



Anyagtudomány és Technológia Tanszék



MECHANIKAI TULAJDONSÁGOK ÉS VIZSGÁLATUK

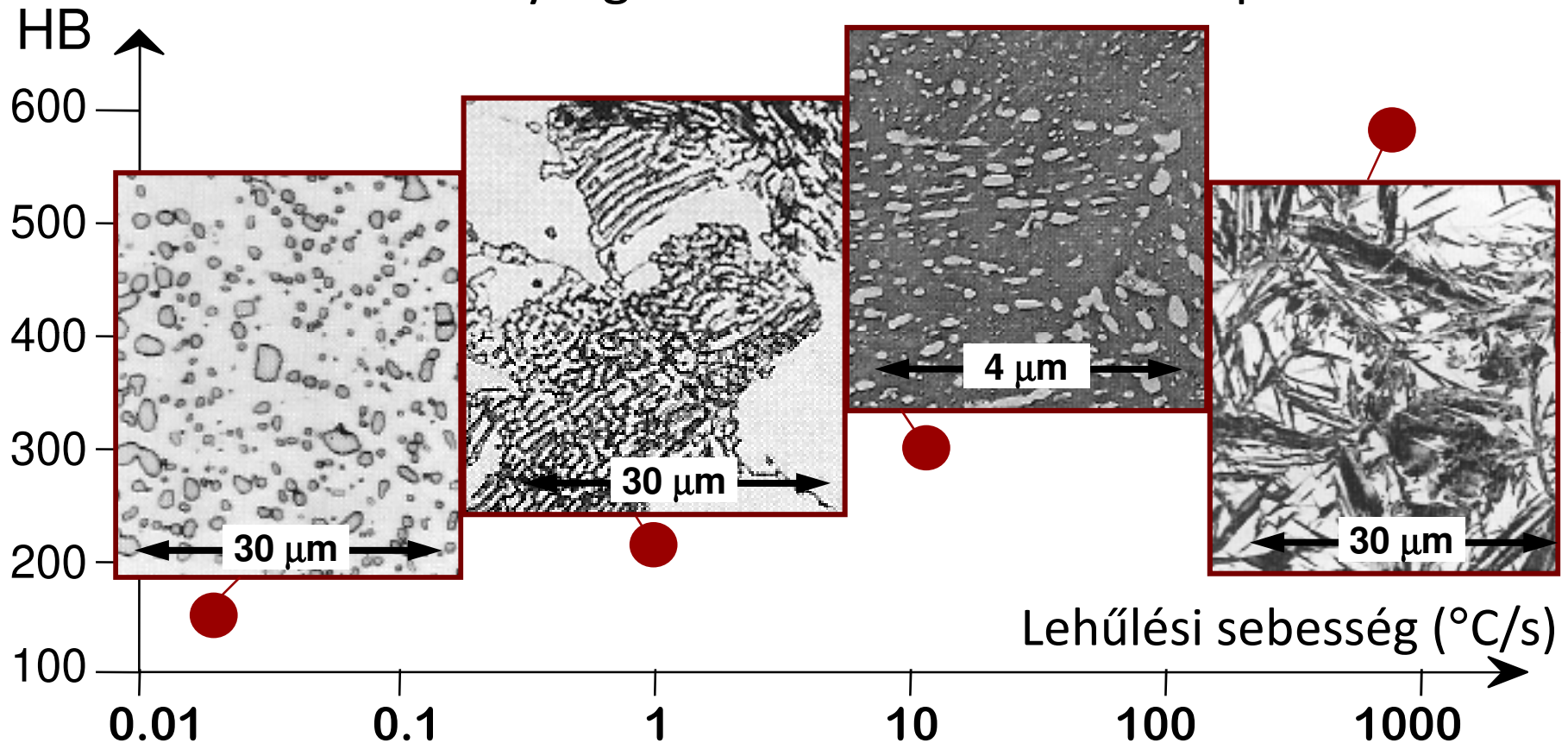
Dr. Berecz Tibor
berecz.tibor@gpk.bme.hu

Anyagok az energetikában
BMEGEMTBEA1
2021/2022/1

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

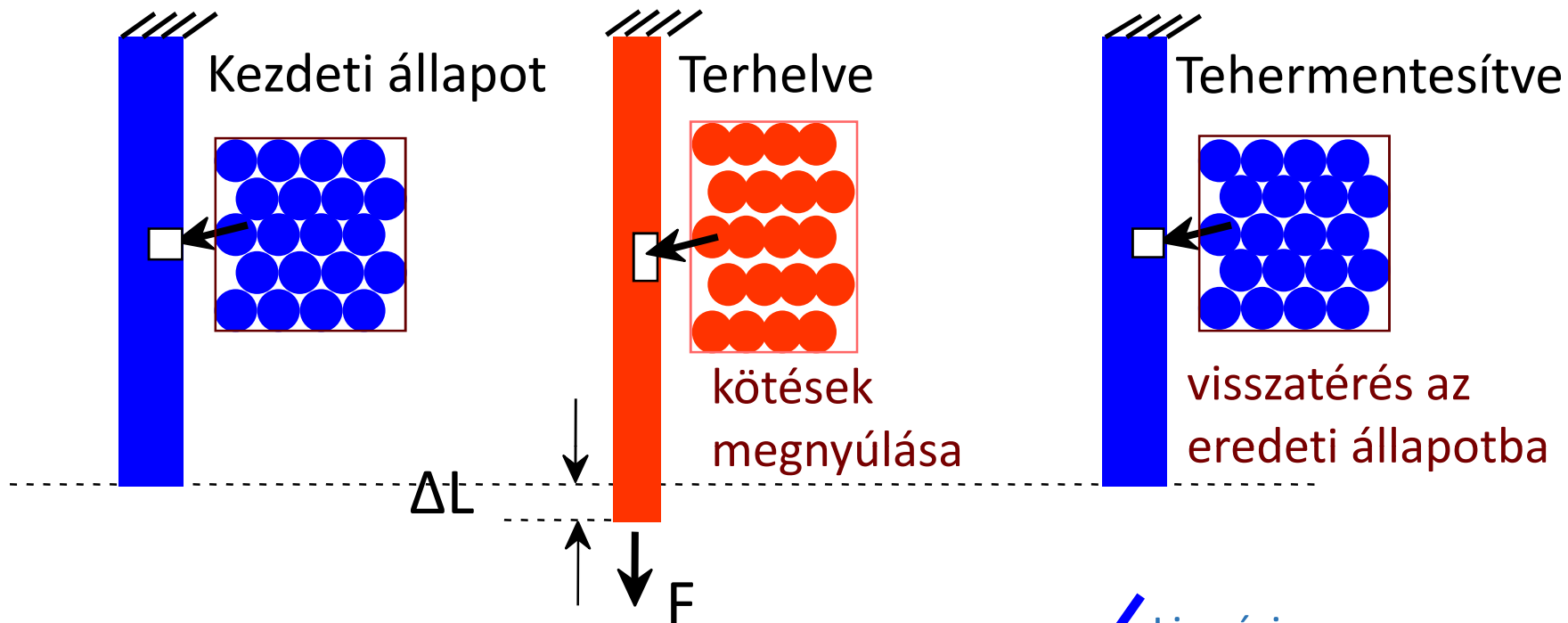
- az alapvető anyagi tulajdonságok csoportosítását;
- a rugalmas és a képlékeny alakváltozás jellemzőit;
- a valódi és a mérnöki rendszer feszültség és alakváltozás fogalmát;
- a rugalmas test anyagjellemzőit;
- a szakítóvizsgálattal meghatározható alakváltozási, feszültségi és szívóssági mérőszámokat;

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



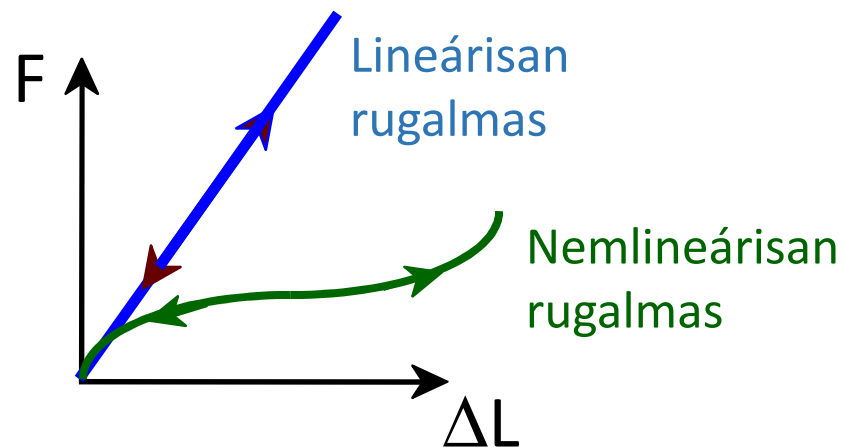
- **Folyamat** is megváltoztathatja a **mikroszerkezetet**;
 Pl.: Szerkezetváltozás a lehülési sebesség hatására

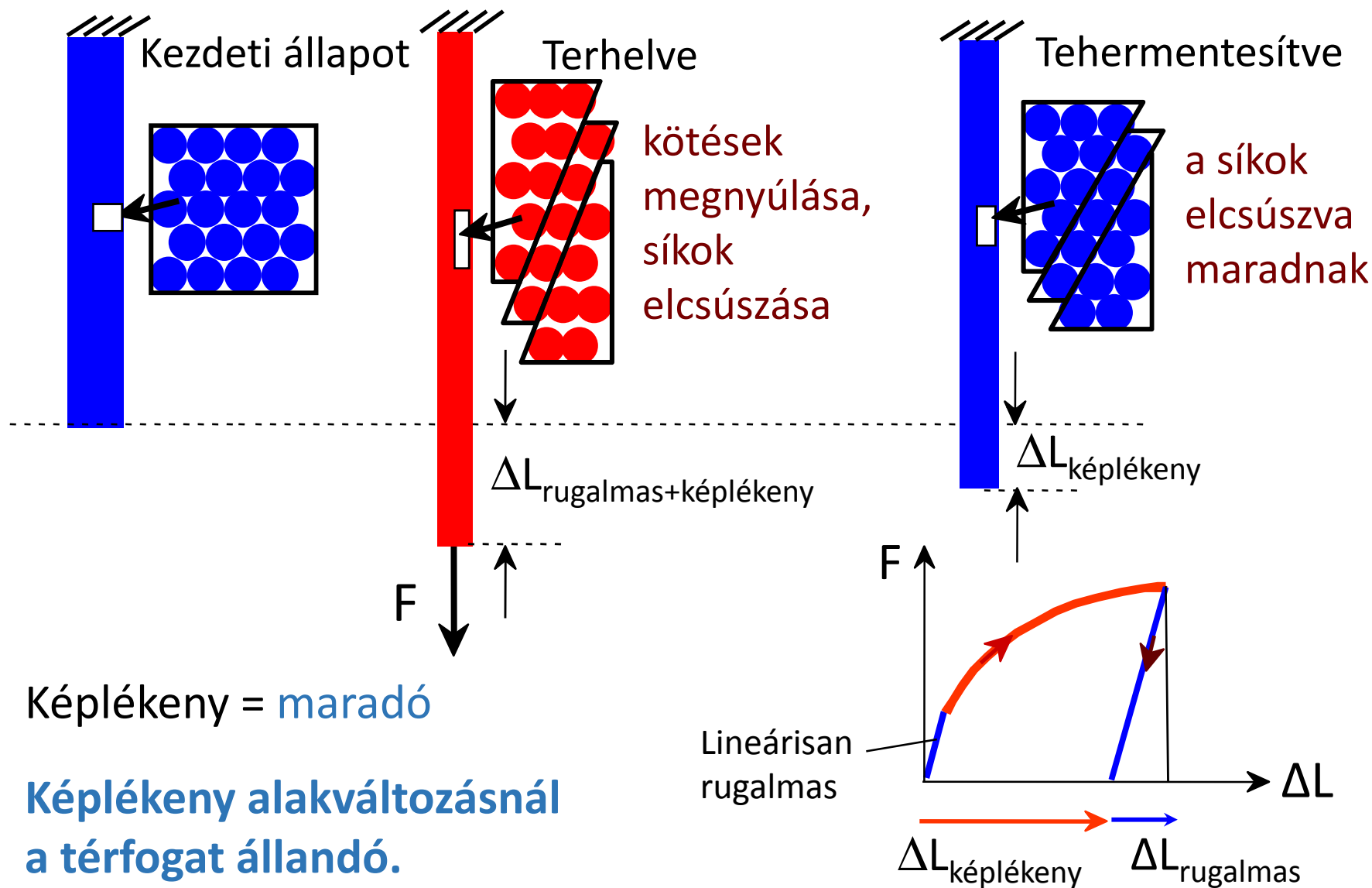
- **Mechanikai** (terhelés és alakváltozás hatása)
- Elektromos (elektromos tér hatása)
- Hőfizikai (hőmérséklet-mező hatása)
- Mágneses (mágneses tér hatása)
- Optikai (elektromágneses tér hatása)
- Károsodási (kémiai reaktivitás hatása)



Rugalmas = reverzibilis

Rugalmas alakváltozásnál a térfogat nem állandó.





