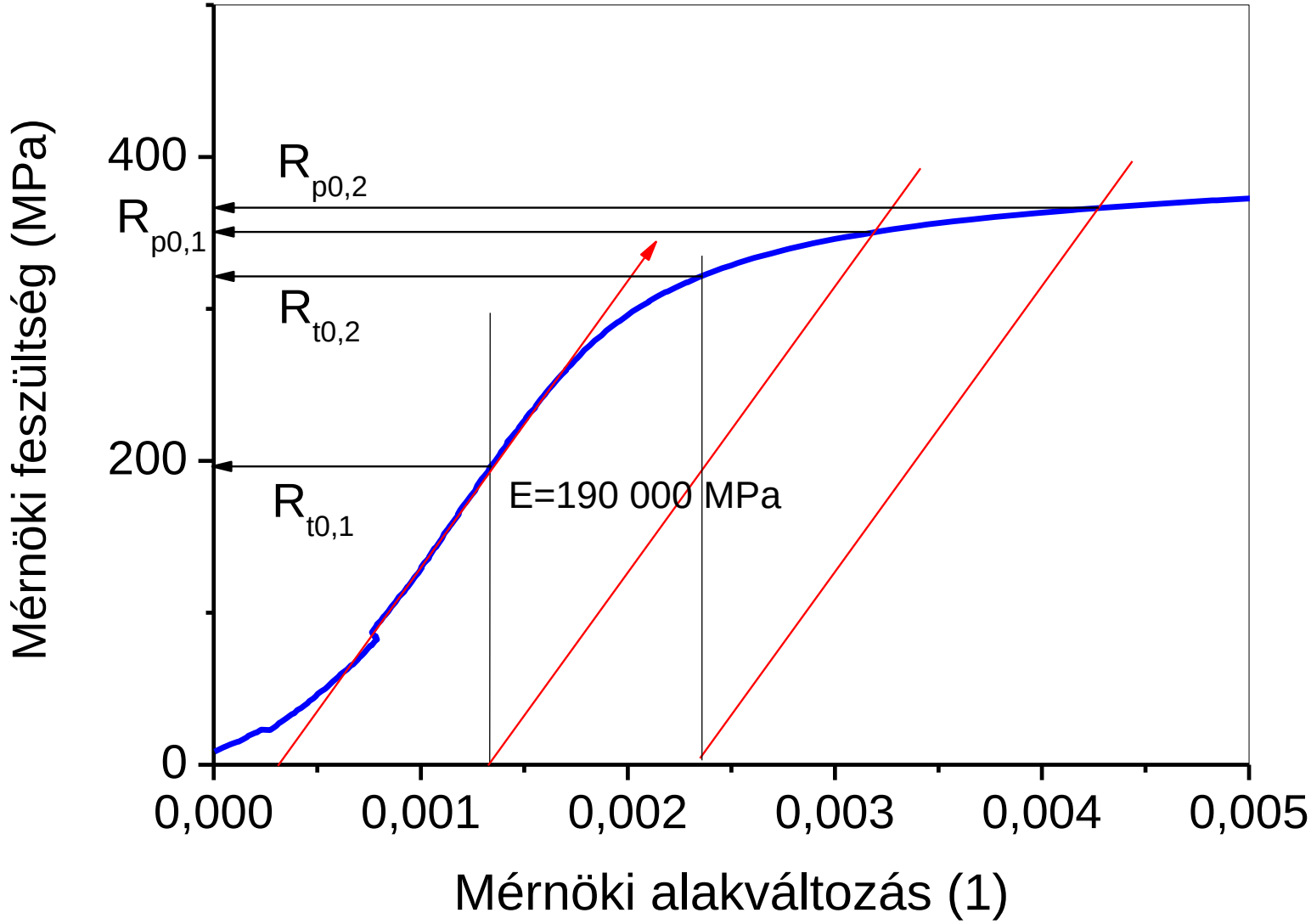
Kontrakció

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100 \ (\%)$$

Szakadási nyúlás

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} 100 \ (\%)$$

Egyezményes folyáshatár meghatározása



Az eltolt egyenesek kiinduló alakváltozás értékei kompenzálva vannak az eredeti érintő egyenes 0 MPa-hoz tartozó alakváltozás értékével.

Mechanikai mennyiségek

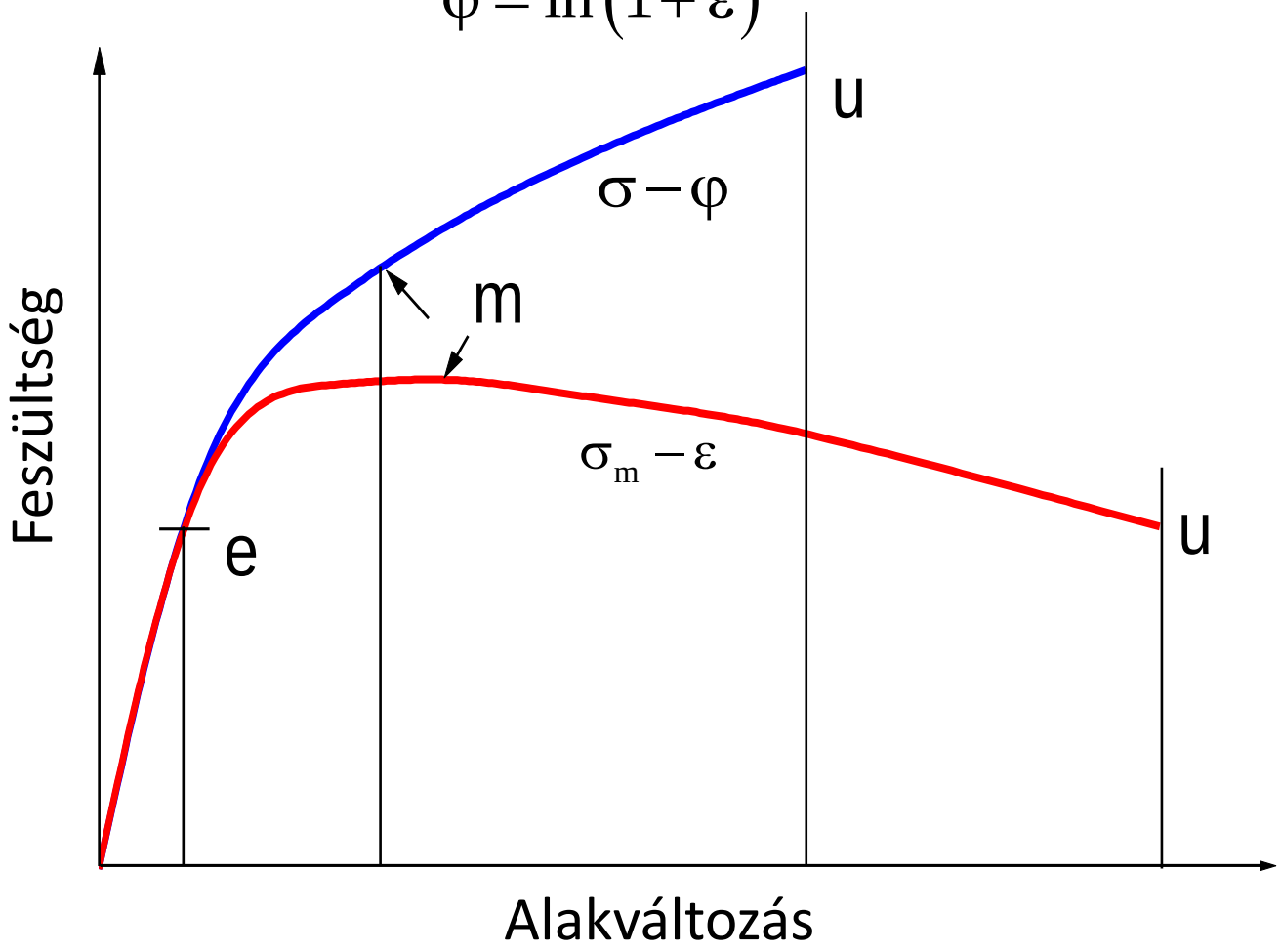
- *Mérnöki rendszer*
- *Valódi rendszer*

Mérnöki rendszer		Valódi rendszer
$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$ $\varepsilon = \frac{S_0}{S} - 1$	**Alakváltozás** Térfogat állandóság alapján	$\varphi = \ln \frac{l}{l_0}$ $\varphi = \ln \frac{S_0}{S}$
$\sigma_m = \frac{F}{S_0}$	**Feszültség**	$\sigma = \frac{F}{S}$
$W_c = \int_0^{\varepsilon_u} \sigma_m \, d\varepsilon$	**Fajlagos törési munka** (J/cm³)	$W_c = \int_0^{\varphi_u} \sigma d\varphi$

Feszültség - alakváltozás görbék

$$F = \sigma S = \sigma_m S_0 \quad \Rightarrow \quad \sigma = \sigma_m (1+\varepsilon)$$

$$\varphi = \ln(1+\varepsilon)$$

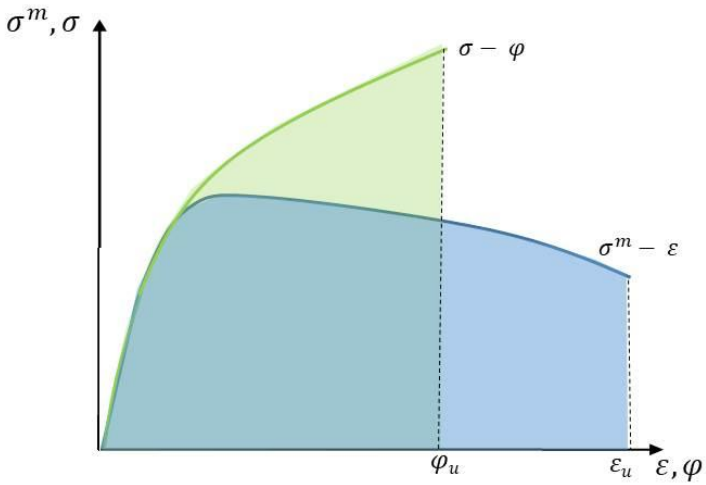


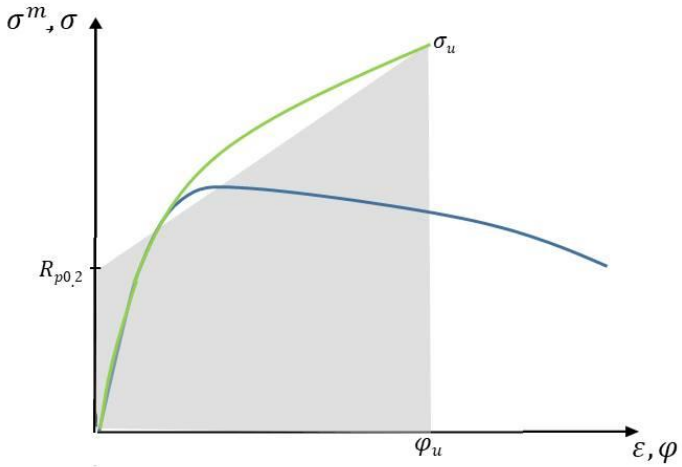
Példa

Egy szakítóvizsgálatból (d_0=10 mm, L_0=10d_0) az alábbi adatokat ismerjük: $F_{p0,2}$=6300 N, Z=75%, F_m= 11500 N. A próbatestre felvitt d_0 hosszúságú jelek hossza a szakítás után a következő: 11, 11, 11, 12, 13, 16, 13, 12, 11, 11 mm. Határozza meg az $R_{p0,2}$, σ_m, ε_m, φ_u, és $A_{11,3}$ mérőszámokat! σ_m a maximális erőhöz tartozó valódi feszültséget jelenti.