Alakváltozás

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

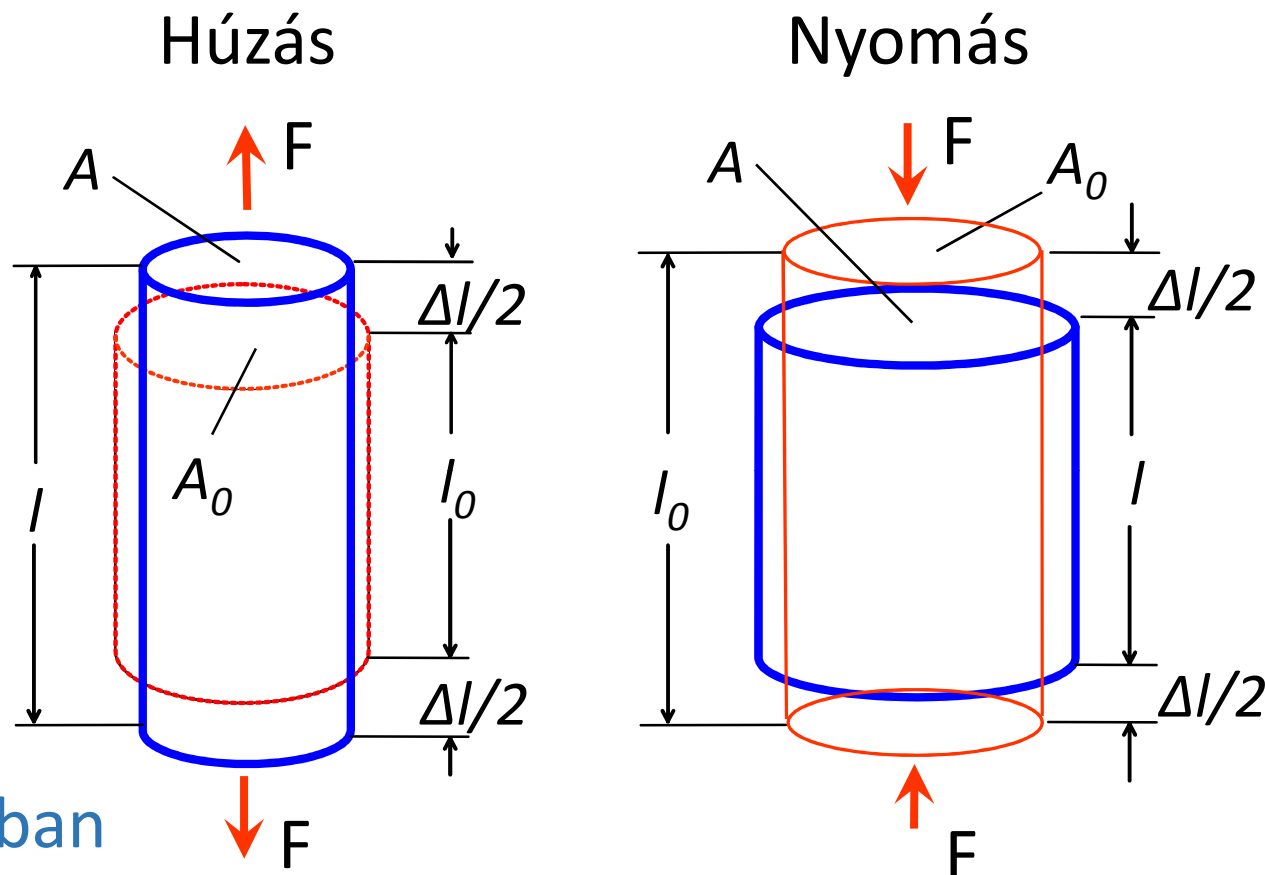
Feszültség

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

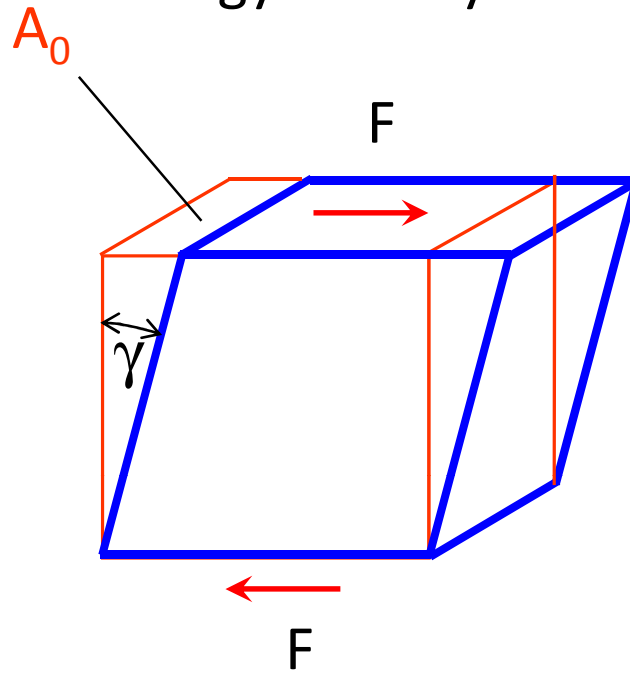
Rugalmas állapotban

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

Hooke-törvény, E: rugalmassági vagy Young-modulus



Egyszerű nyírás



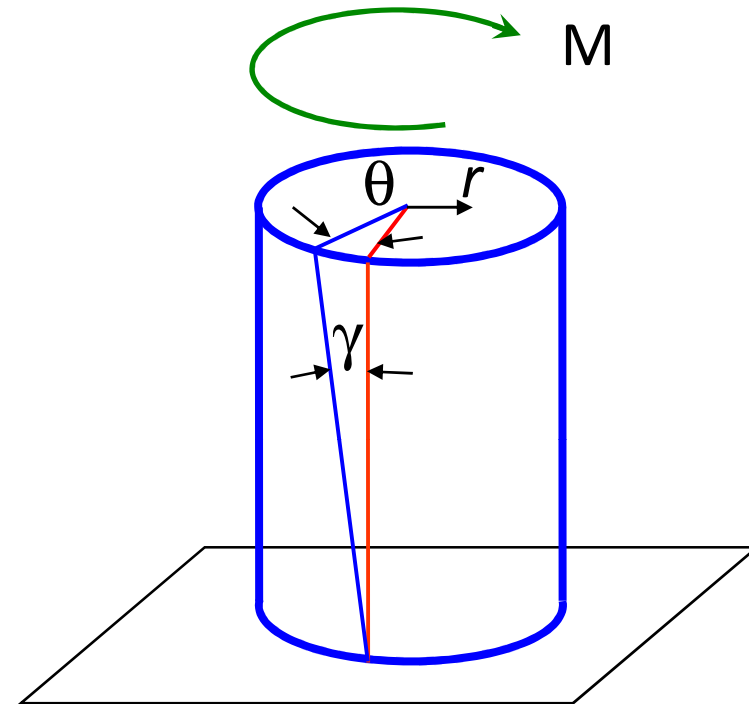
Rugalmas állapotban

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

$$\tau = G\gamma$$

G: csúsztató rugalmassági modulus

Csavarás

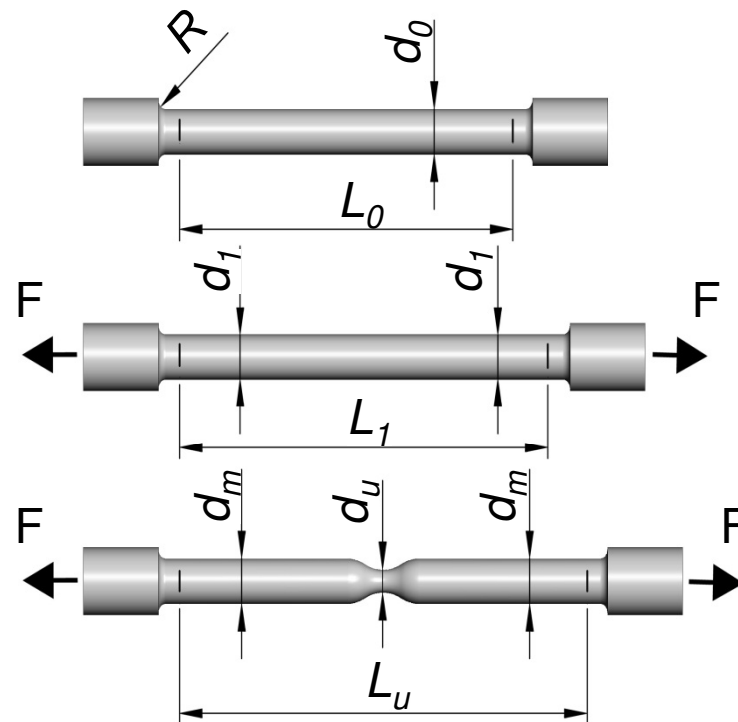
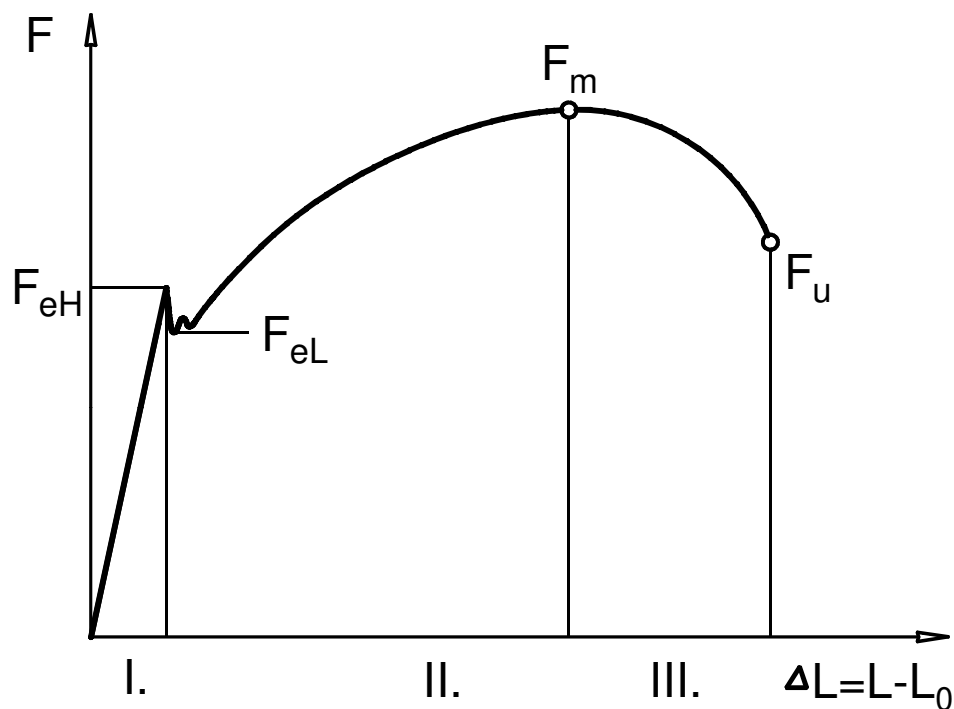


$$\tau = \frac{M}{I_p} r$$

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

I_p : poláris inercianyomaték

Szakítódiagram



- I. Rugalmas alakváltozás
- II. Egyenletes alakváltozás
- III. Kontrakció

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

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

- Mérnöki rendszer
- Valódi rendszer
- Kapcsolat

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

$$\varepsilon = \frac{S_0}{S} - 1$$

Alakváltozás

Térfogatállandóság
alapján

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0}$$

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S}$$

$$\varphi = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln l - \ln l_0 = \ln \frac{l}{l_0}$$

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon)$$

$$\sigma_m = \frac{F}{S_0}$$

Feszültség

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

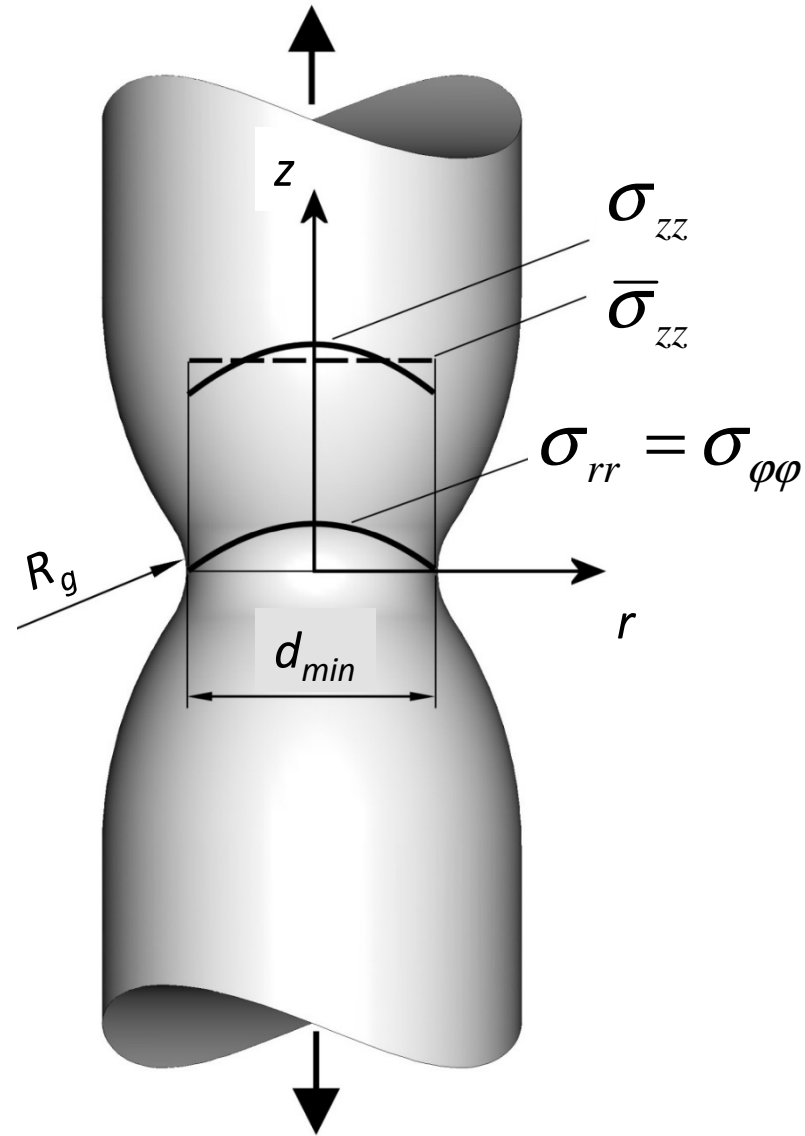
Vagyis kis alakváltozások
esetén: $\phi \approx \varepsilon$.

$$W_c = \int_0^{\varepsilon_u} \sigma_m d\varepsilon$$

Fajlagos törési
munka (J/cm³)

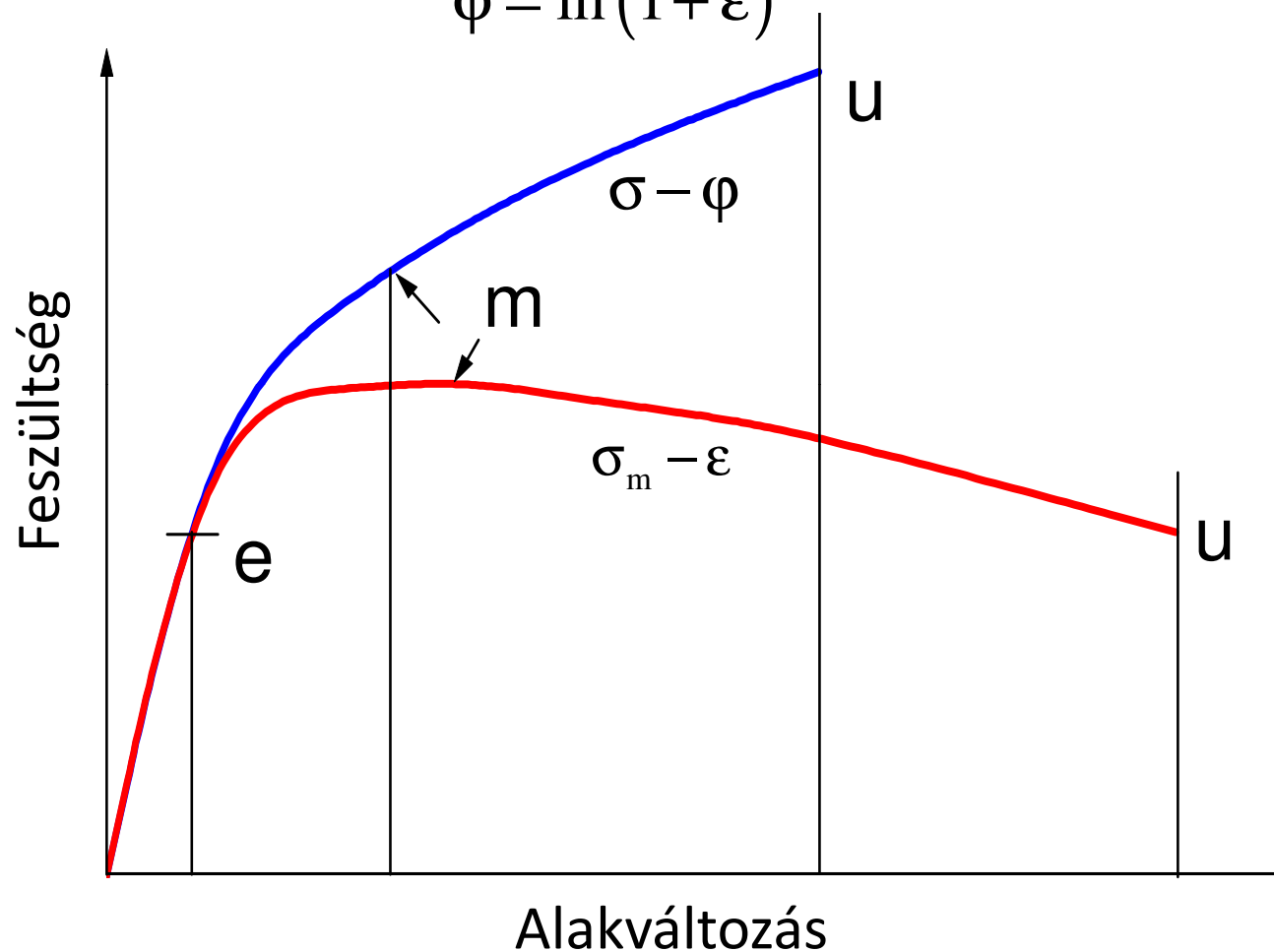
$$W_c = \int_0^{\varphi_u} \sigma d\varphi$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} (1 + \varepsilon) = \sigma_m (1 + \varepsilon)$$

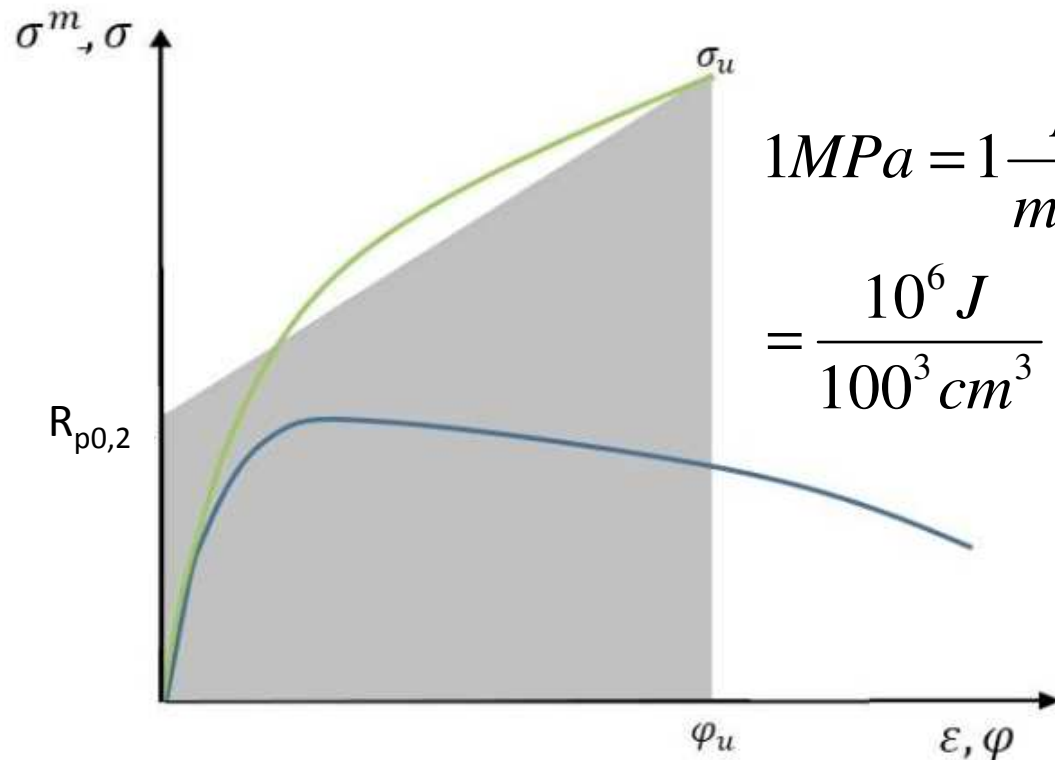


$$F = \sigma S = \sigma_m S_0 \Rightarrow \sigma = \sigma_m (1 + \varepsilon)$$

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



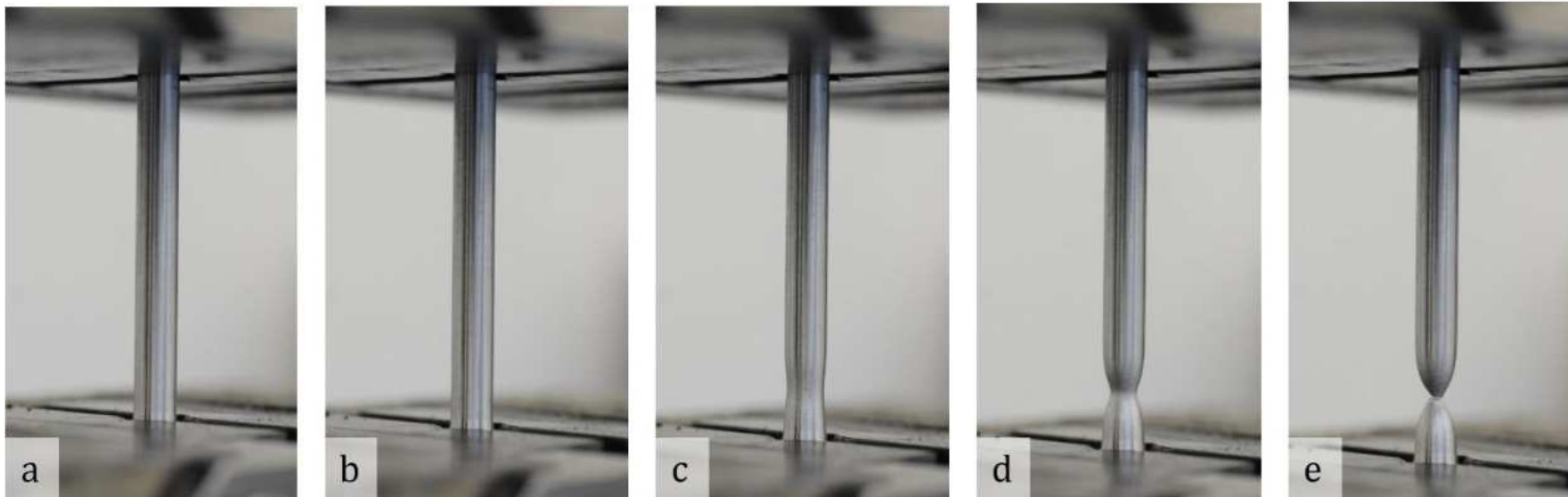
$$W_c \approx \frac{R_{p0,2} + \sigma_u}{2} \varphi_u; \left[\frac{J}{cm^3} \right]$$



$$1MPa = 1 \frac{N}{mm^2} = \frac{N}{10^{-6} m^2} = \frac{10^6 Nm}{m^3} =$$

$$= \frac{10^6 J}{100^3 cm^3} = 1 \frac{J}{cm^3}$$

A fajlagos törésmunka trapézformulával való számításának grafikus értelmezése.



7. ábra. Egy alumínium próbatest szakítóvizsgálatának pillanatképei: e pontban (a), m pontban (b), m pont után, ahol már megfigyelhető a kontrahálódott keresztmetszet (c), u pont előtt (d), u pontban, ahol már elszakadt a próbatest (e).

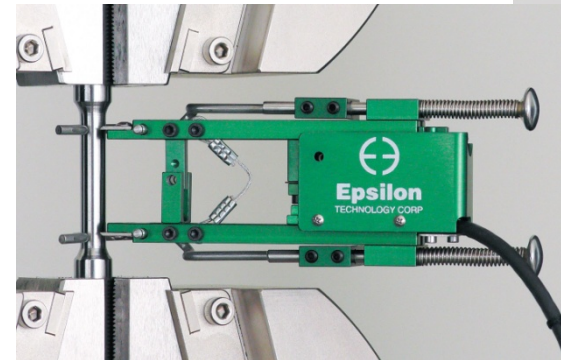
1. Erőmérés:

- mechanikus
- erőmérő cella (nyúlásmérő bélyeges, piezoelektromos)

2. Nyúlásmérés:

- keresztfej elmozdulás
- finomnyúlás mérés ->
- érintésmentes nyúlásmérés (lézer, videó-extenzométer)

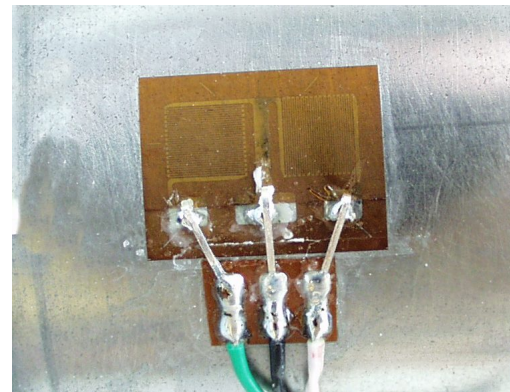
S cella
(húzásra/nyomásra) ->



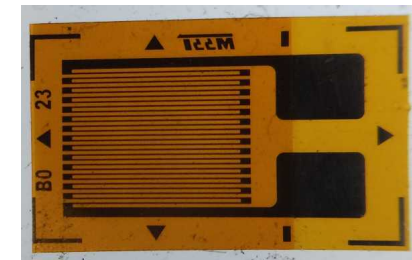
Nyomócella
(nyomásra) ->

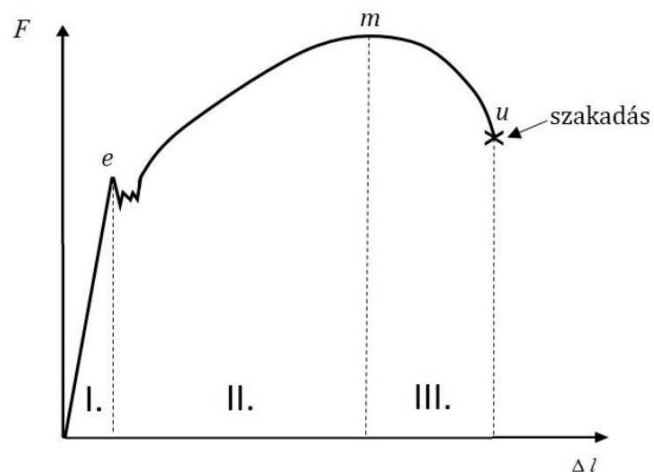


Nyúlásmérő bélyegek
(alul közepen és jobbra)



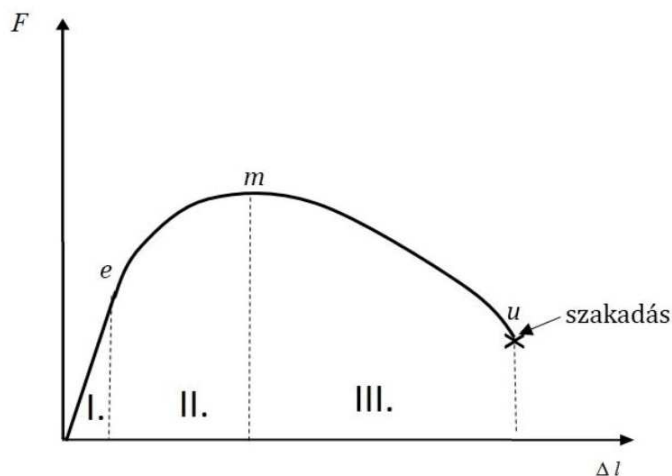
**Videó-
extenzométer**





TKK szerkezetű
fémekre (pl. Fe, Cr, Mo,
V, W) jellemző.