Fajlagos törési munka

$$W_c = \int_0^{\varepsilon_u} \sigma^m(\varepsilon) d\varepsilon = \int_0^{\varphi_u} \sigma(\varphi) d\varphi \ \ (\mathrm{J/cm^3})$$





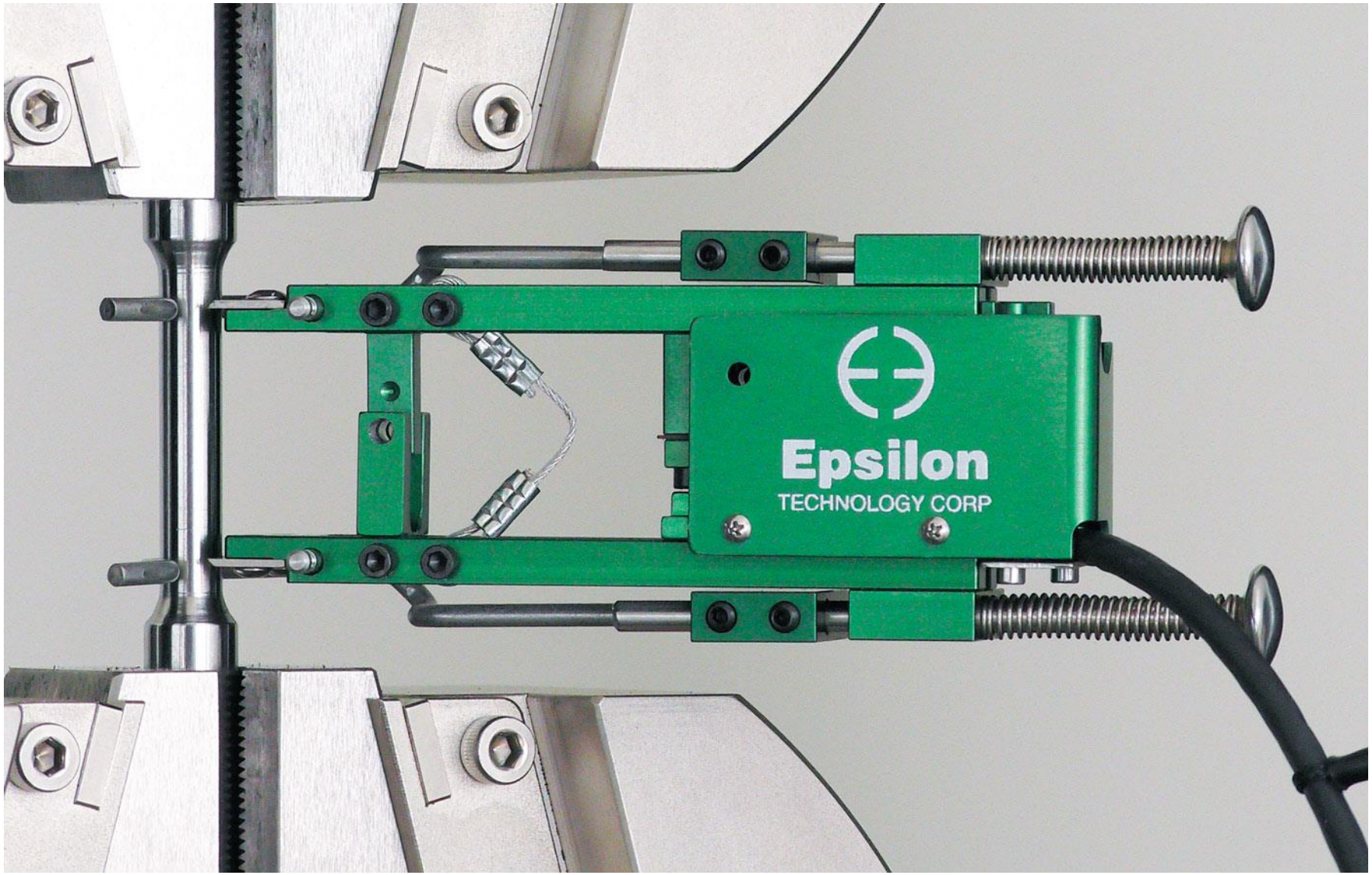
$$W_c \cong \frac{R_{p0.2} + \sigma_u^v}{2} \cdot \varphi_u \ (\mathrm{J/cm^3})$$

Közelítés: „trapézformula”

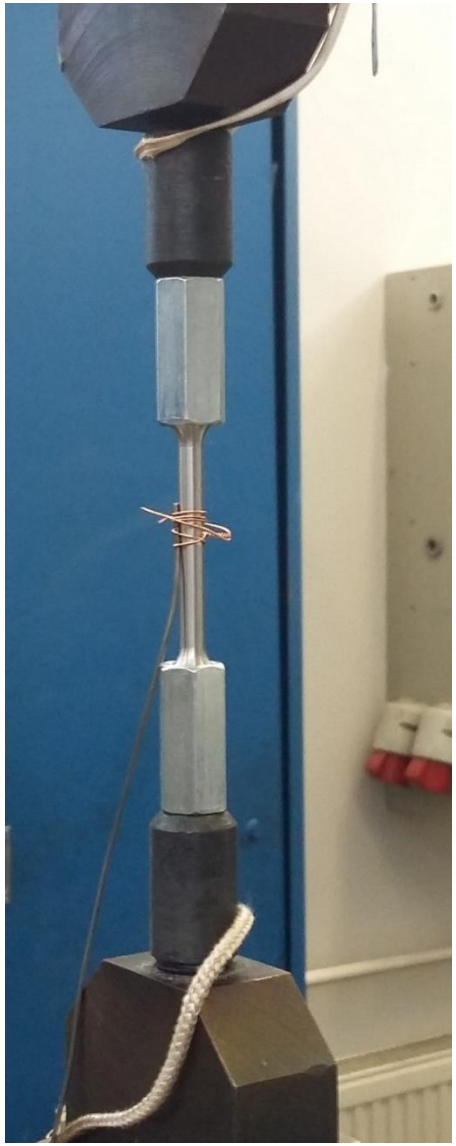
Példa

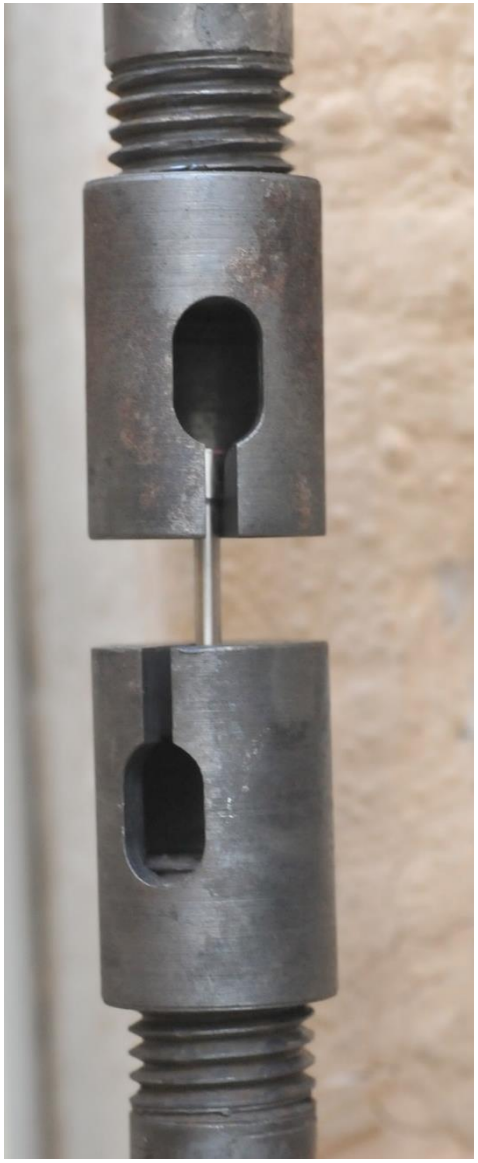
Egy d_0=10 mm kezdeti átmérőjű próbatest szakítása során az alábbi adatokat mérték: $F_{p0,2}$=22000 N, F_m=29000 N, F_u=23000 N, Z=60%, d_m=9,2 mm. Határozza meg a valódi feszültség – valódi alakváltozás rendszerben a 3 erőhöz tartozó alakváltozás és feszültség értékét, valamint a fajlagos törési munka közelítő értékét!

Szakítóvizsgálat nyúlásmérővel



Szakítóvizsgálatok





Példa

Egy 500 mm hosszú és 12,7 mm átmérőjű fém rudat egytengelyű húzásnak vetünk alá. Az alkatrész alkalmazása során a legnagyobb húzóerő 29000 N, amelynél az anyag nem deformálódhat képlékenyen, és nem nyúlhat meg 1,3 mm-nél jobban. Melyik féme(ke)t választhatjuk az alábbiak közül?

Fém	Rugalmassági modulusz (E), GPa	Folyáshatár, MPa	Szakítószilárdság, MPa
Alumíniumötvözet	70	255	420
Sárgaréz	100	345	420
Vörösréz	110	210	275
Acél	207	450	550

Lineáris rugalmas tulajdonságok

- Rugalmassági modulusz:
  E (Young-modulusz)
- Hooke - törvény:

$$\sigma = E\,\varepsilon$$

- Poisson - tényező, ν:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon}$$

fémek: $\nu \sim 0{,}33$

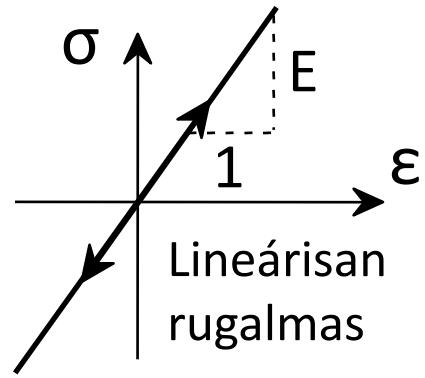
kerámiák : $\nu \sim 0{,}25$

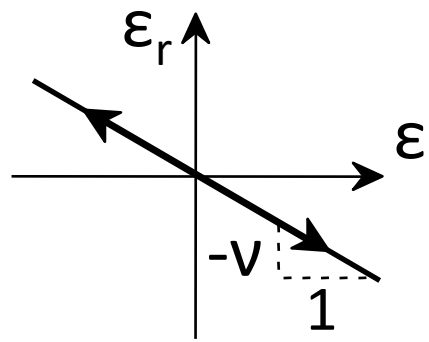
polimerek : $\nu \sim 0{,}40$

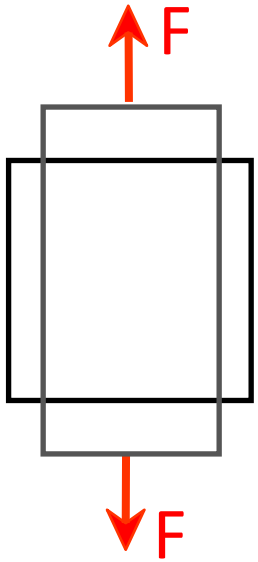
Egységek:

E: (GPa) vagy (MPa)

ν: dimenzió nélküli







Egytengelyű igénybevétel

ε_r - radiális alakváltozás

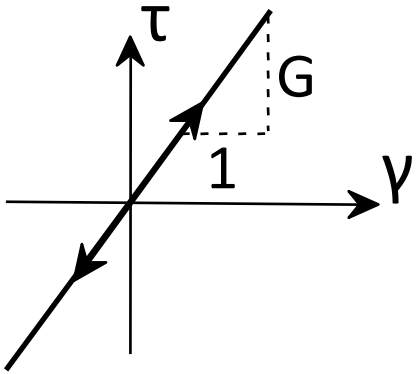
$$E_{kerámia} > E_{fém} >> E_{polimer}$$

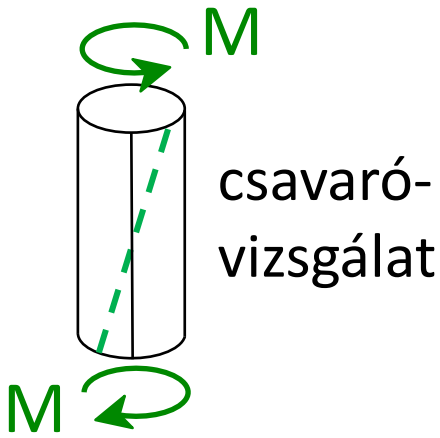
Lineáris rugalmas tulajdonságok

- Csúsztató rugalmassági modulusz, G

- Hooke - törvény:

$$\tau = G\,\gamma$$



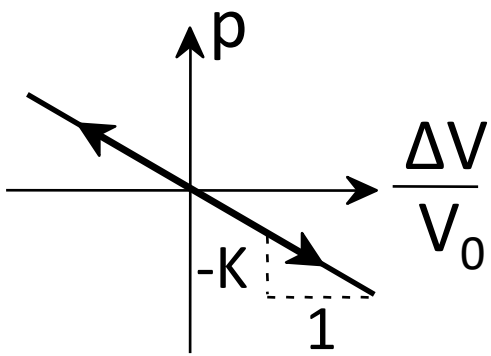


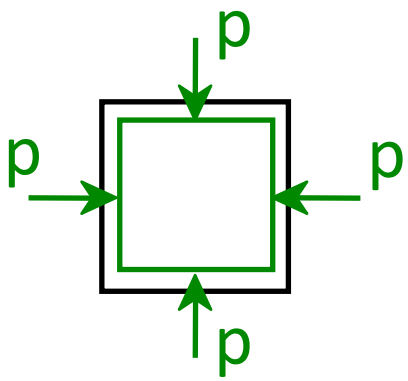
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

- Térfogati rugalmassági modulusz, K

$$p = -K\frac{\Delta V}{V_0}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$





Hidrosztatikus nyomás alkalmazása

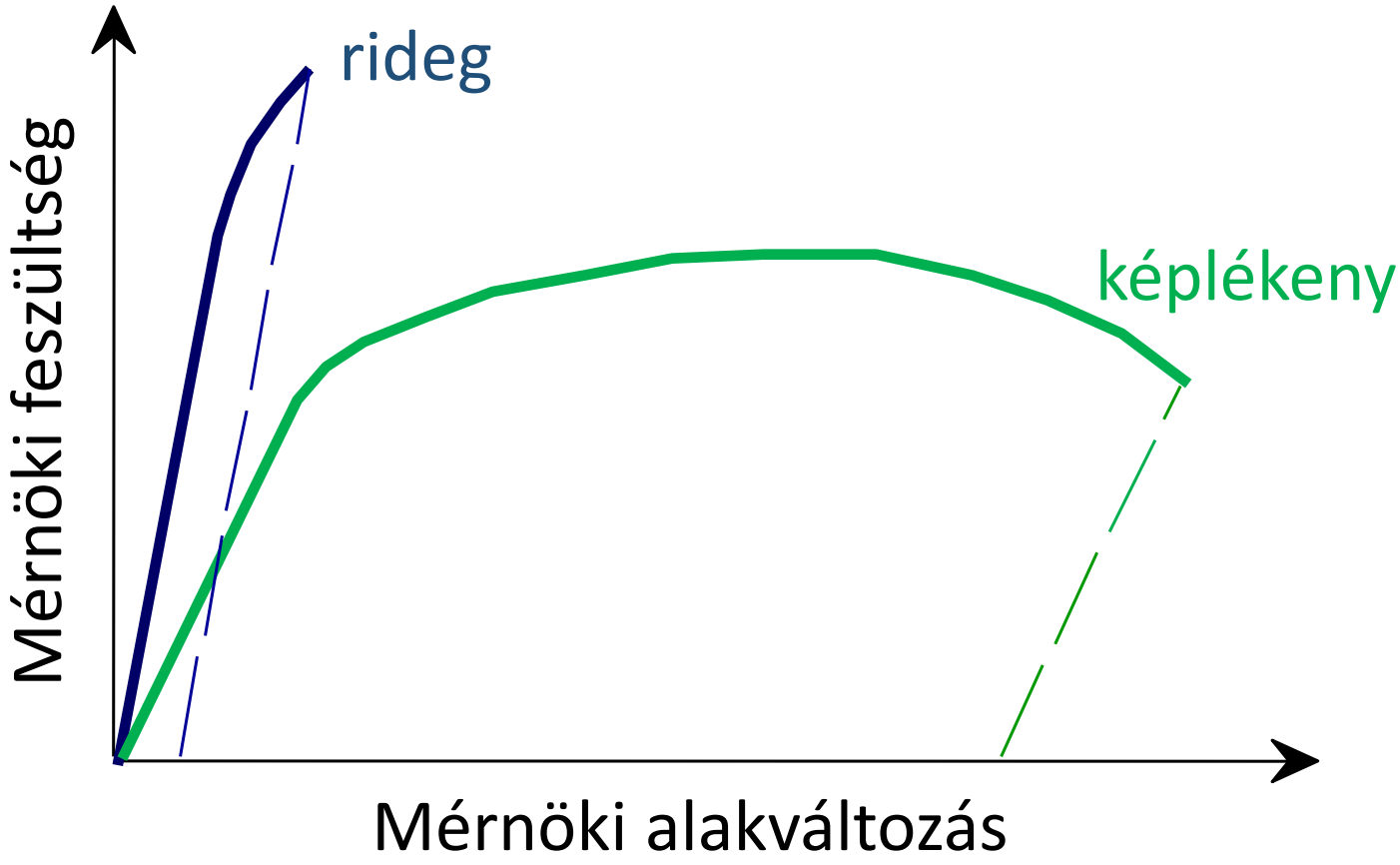
- kezdeti térfogat : V_o
- térfogat változás: ΔV

Példa

Egy rézből készült rúd kezdeti átmérője 10 mm. Mekkora húzóerőt kell alkalmaznunk, ha azt akarjuk, hogy a rúd átmérője $2{,}5*10^{-3}$ mm-rel változzon meg, és a húzás során a rúd csak rugalmas alakváltozást szenvedjen?

A réz rugalmassági modulusza E=97 GPa, Poisson-tényezője ν=0,34.

Képlékeny / rideg viselkedés



ha a *maradó* alakváltozás közel *nulla*, akkor rideg

ha a *maradó* alakváltozás *jelentős*, akkor képlékeny

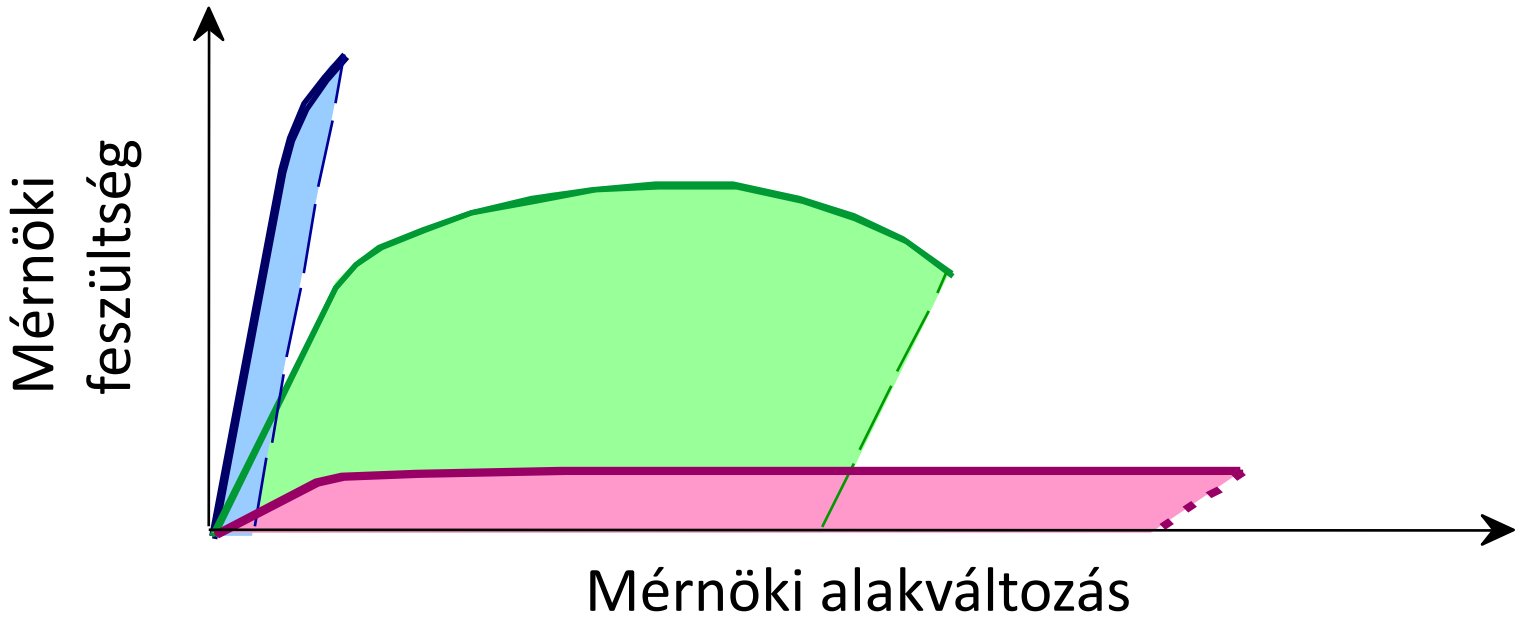
Szívósság

Az anyag törésig tartó energiaelnyelő képessége.