Egy lágyacélra jellemző szakítódiagram a jellemző szakaszok bejelölésével



FKK szerkezetű fémekre
(pl. Cu, Al) jellemző.

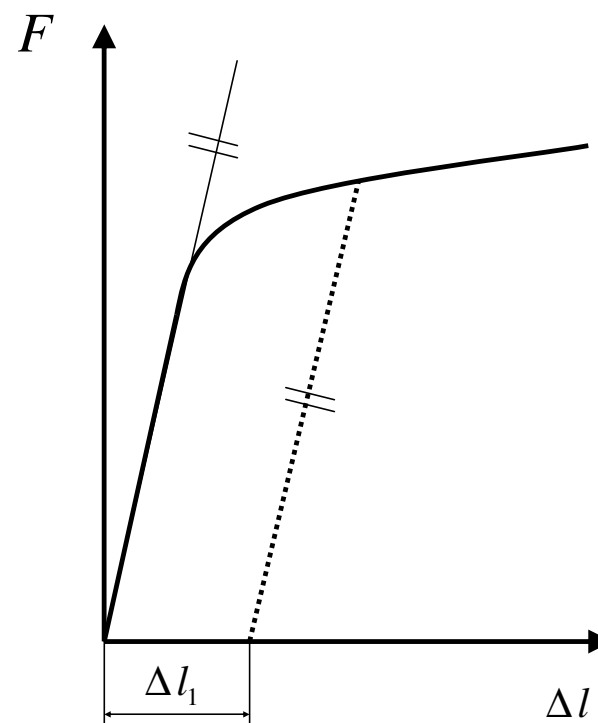
Egy alumíniumra jellemző szakítódiagram a jellemző szakaszok bejelölésével.

Az a feszültség, amelyhez terhelt állapotban a $p\%$ maradó alakváltozás (pl. 0,2%) tartozik.

$$R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{S_0} \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Nem arányos nyúlás:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_1}{l_0} = 0.2 \%$$

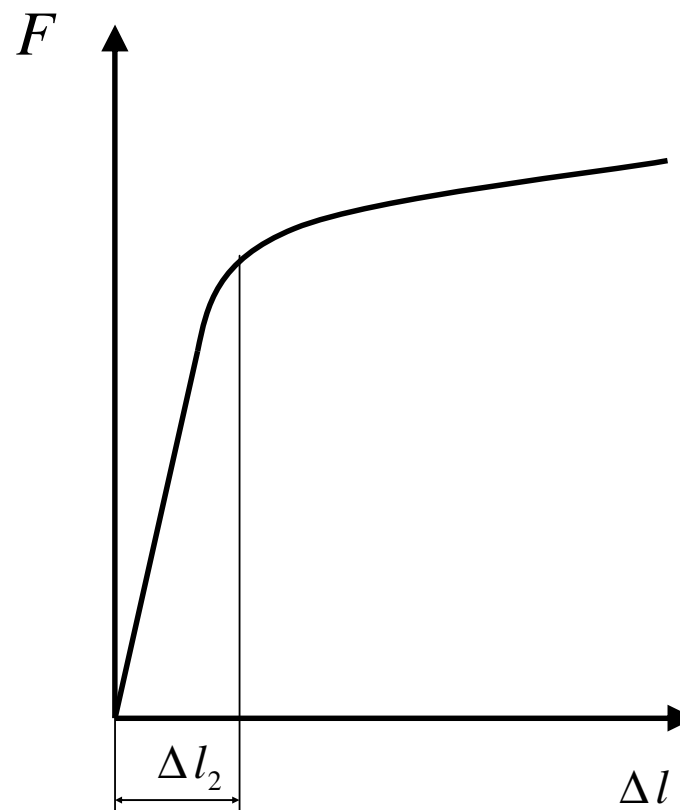


Az a feszültség, amely adott t nagyságú rugalmas és maradó együttes alakváltozáshoz tartozik.

$$R_{t0.5} = \frac{F_{t0.5}}{S_0} \quad \frac{N}{mm^2}$$

Teljes nyúlás:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_2}{l_0} = 0.5\%$$

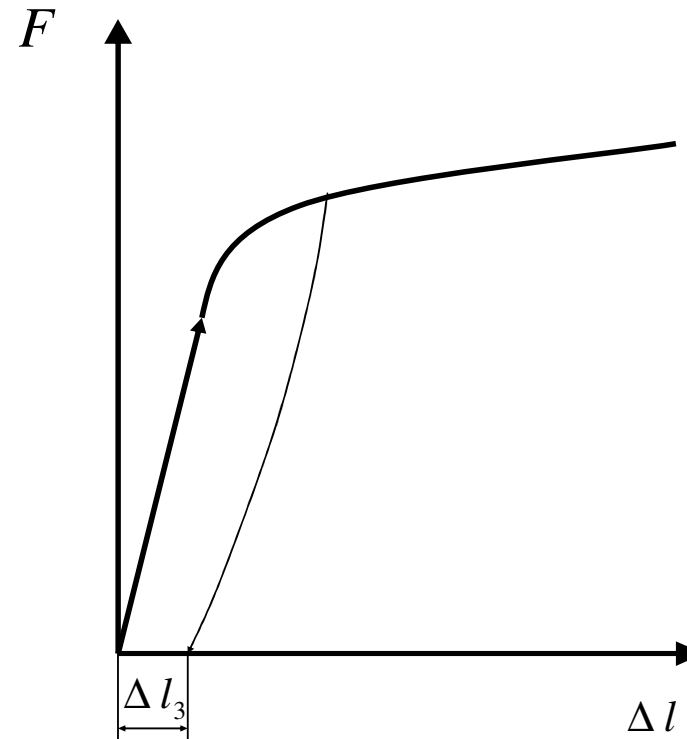


A próbatestet 10-12 másodpercig az előírt folyáshatárnak megfelelő terhelőerővel terheljük, majd a terhelés megszüntetése után ellenőrizni kell, hogy a maradó nyúlás értéke nem nagyobb-e, mint az előírt érték.

$$R_{r0.2} = \frac{F_{r0.2}}{S_0} \quad \frac{N}{mm^2}$$

Maradó nyúlás:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_3}{l_0} = 0.2\%$$



- Rugalmassági modulusz:
E (Young-modulus)

- Hooke - törvény:

$$\sigma = E \varepsilon$$

- Poisson - tényező, ν :

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

fémek: $\nu \sim 0,33$

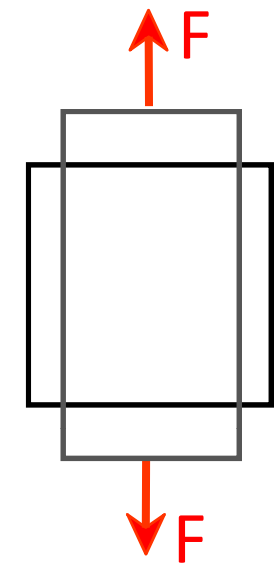
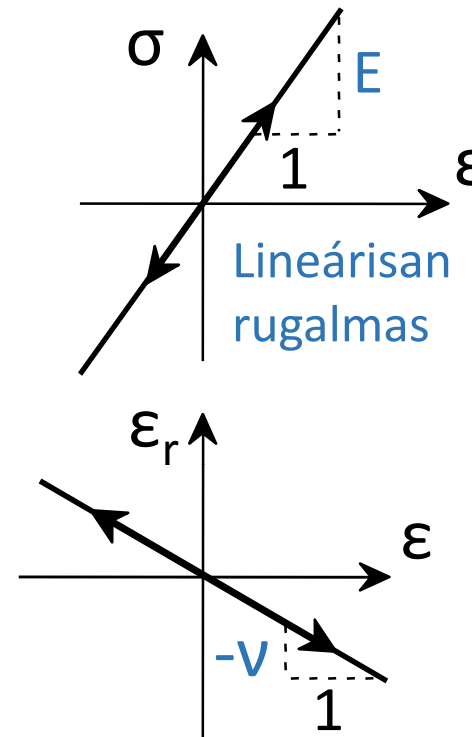
kerámiák : $\nu \sim 0,25$

polimerek : $\nu \sim 0,40$

Egységek:

E: (GPa) vagy (MPa)

ν : dimenzió nélküli



Egytengelyű igénybevétel

ε_r - radiális alakváltozás

$$E_{\text{kerámia}} > E_{\text{fém}} \gg E_{\text{polimer}}$$

- Csúsztató rugalmassági modulusz, G

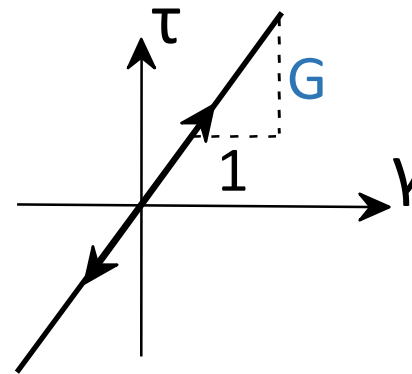
- Hooke - törvény:

$$\tau = G \gamma$$

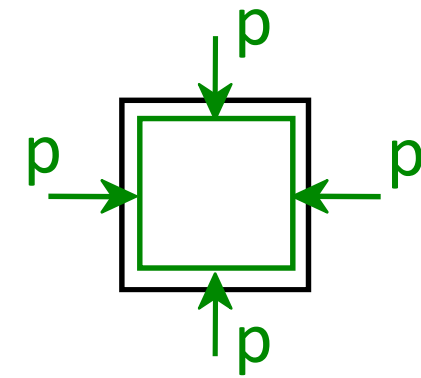
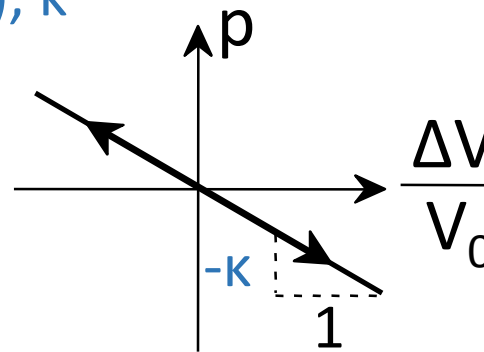
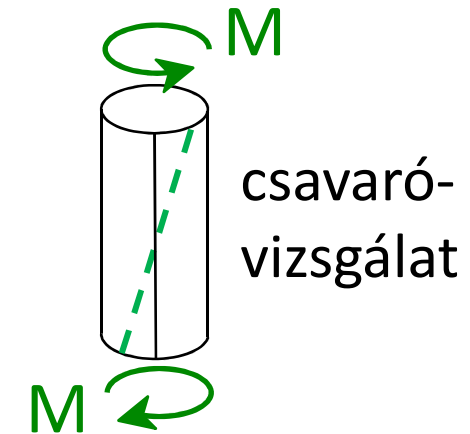
- Térfogati rugalmassági modulusz (kompresszibilitás), κ

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

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

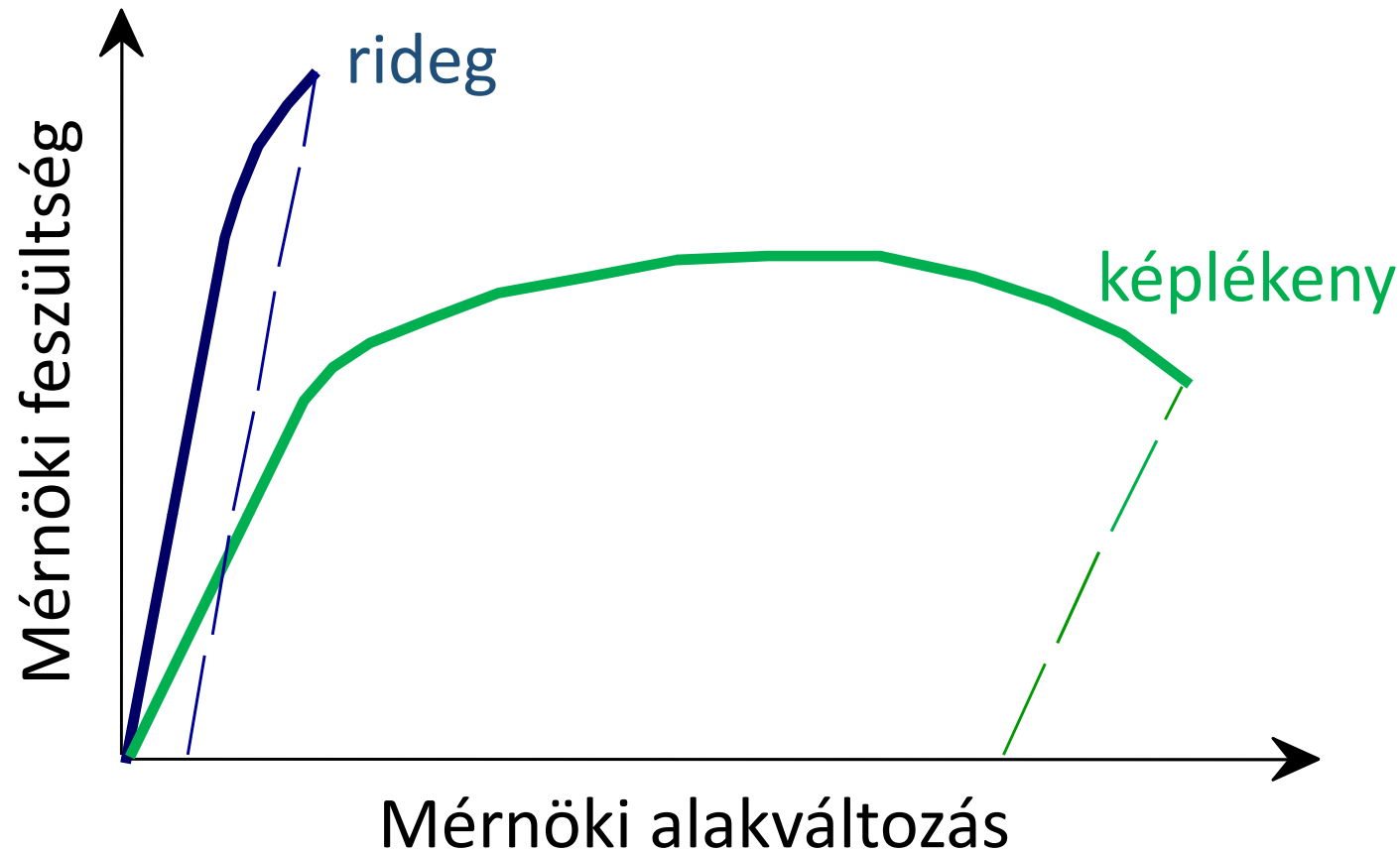


$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$



Hidrosztatikus nyomás alkalmazása

- kezdeti térfogat : V_0
- térfogat változás: ΔV



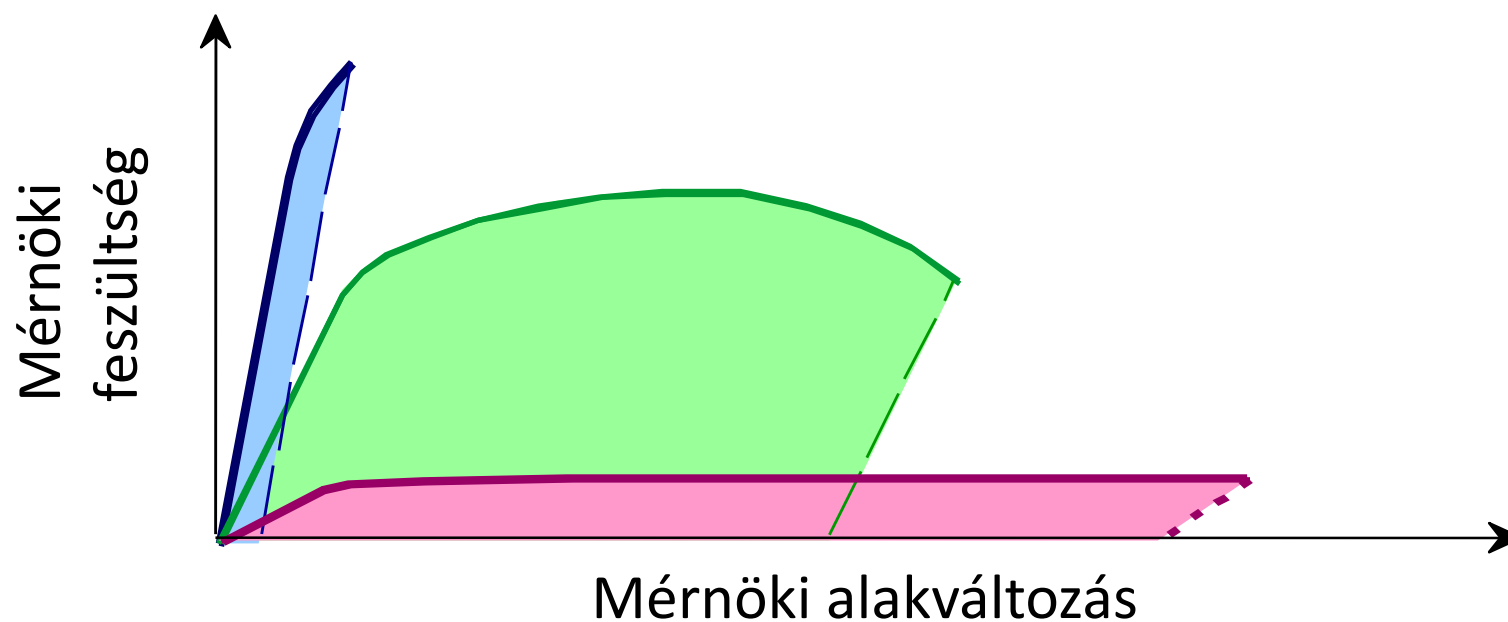
ha a **maradó** alakváltozás **közel nulla**, akkor **rideg**
 ha a **maradó** alakváltozás **jelentős**, akkor **képlékeny**

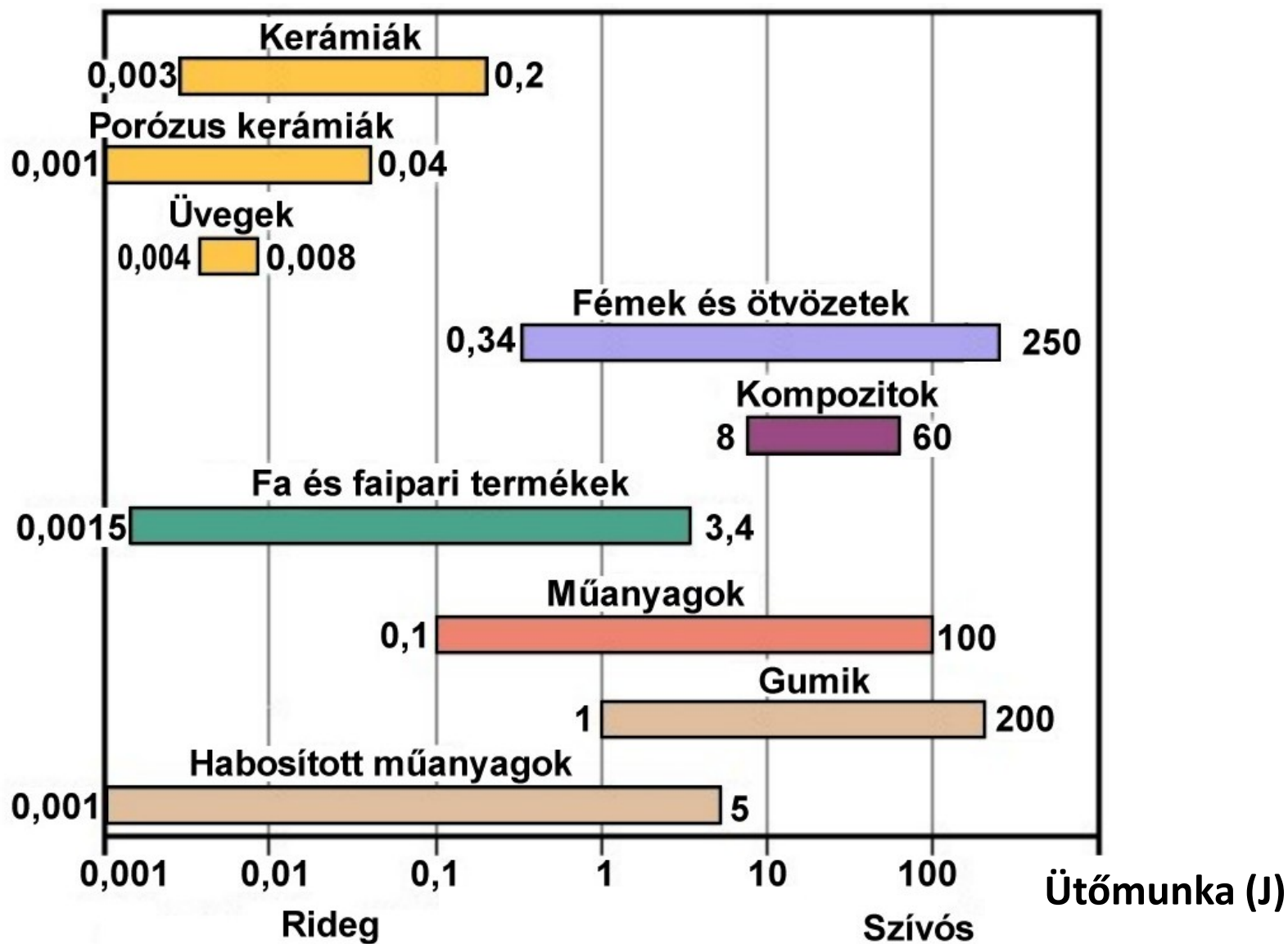
Az anyag törésig tartó energiaelnyelő képessége.

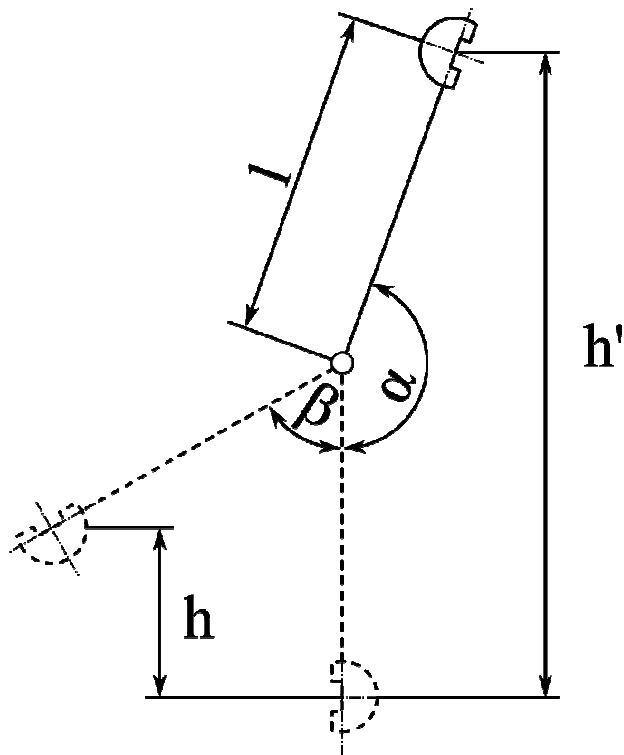
kerámia: kis szívósság (nagy szilárdság, rideg viselkedés)

fém: nagy szívósság (közepes szilárdság, képlékeny viselkedés)