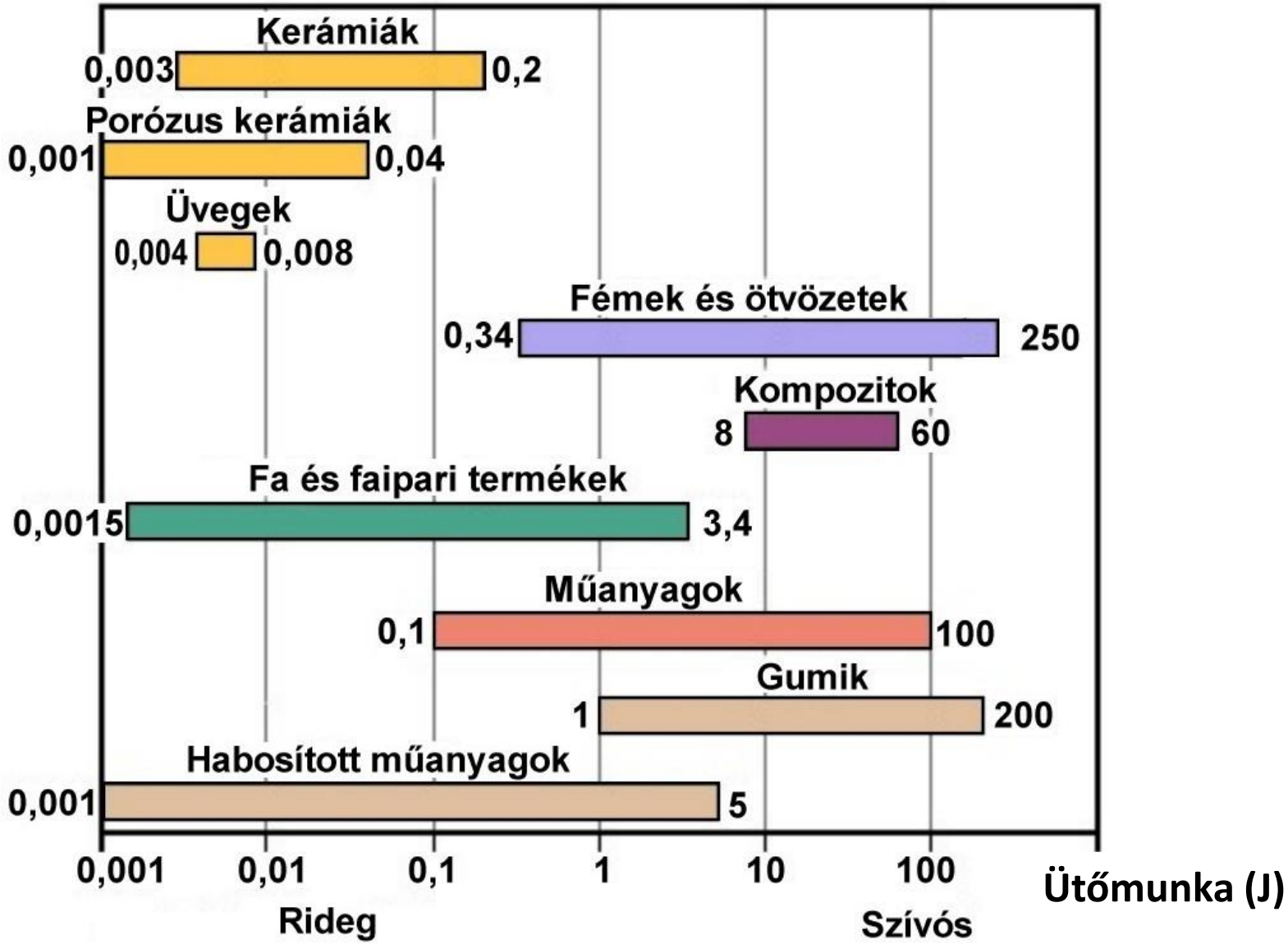
kerámia: kis szívósság (nagy szilárdság, rideg viselkedés)

fém: nagy szívósság (közepes szilárdság, képlékeny viselkedés)

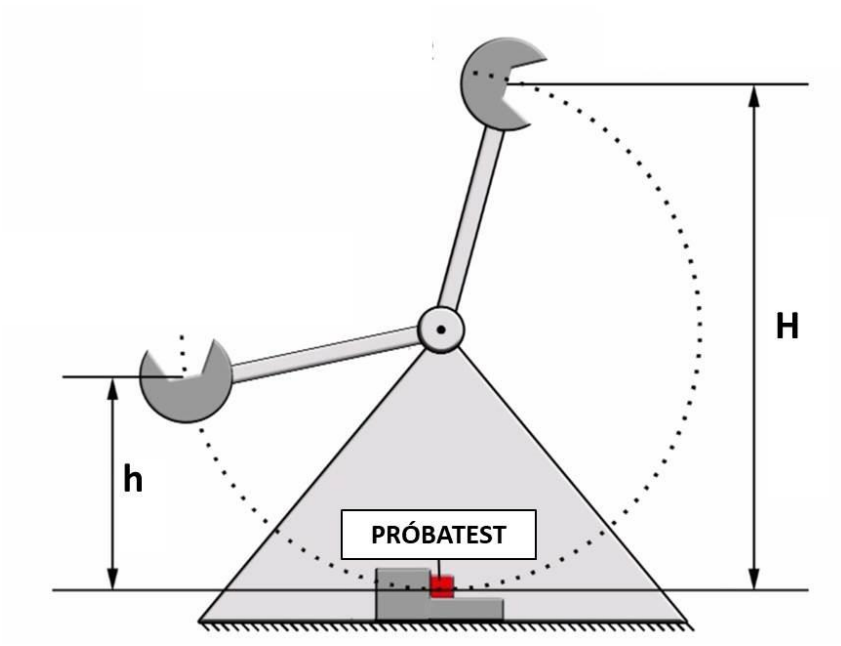
polimer: kis szívósság (kis szilárdság, képlékeny viselkedés)



Szívósság


Kerámiák
0,003
0,2
Porózus kerámiák
0,001
0,04
Üvegek
0,004
0,008
Fémek és ötvözetek
0,34
250
Kompozitok
8
60
Fa és faipari termékek
0,0015
3,4
Műanyagok
0,1
100
Gumik
1
200
Habosított műanyagok
0,001
5
0,001
0,01
0,1
1
10
100
Rideg
Szívós
Ütőmunka (J)

Charpy-féle ütővizsgálat

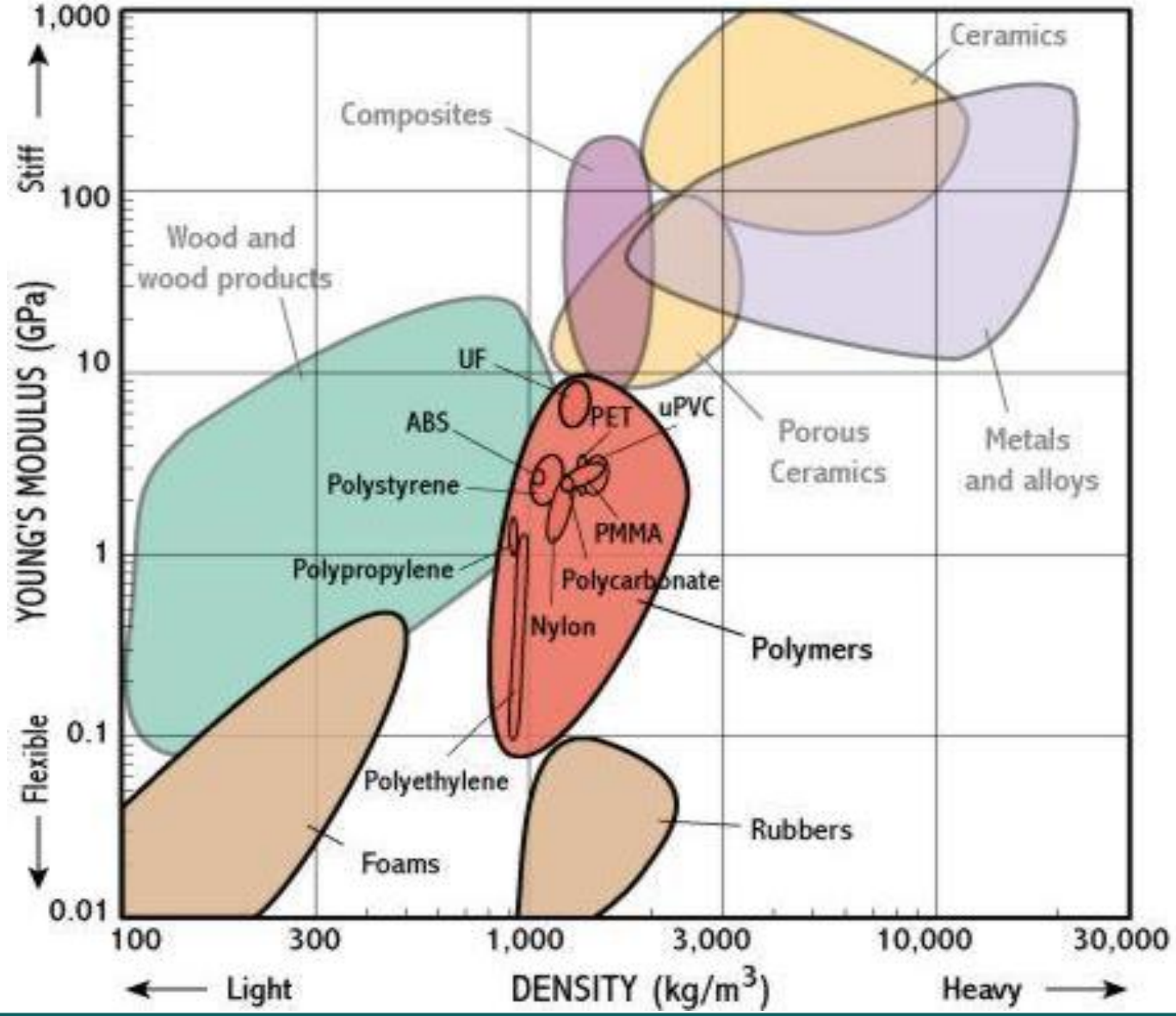


Ütőmunka: $KV=mg(H-h)$ [KV]=J (Joule)