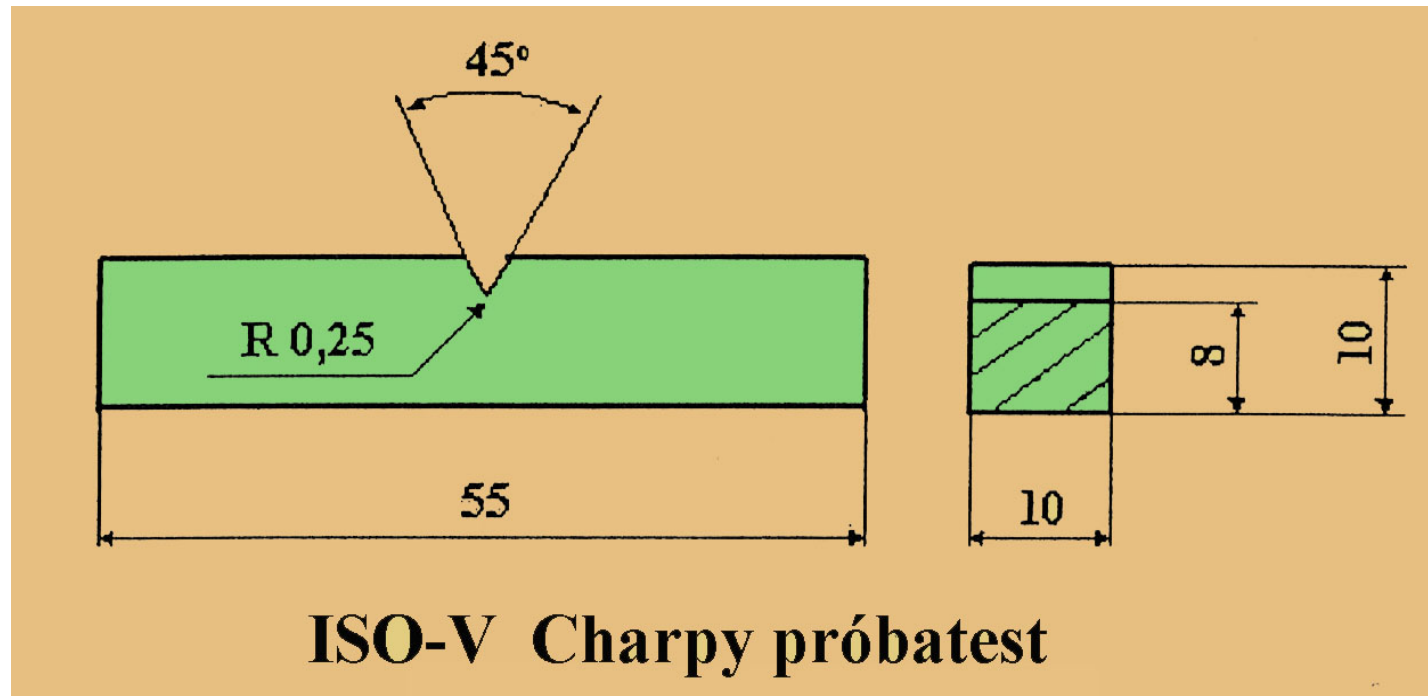
polimer: kis szívósság (kis szilárdság, képlékeny viselkedés)



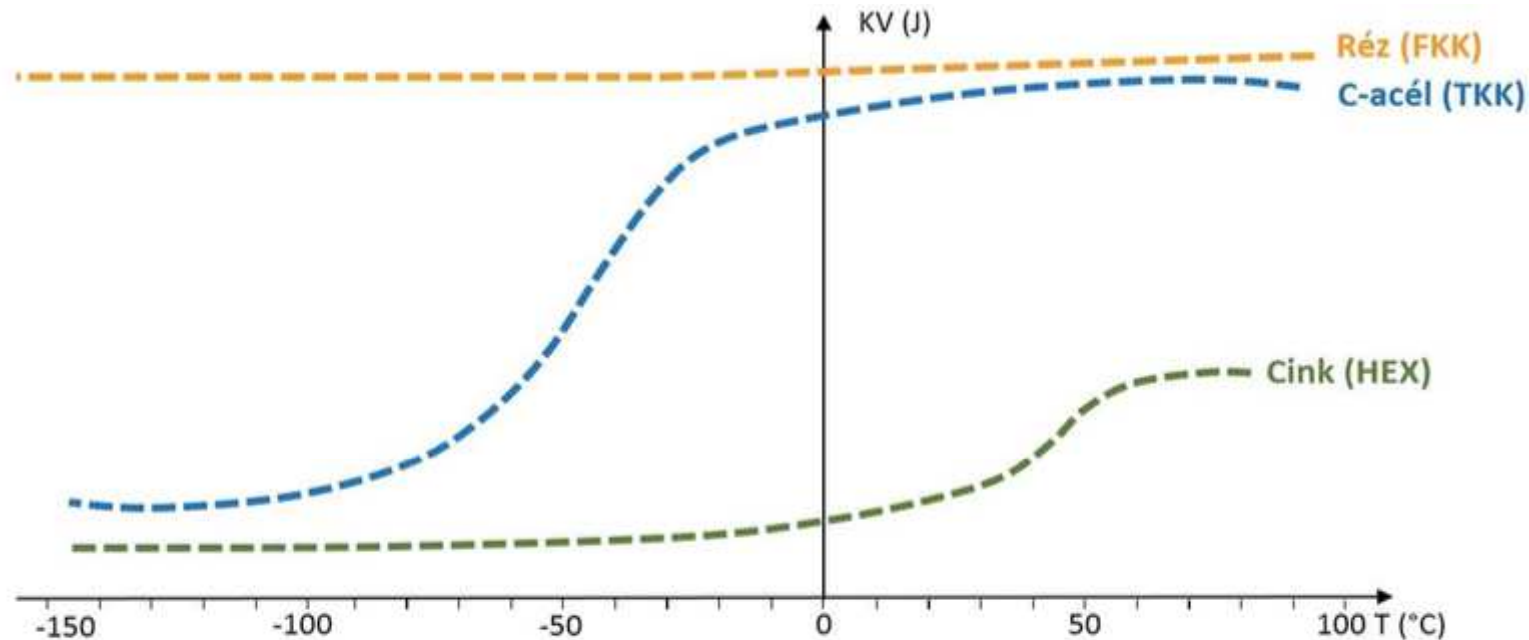




Törési- vagy ütőmunka: $KV = mg(h' - h) [J]$



1. Hőmérséklet



4. ábra. FKK, TKK és HEX kristályrácsú anyagok KV-T görbéi.

TKK:

- nehezen alakítható,
- rossz vezető,
- van kifáradási határa,
- van rideg-képlékeny átmeneti hőmérséklete

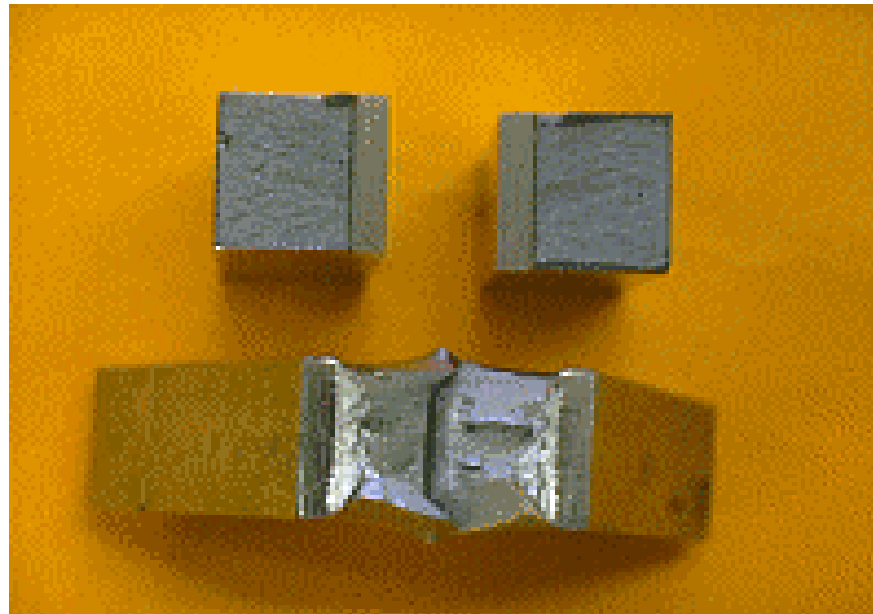
FKK:

- jól alakítható,
- jó vezető,
- nincs kifáradási határa,
- nincs rideg-képlékeny átmeneti hőmérséklete

Átmeneti hőmérséklet kijelölése lehetséges a **töretfelület megfigyelése alapján** is:

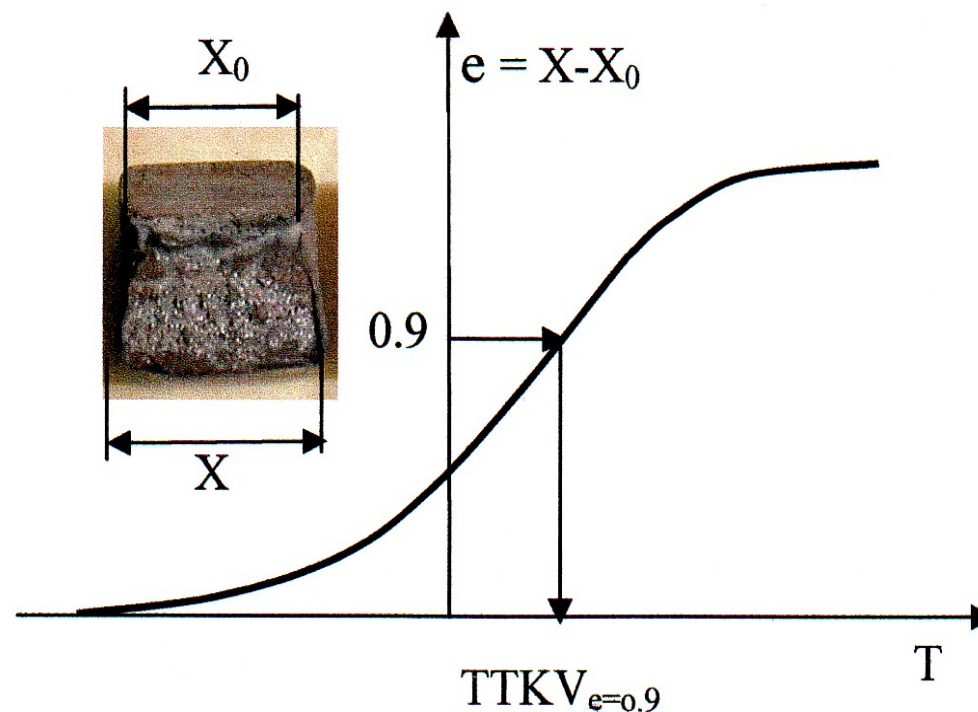
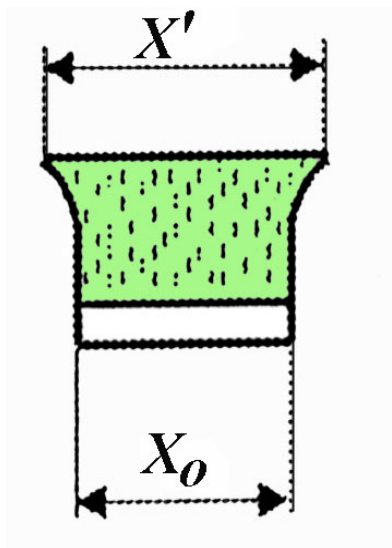
- szívós töret – matt, szálás jellegű
- rideg töret – csillogó, kristályos megjelenésű

Az átmeneti hőmérsékleten a kétféle töret aránya 50-50 %.



Expanzió:

- a törött próbatest méretváltozása
- az átmeneti hőmérséklet kijelölése adott expanziós értékhez,
pl. $exp = 0,9 \text{ mm}$ -hez



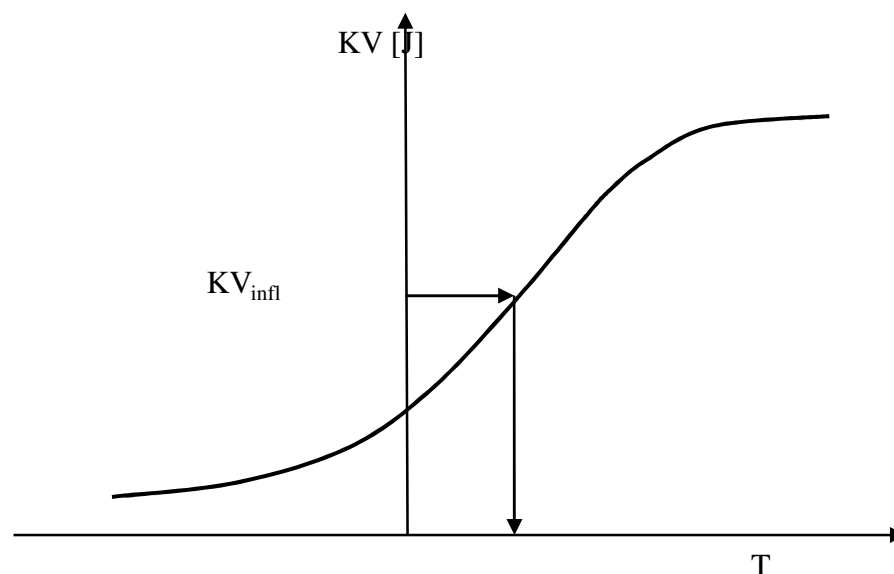
A KV-T görbe inflexiós pontja szerinti értékelés