Különböző anyagok mechanikai tulajdonságai 20°C-on

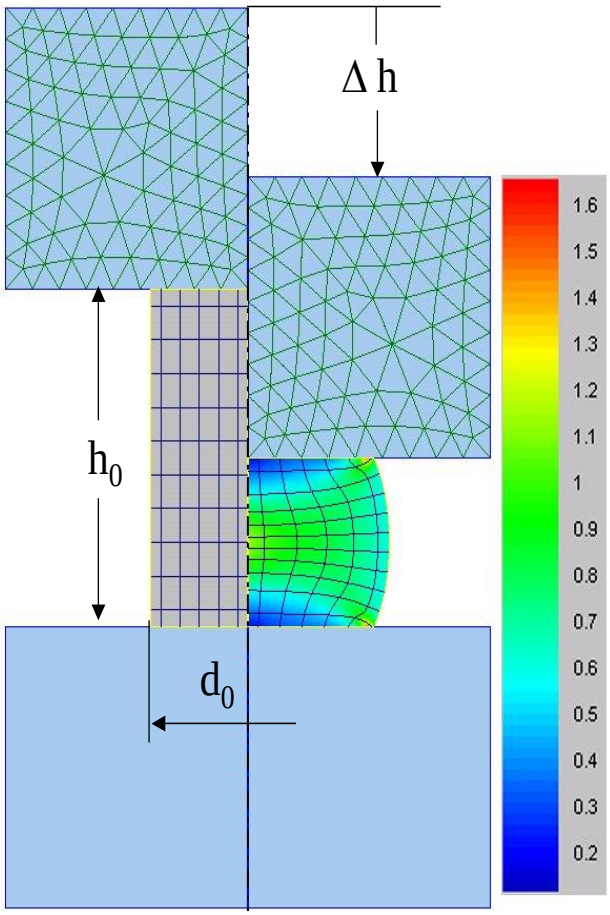
Anyag	E (GPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_{50} (%)
Acél	190-210	200-1700	400-1800	65-2
Al és ötv.	69-79	35-550	90-60	45-4
Réz és ötv.	105-150	75-1100	140-1300	65-3
Titán és ötv.	80-130	340-1400	410-1450	25-7
Kerámiák	70-1000	-	140-2600	0
Gyémánt	820-1050	-	-	-
Polimerek	1,4-3,4	-	7-80	1000-5
Karbonszál	275-415	-	2000-3000	0
Kevlárszál	62-120	-	2800	0

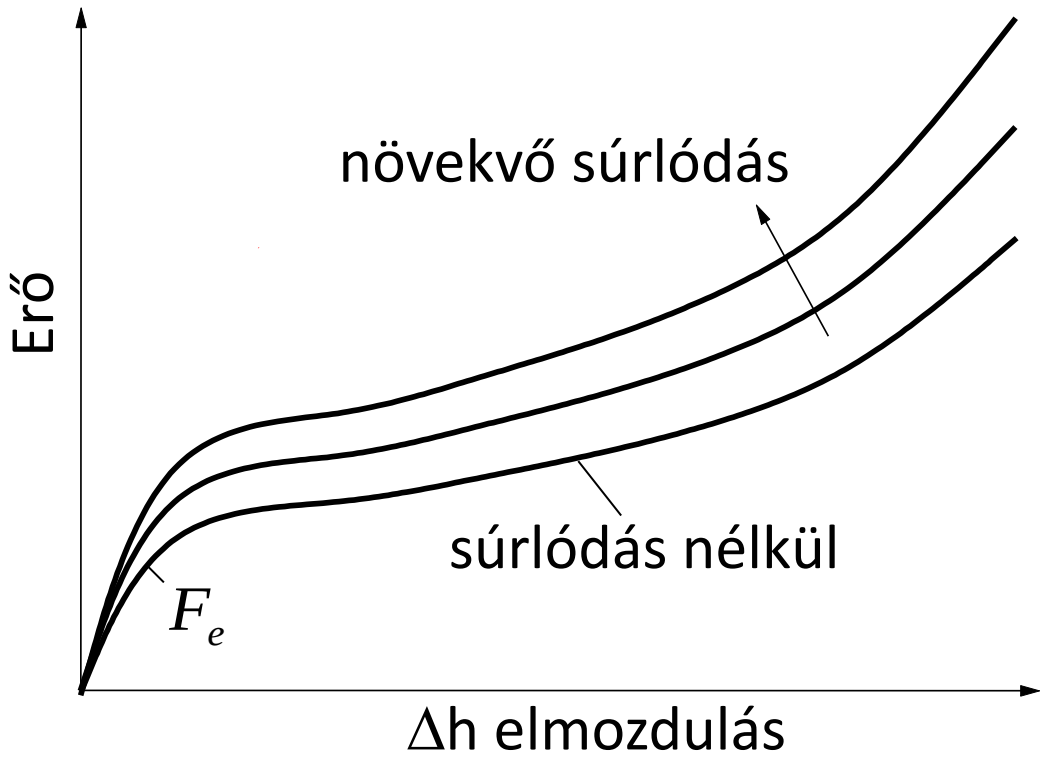
Különböző anyagok mechanikai tulajdonságai



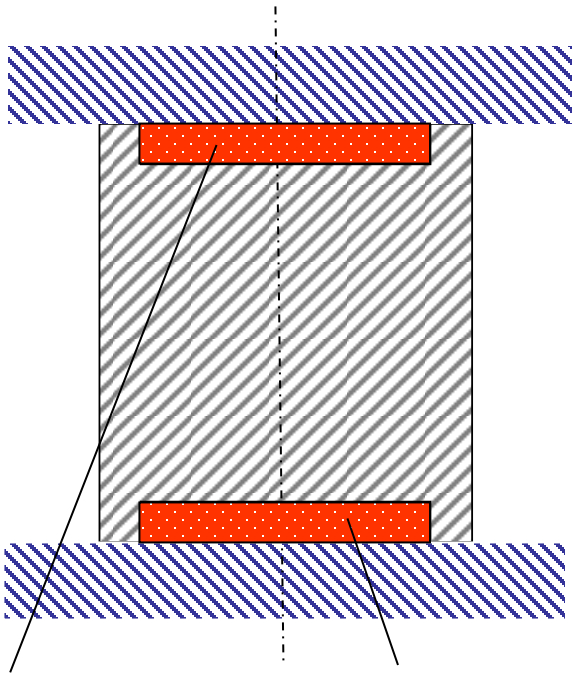
Forrás: Ashby

Nyomóvizsgálat





Ideális súrlódás



nagyviszkozitású kenőanyag

Alakváltozások

$$\varepsilon = \frac{h - h_0}{h_0}, \quad \varphi = \ln \frac{h}{h_0}$$

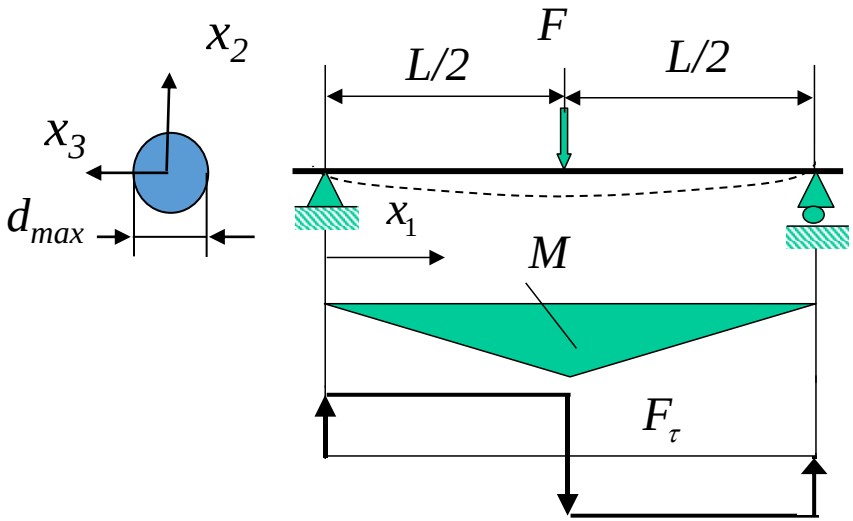
$$\bar{\dot{\varepsilon}} = \left| \frac{v_{zöm}}{h} \right|$$

Feszültségek

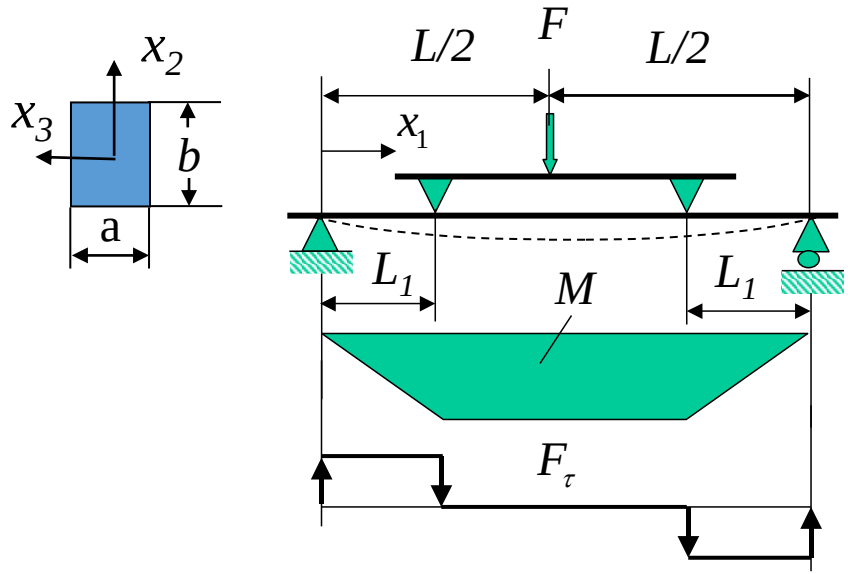
$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{4F}{d^2 \pi}, \quad \sigma^M = \frac{F}{S_0} = \frac{4F}{d_0^2 \pi}$$

Nyomó folyáshatár: $R_e = \frac{F_e}{S_0}$

Hajlítóvizsgálat



3 pontos hajlítás



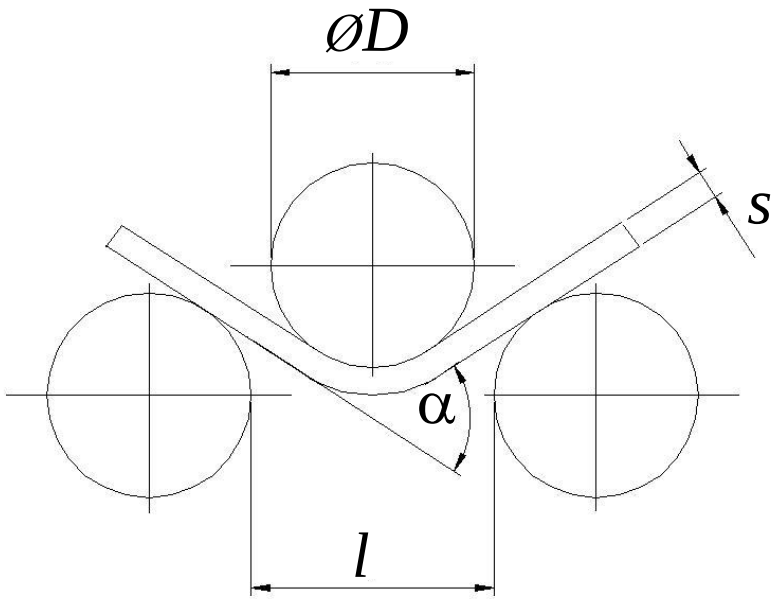
4 pontos hajlítás

Hajlítószilárdság: $R_{mh} = \frac{M}{K}$

M=maximális hajlítónyomaték,
K=keresztmetszeti tényező

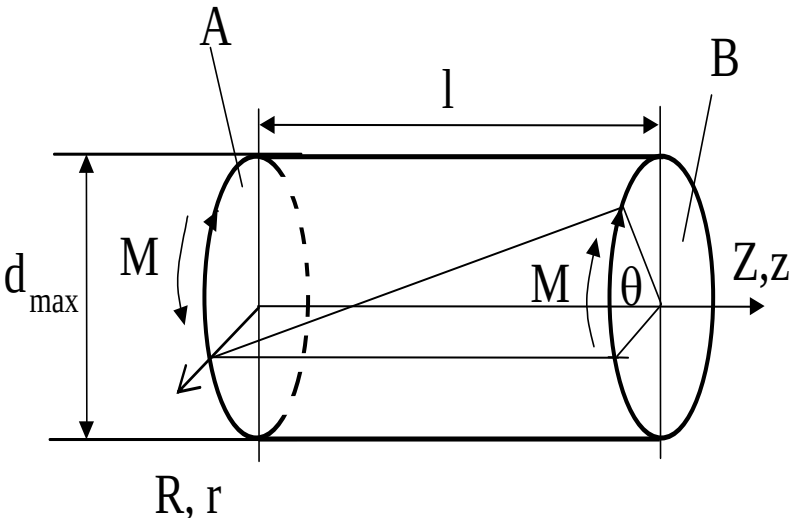
$$M = \frac{FL}{4} \qquad K = \frac{d^3\pi}{32} \text{ (kör)} \qquad K = \frac{ab^2}{6} \text{ (téglalap)}$$

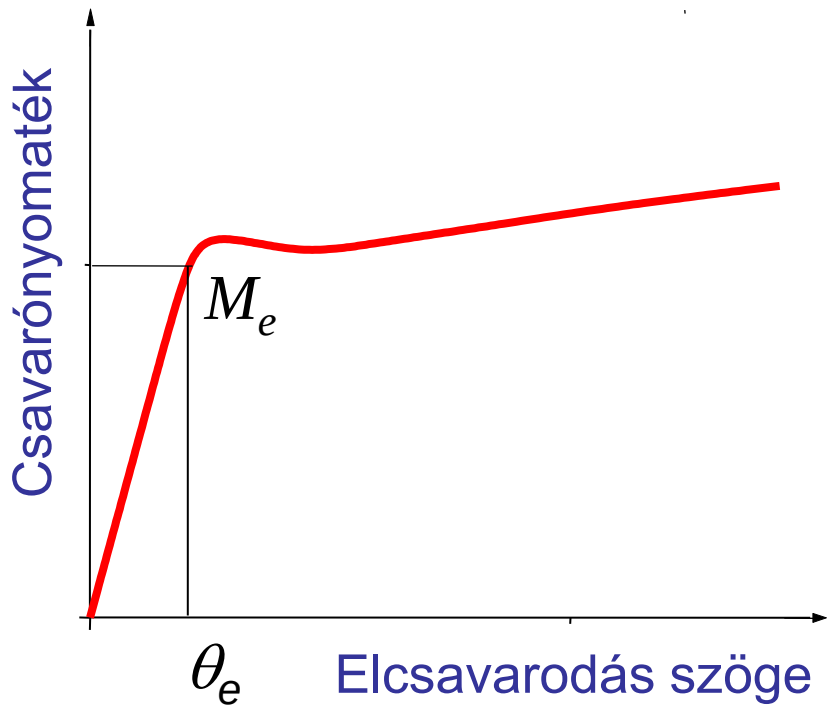
Lemezanyag alakíthatóságának vizsgálata



A hajlítást a lemez repedéséig végezzük, és mérjük a töréshez tartozó α hajlítási szöget.

Csavaróvizsgálat





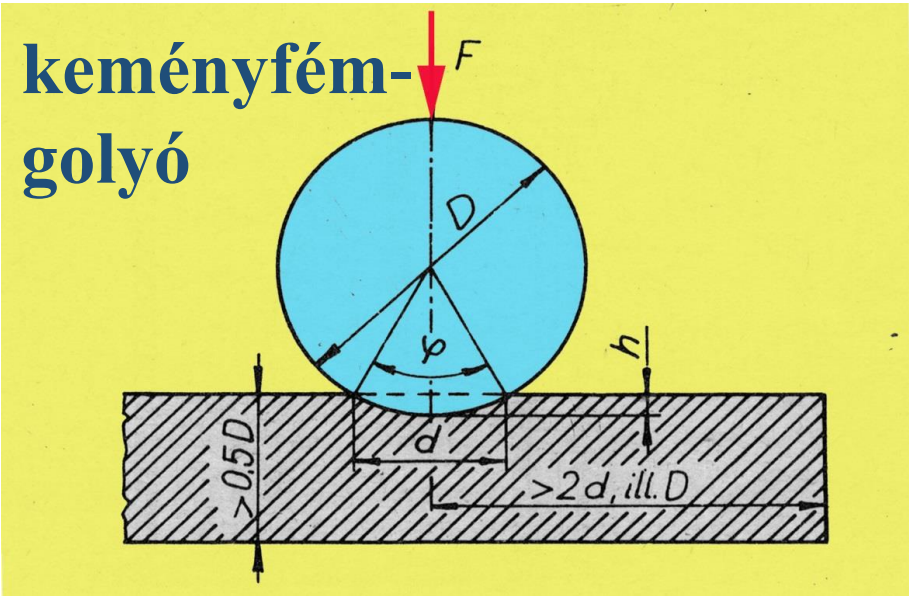
Csavaró folyáshatár $R_e = \dfrac{2\sqrt{3}M_e}{\pi r_{\max}^3}$

Keménységmérés

- **A keménység fogalma:**
  - A vizsgált anyag ellenállása az adott geometriájú szúrószerszám behatolásával szemben.
- **A keménység kapcsolata más tulajdonságokkal:**
  - Keménységi adatokból becsülhetők a szilárdsági tulajdonságok.
- **A keménységmérés kivitelezése:**
  - Alakváltozás létrehozásával
  - Fizikai hatások alkalmazásával

Brinell - keménységmérés

$$HB = \frac{0.102F}{A} = \frac{0.102F}{D\pi h} = \frac{0.204F}{\pi D\left(D - \sqrt{(D^2 - d^2)}\right)}$$



F – terhelő erő (N)

A – lenyomat felület (mm^2)

D – golyóátmérő (mm)

d – lenyomat átmérő (mm)

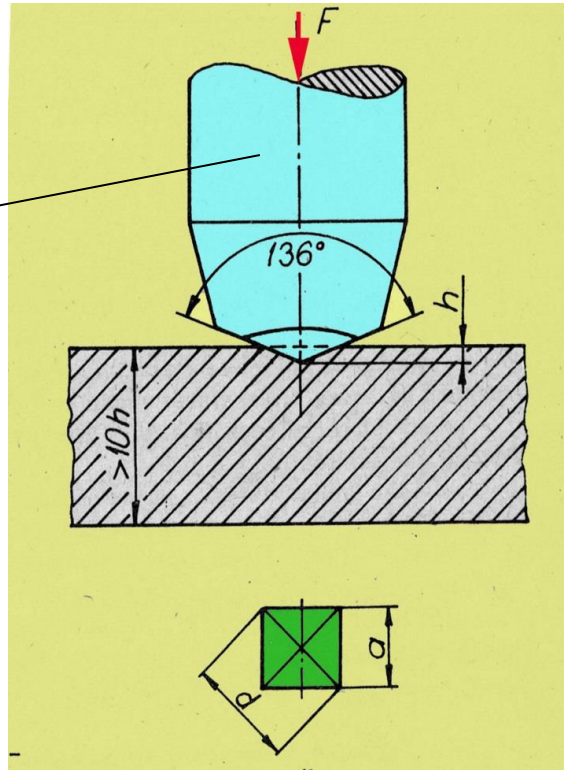
h – lenyomat mélység (mm)

Átlagos keménység értéket ad (inhomogén anyag vizsgálatánál előnyös).

Következtetni lehet az anyag szilárdságára. Öntöttvasak, színes- és könnyűfémek, lágyacélok mérésére alkalmazható.

Vickers - keménységmérés

gyémánt-
gúla



$$HV = \frac{0.102F}{A} = 0.189\frac{F}{d^2}$$

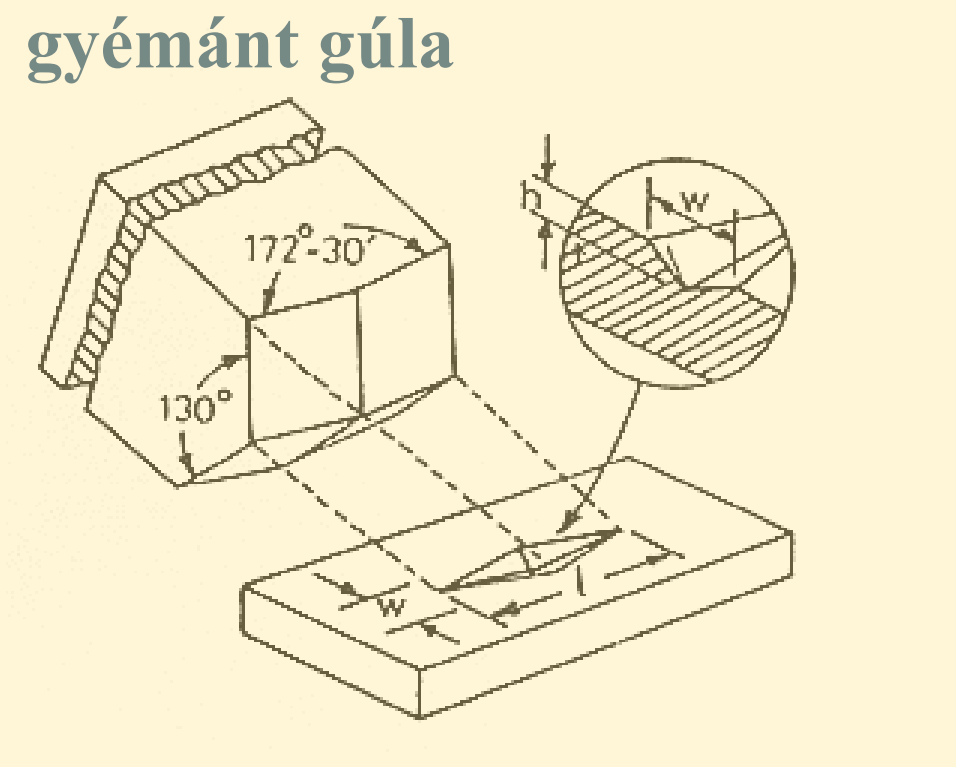
F – terhelő erő (N)

A – lenyomat felülete (mm^2)

d – lenyomat átlója (mm)

Lokális keménység pontos meghatározására, tetszőleges anyagminőség laboratóriumi vizsgálatára alkalmas. A kis terhelésű és mikro-Vickers eljárás vékony lemezek, rétegek és szövetelemek vizsgálatára használható.