A KV-T mérési eredményekre az alábbi 4 paraméteres függvény

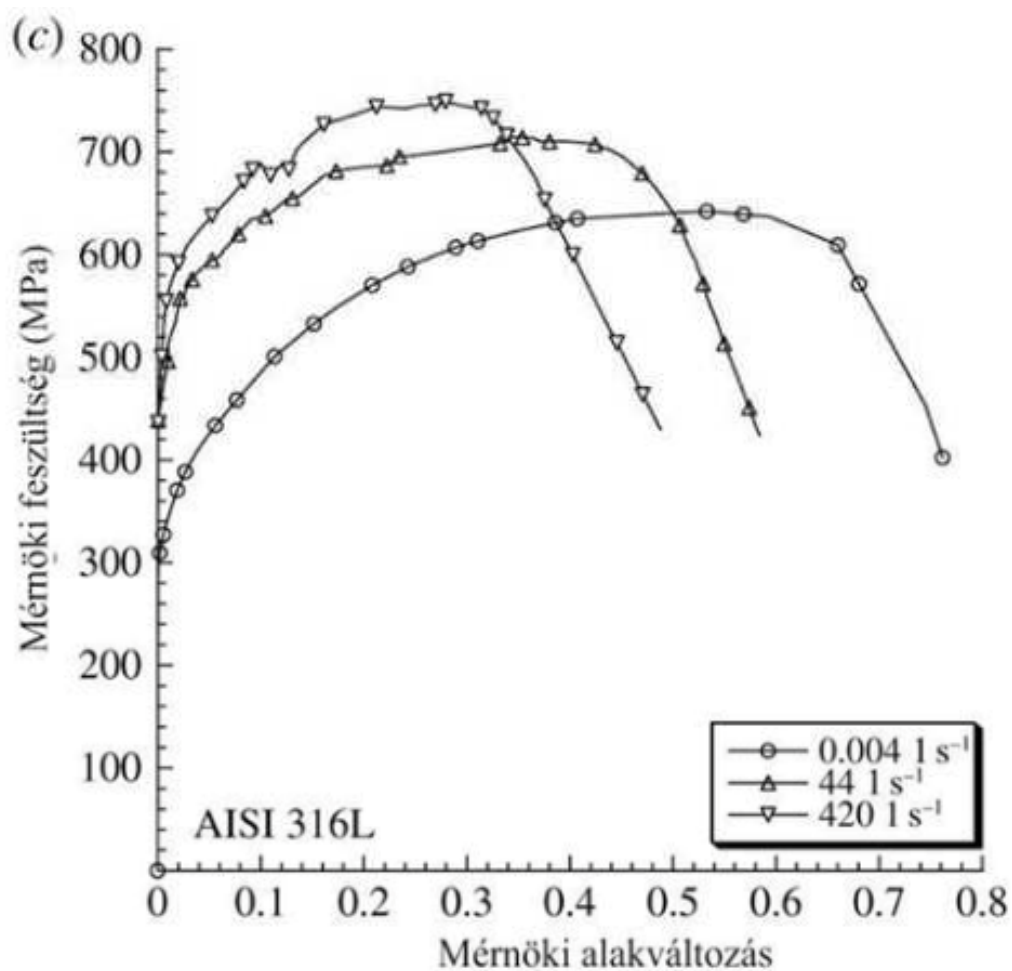
illeszthető:

$$KV(T) = A + B * \tanh\left(\frac{T - T_0}{C}\right)$$

Az illesztés elvégzése után kijelölhető az inflexiós ponthoz (T_{infl}) tartozó TTKV érték.



2. Alakváltozási sebesség



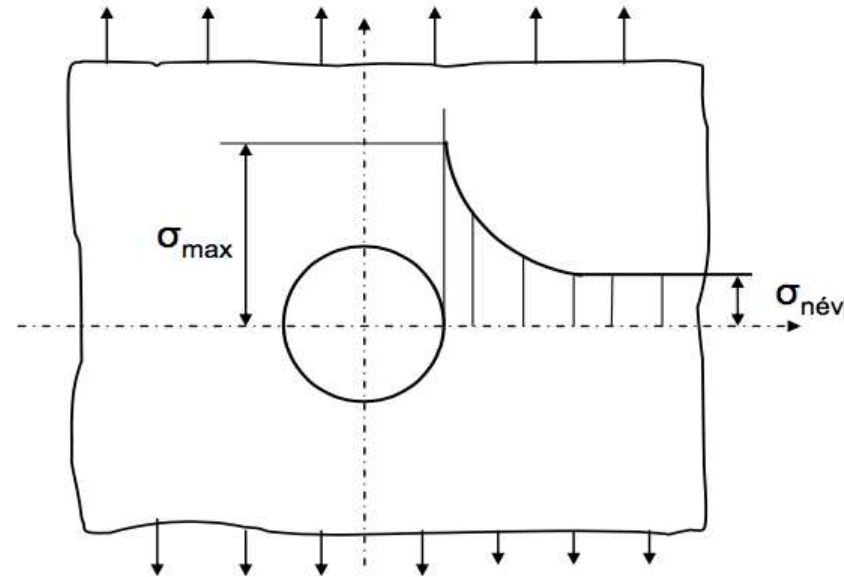
Minél nagyobb az alakváltozási sebesség, annál ridegebben viselkednek az anyagok (és viszont).

3. A feszültségi állapot

A feszültségkoncentrációs tényező:

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{névl}}}$$

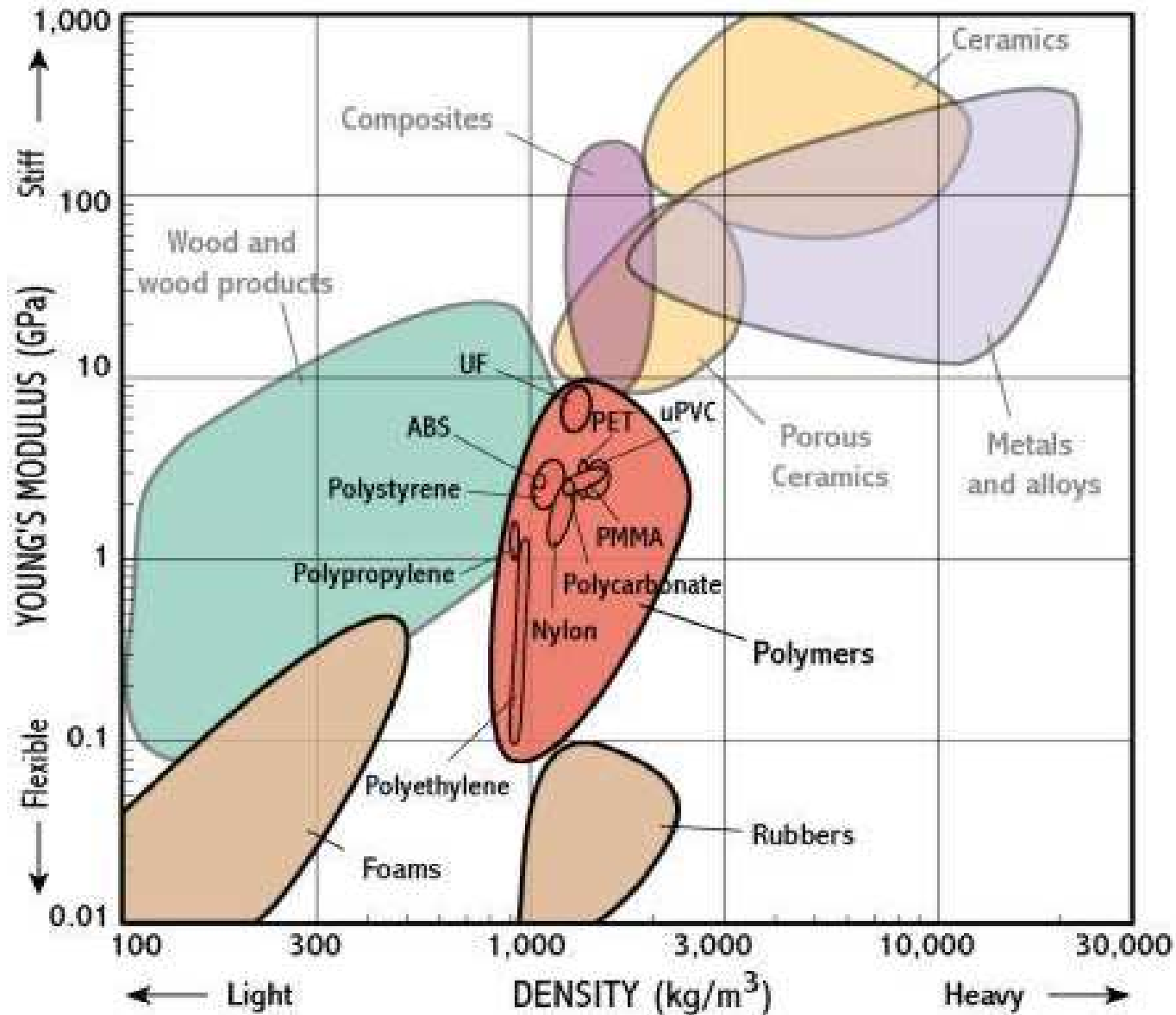
A bemetszés geometriájától függ.



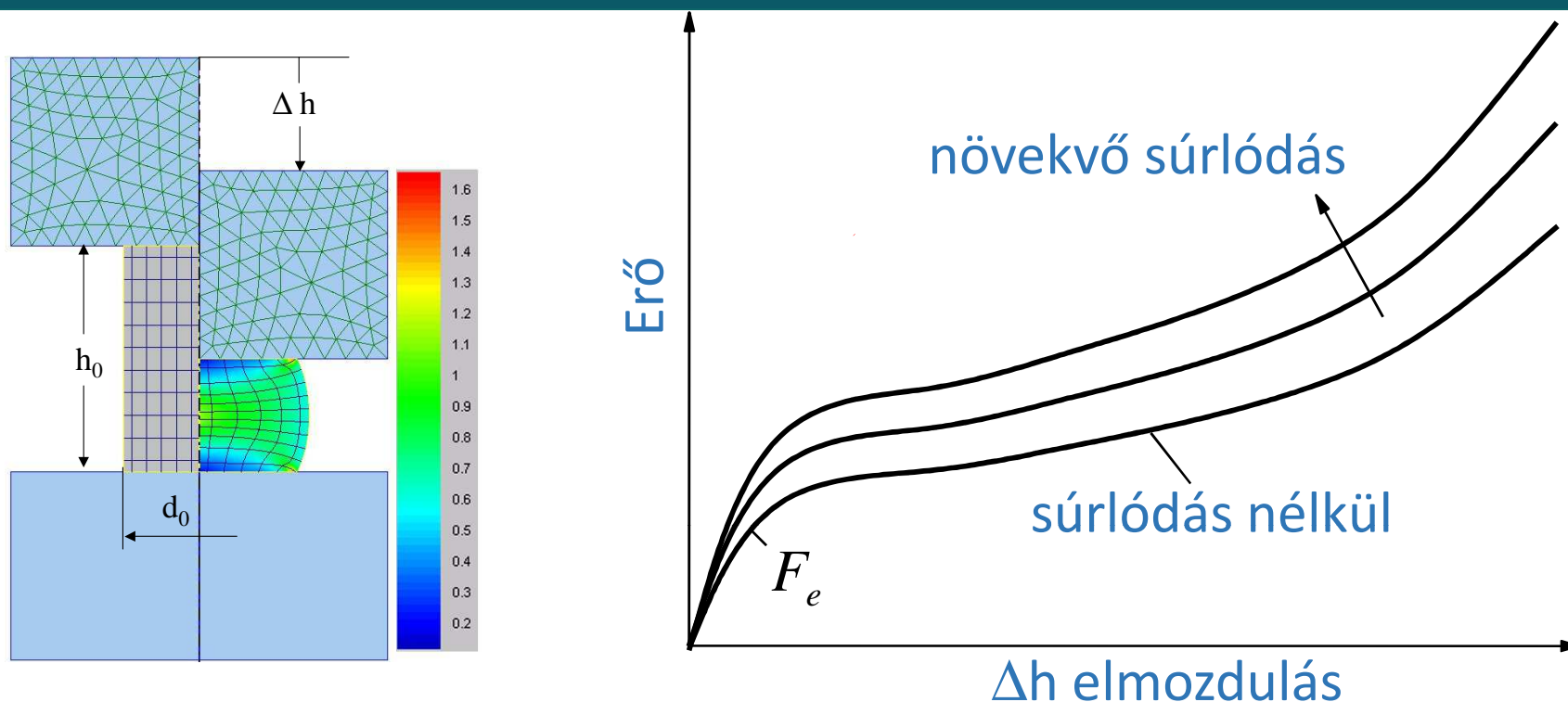
10.ábra. Egy furatot tartalmazó lemezben ébredő, a húzás irányával párhuzamos feszültségkomponens eloszlása a furat középtengelyének síkjában.

Éles átmenetekenél (pl. bemetszések, repedések) feszültségcsúcsokkal kell számolni.

Anyag	E (GPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)
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



Forrás:
Ashby



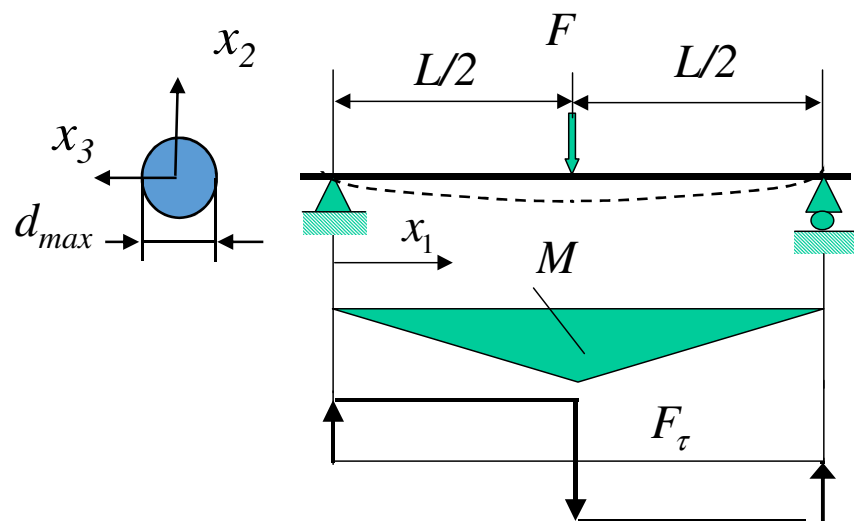
A fémek húzó és nyomó terhelésre csaknem egyformán viselkednek.