Knoop - keménységmérés



$$HK = \frac{0{,}102F}{A} = \frac{1{,}14487F}{l^2}$$

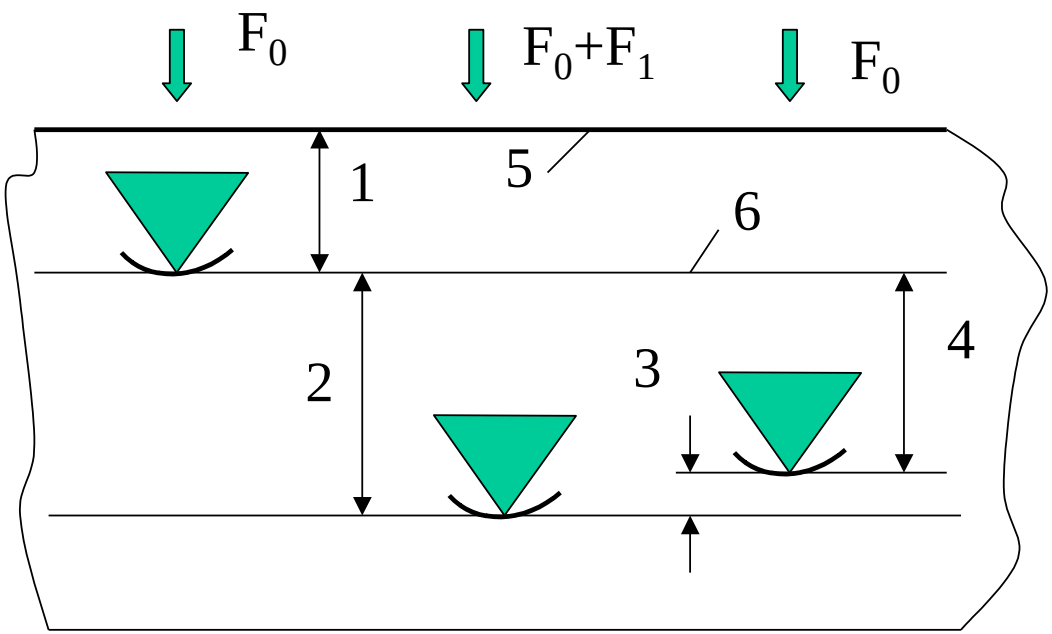
F – terhelő erő (N)

A – lenyomat felület (mm^2)

l – a lenyomat hosszabbik átlója (mm)

Pontos eljárás. Hasonló a Vickers-eljáráshoz. Fémek és nagyon rideg anyagok (üveg, műszaki kerámiák) vizsgálatára alkalmas.

Rockwell - keménységmérés



1 - a lenyomat mélysége az F_0 előterhelésnél

2 - a lenyomat mélysége az $F_0 + F_1$ terhelésnél

3 - a rugalmas visszarugózás az F_1 főterhelés levétele után

4 - a maradó lenyomat *h* mélysége

5 - a mintadarab felülete

6 - a mérés referenciasíkja

Rockwell - eljárások

Jel	Szúrószerszám	Előterhelés	Főterhelés	Keménység
HRA	▽ 120˚	98,07 N	490,3 N	100-h/0,002
HRB	● 1,5875 mm	98,07 N	882,6 N	130-h/0,002
HRC	▽ 120˚	98,07 N	1373 N	100-h/0,002
HRH	● 3,175 mm	98,07 N	490,3 N	130-h/0,002
…	…	…	…	…
HR15N	▽ 120˚	29,42 N	117,7 N	100-h/0,001
HR45T	● 1,5875 mm	29,42 N	411,9 N	100-h/0,001

Gyors, egyszerű, de kevésbé pontos, minden anyagminőségre és geometriai formára.

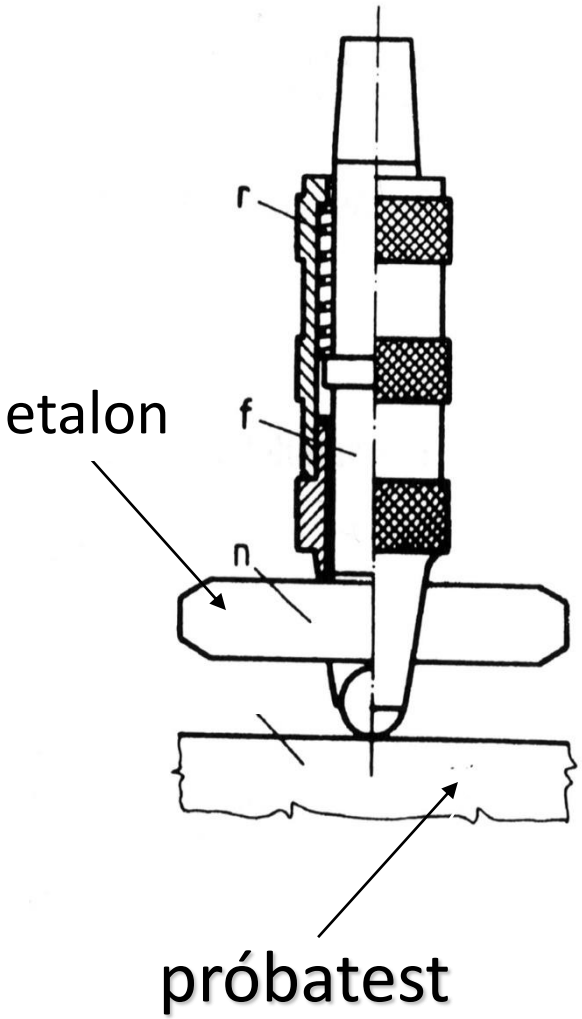
▽ - gyémántkúp ● - acél- vagy keményfém golyó

Dinamikus keménységmérő eljárások

- **Gyors, lökésszerű erőhatással végzett mérések**

- **Kivitelezés**
  - szúrószerszámmal lenyomatot mérve
  - rugalmas visszapattanást mérve

Mérés Poldi - kalapáccsal



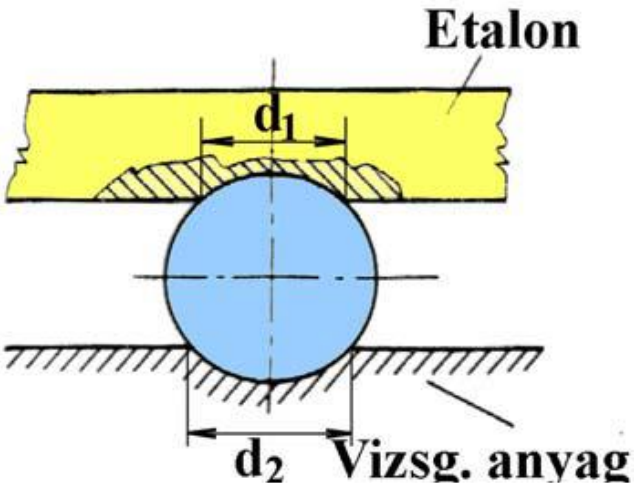
$$\frac{HB_m}{HB_x} = \left(\frac{d_x}{d_m}\right)^2$$

HB_m – az etalon keménysége

HB_x – a próbatest keménysége

d_m – a lenyomat átmérője a mintán

d_x – a lenyomat átmérője az etalonon



Eljárások a rugalmas visszahatás alapján

- **Mérés elve**

A vizsgált tárgy felületére adott energiával ráejtett kalapács vagy golyó vissza pattanásának magassága arányos a tárgy keménységével.

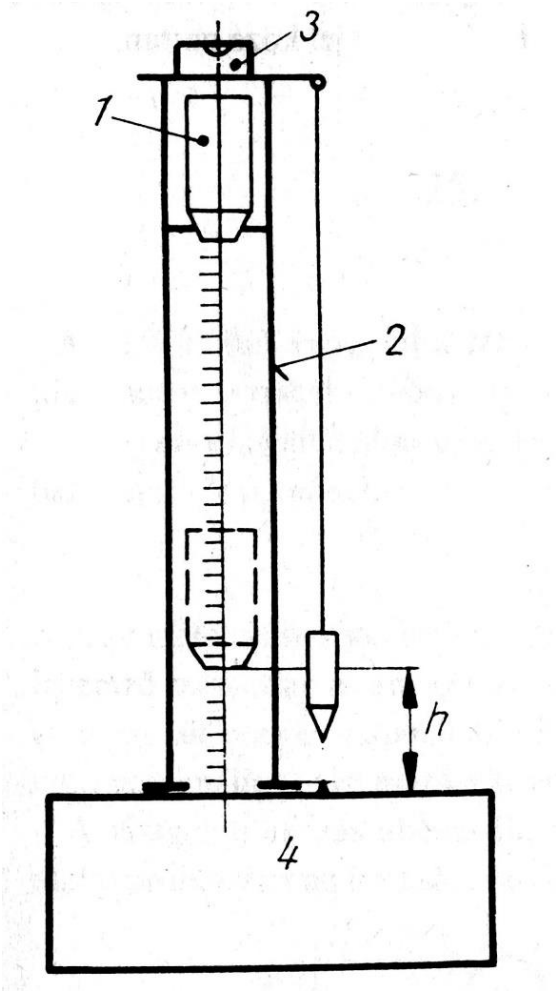
- **Berendezések**

– Szkleroszkóp

– Duroszkóp

Szkleroszkóp

1. Ejtősúly (gyémántvéggel)
2. Üvegcső
3. Libella (vízmérték)
4. Mérendő tárgy



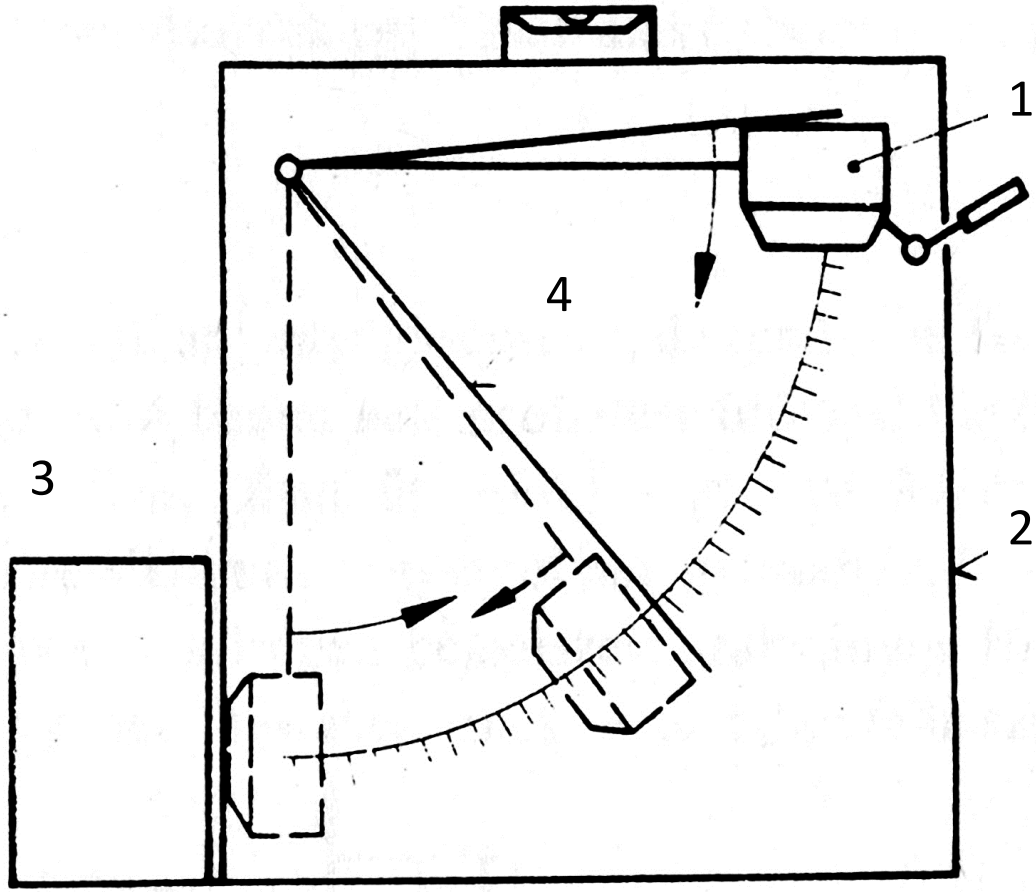
Roncsolásmentes, egyszerű és gyors módszer.

A mérendő tárgy tömege befolyásolja a mérési eredményt:
kis tömeg → rezgések → kisebb visszapattanás.

Szkleroszkóp

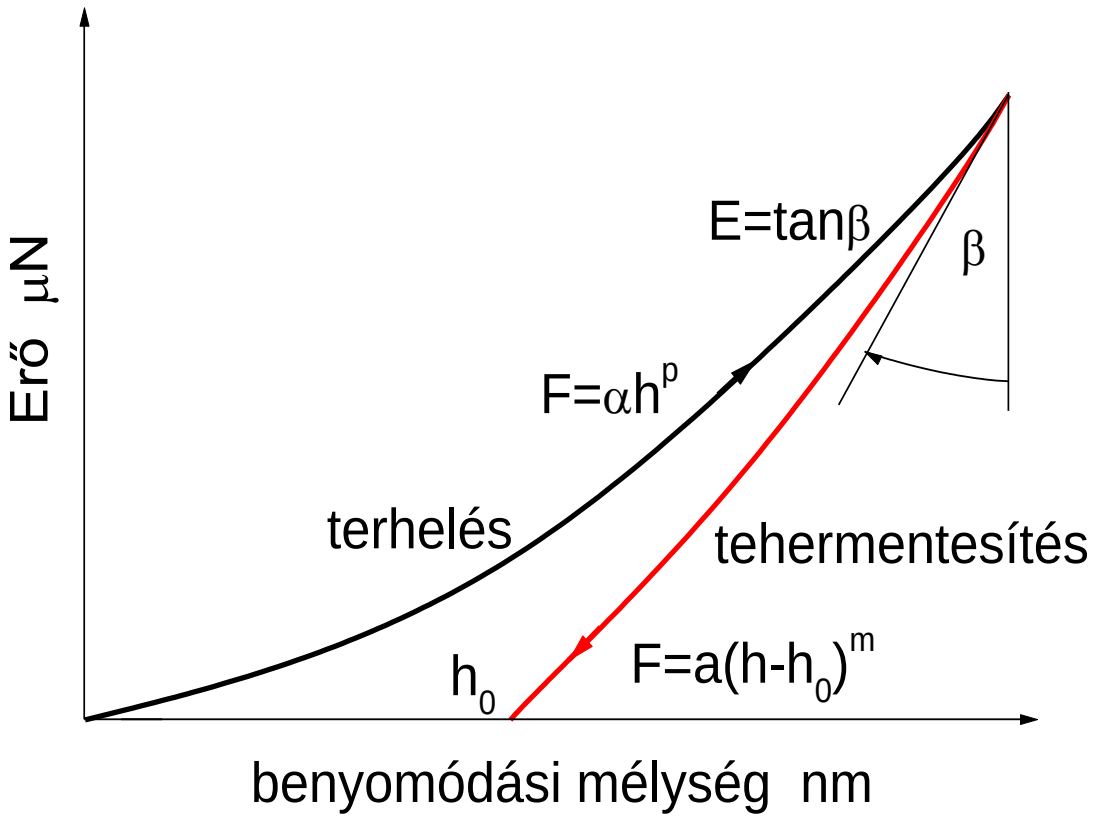
Duroszkóp

1. Mérőkalapács
2. Doboz
3. Mérendő tárgy
4. Mutató



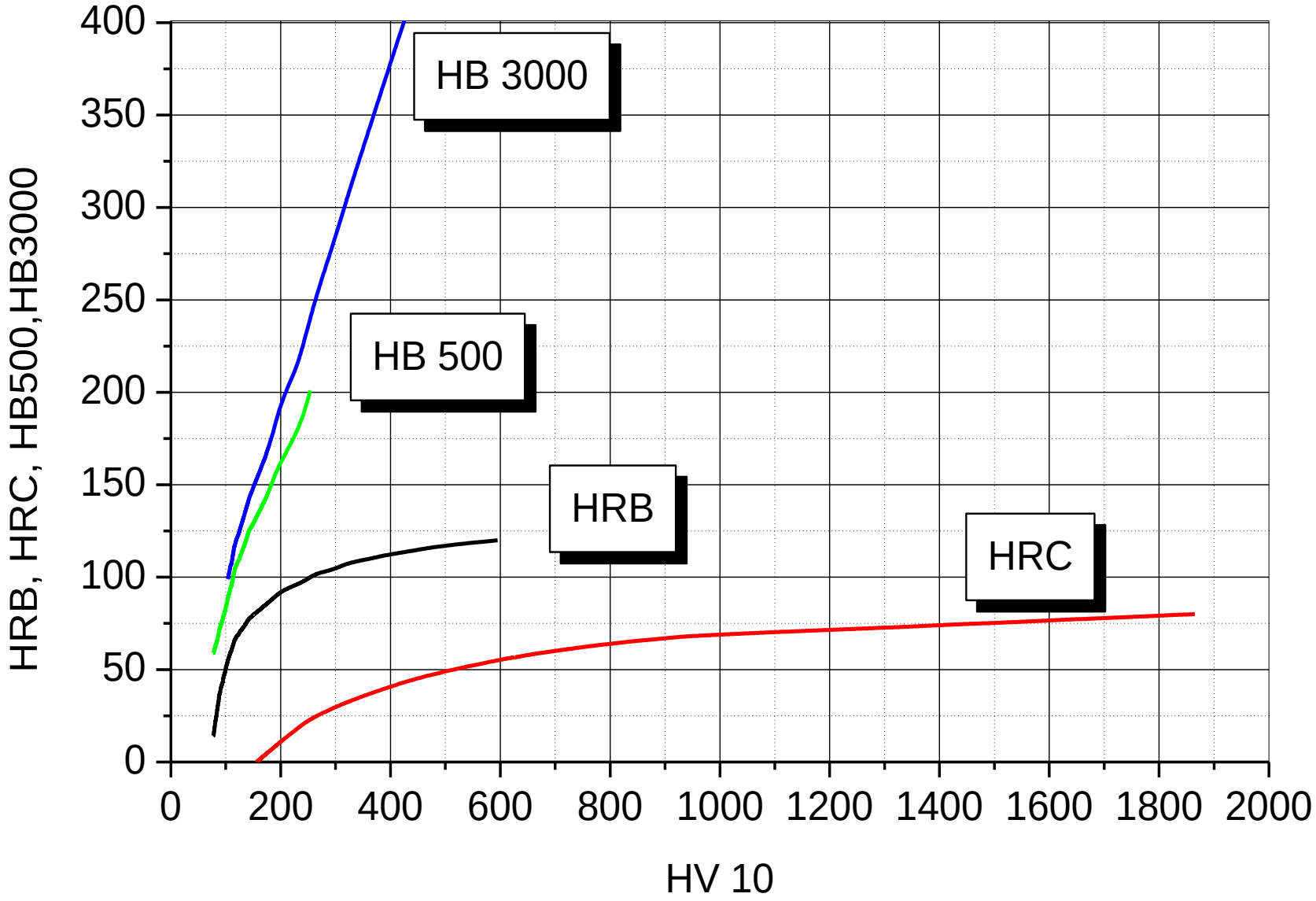
A tömeg és felület minősége befolyásolja.

Erő - benyomódás görbe felvétele



Vékony rétegek mérésére

Keménység konverzió



Fogalmak

- Rugalmas alakváltozás
- Képlékeny alakváltozás
- Mérnöki / valódi feszültség
- Mérnöki / valódi alakváltozás
- Folyáshatár, egyezményes folyáshatár
- Szakítószilárdság
- Kontrakció
- Fajlagos törési munka
- Szívósság
- Rugalmassági modulusz
- Nyíró rugalmassági modulusz
- Poisson-tényező
- Térfogati rugalmassági modulusz
- Statikus keménység
- Brinell-keménység
- Vickers-keménység
- Knopp-keménység
- Rockwell-keménység
- Dinamikus keménység
- Műszerezett keménységmérés

Angol nyelvű irodalom

William D. Callister, Jr.

Materials Science and Engineering
An Introduction, 7th edition, 2006

Chapter 6
Mechanical Properties of Metals
131-173 pp.