A nyomóvizsgálatot ezért rideg fémek minősítésére, vagy képlékeny fémek hidegalakításakor a technológia tervezéséhez végzik.

A képlékeny anyagok hengeres próbatesteknek alakja hordószerű lesz, mert a nyomólappal érintkező részek kisebb alakváltozást szenvednek a fellépő súrlódás miatt.

A nyomóvizsgálatot egyetemes szakítógépbe fogott nyomókeret segítségével lehet elvégezni.

Olyan anyagoknál alkalmazzák, amelyek szakításnál sokkal kisebb feszültségek hatására törnek, mint amekkora feszültség a hajlított próbatest szélső szálában ébred.

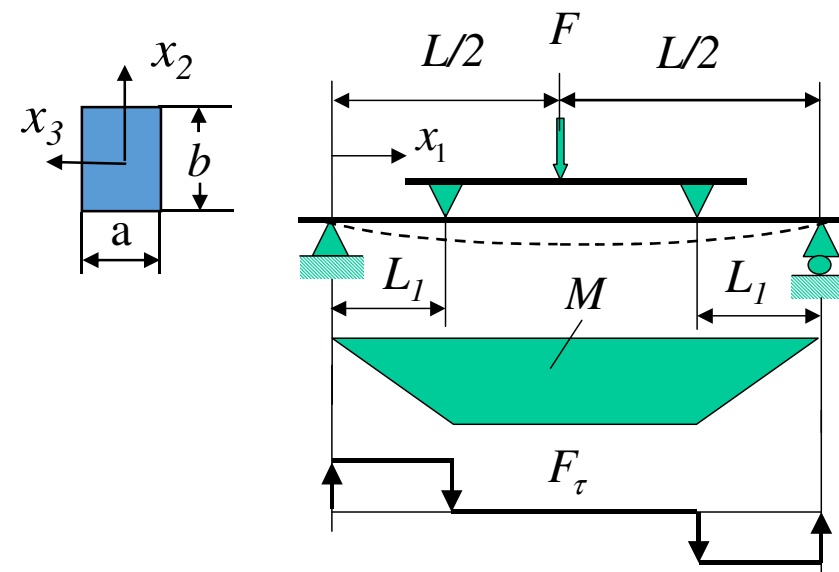


3 pontos hajlítás

$$R_e = \frac{M_e}{I} r_{\max}$$

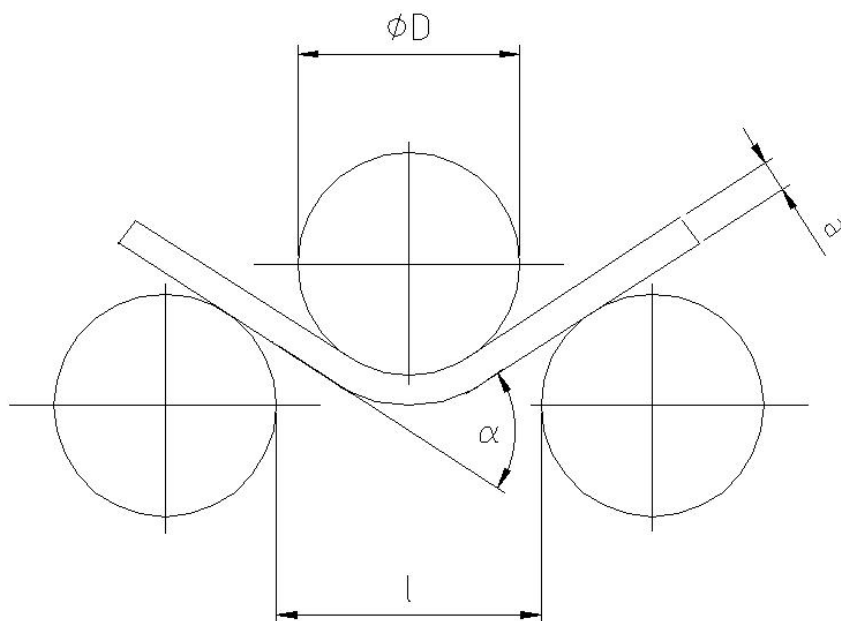
$$R_e = \frac{M_e}{2I} b$$

I: inercianyomaték



4 pontos hajlítás

Lemezanyag alakíthatóságának vizsgálatára.

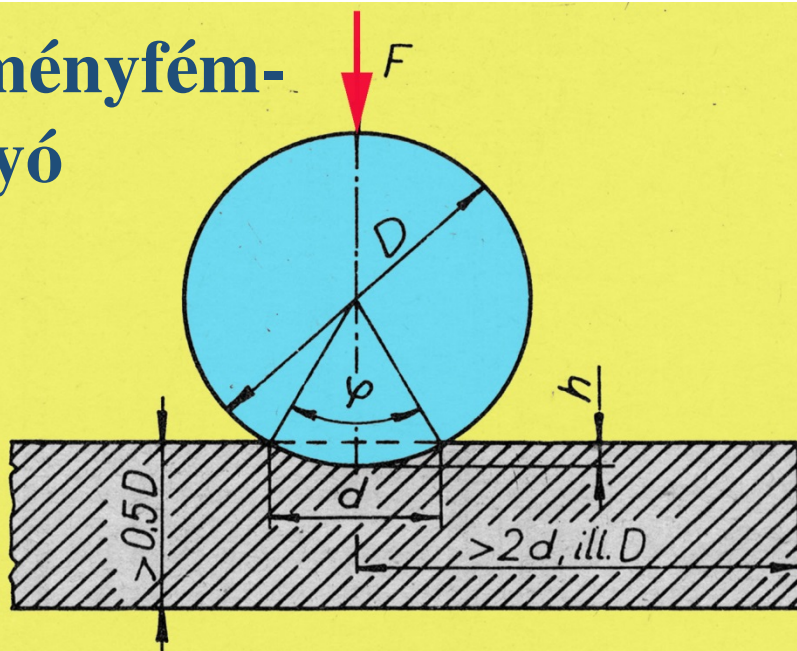


A hajlítást a lemez adott mértékű alakításáig, vagy repedéséig végezzük, és mérjük az ahhoz tartozó α hajlítási szöget.

- **A (statikus) keménység fogalma:**
 - A vizsgált anyag ellenállása az adott geometriájú szűrőszerszám behatolásával szemben.
- **Előnyei:**
 - Keménységi adatokból becsülhetők a szilárdsági és technológiai tulajdonságok.
 - Viszonylag egyszerű, gyors.
 - Gyakorlatilag roncsolásmentes.
- **A keménységmérés kivitelezése:**
 - Szűrőszerszámmal benyomódást létrehozva (statikus).
 - Rugalmas visszapattanást mérve (dinamikus).

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

**keményfém-
golyó**



F – terhelő erő (N)

A – lenyomat felület (mm²)

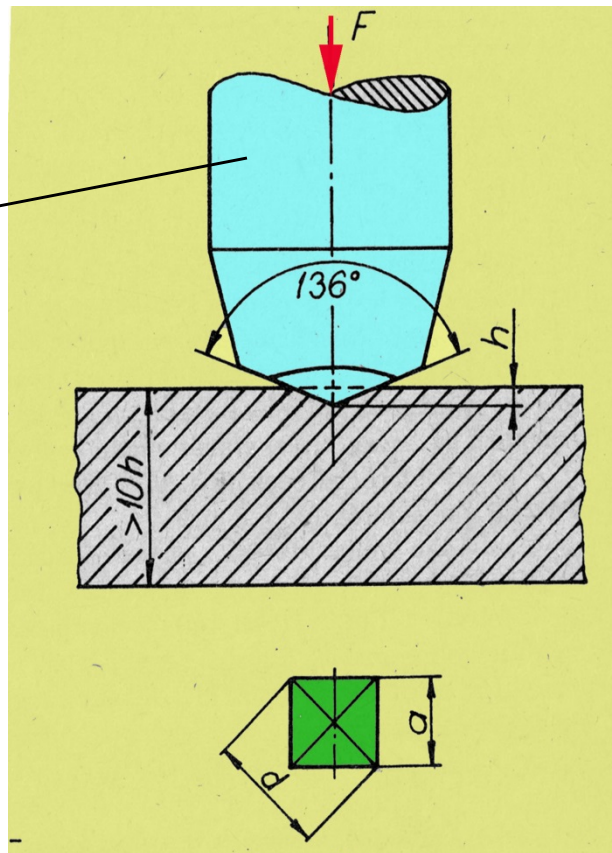
D – golyóátmérő (mm)

d – lenyomat átmérő (mm)

h – lenyomat mélység (mm)

Átlagos keménység értéket ad (inhomogén anyag vizsgálatánál előnyös).
Következtetni lehet az anyag szilárdságára ($R_m \approx k \cdot HB$). Öntöttvasak, színes- és
könnyűfémek, lágyacélok mérésére alkalmazható.

gyémánt-
gúla



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

F – terhelő erő (N)

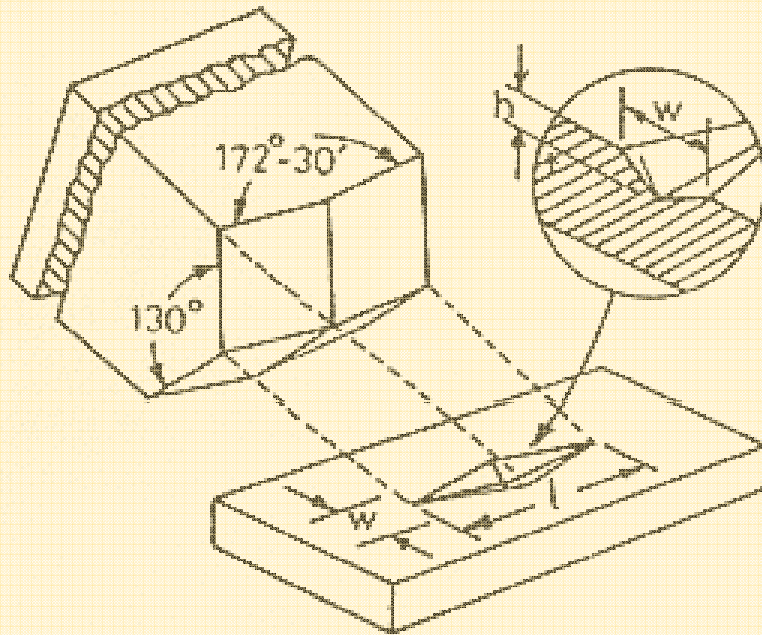
A – lenyomat felület (mm²)

d – lenyomat átló (mm)

Lokális keménység pontos meghatározása. Tetszőleges anyagminőség laboratóriumi vizsgálata. A kis terhelésű és mikro-Vickers eljárás vékony lemezek, rétegek és szövetelemek vizsgálatára használható. Itt is következtetni lehet az anyag szilárdságára ($R_{p0,2} \approx k \cdot HV$).



gyémánt gúla



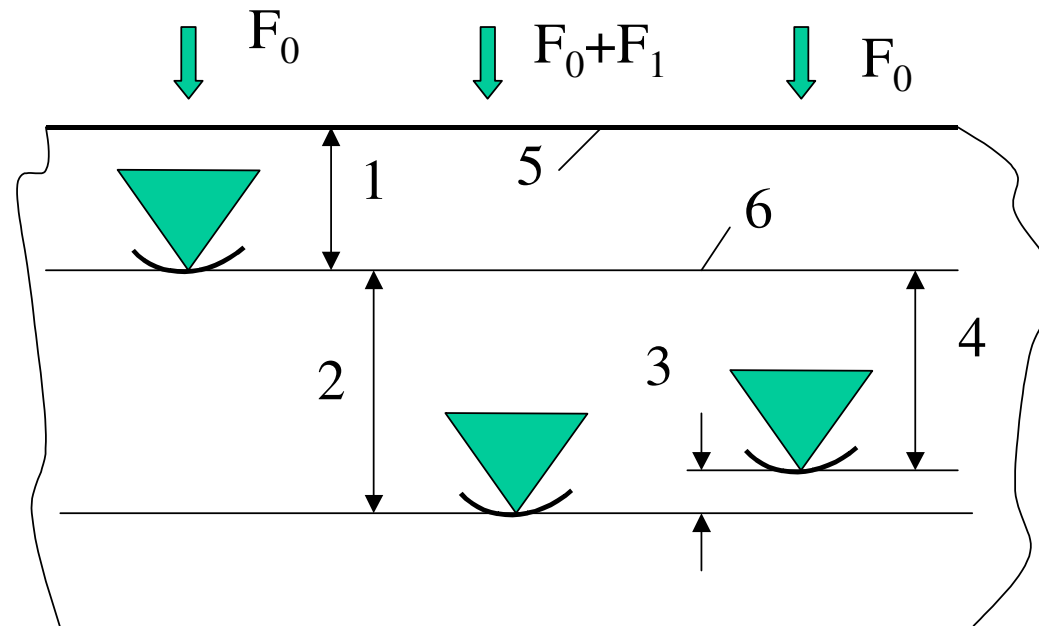
$$HK = \frac{0,102F}{A} = \frac{1,14487F}{l^2}$$

F – terhelő erő (N)







A – lenyomat felület (mm²)

l – a lenyomat hosszabbik átlója
(mm)

Hasonló a Vickers-eljáráshoz. Fémek és nagyon rideg anyagok (üveg, műszaki kerámiák) vizsgálatára alkalmas. Főleg az USA-ban elterjedt. Csak kis terhelésekkel használják.



- 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

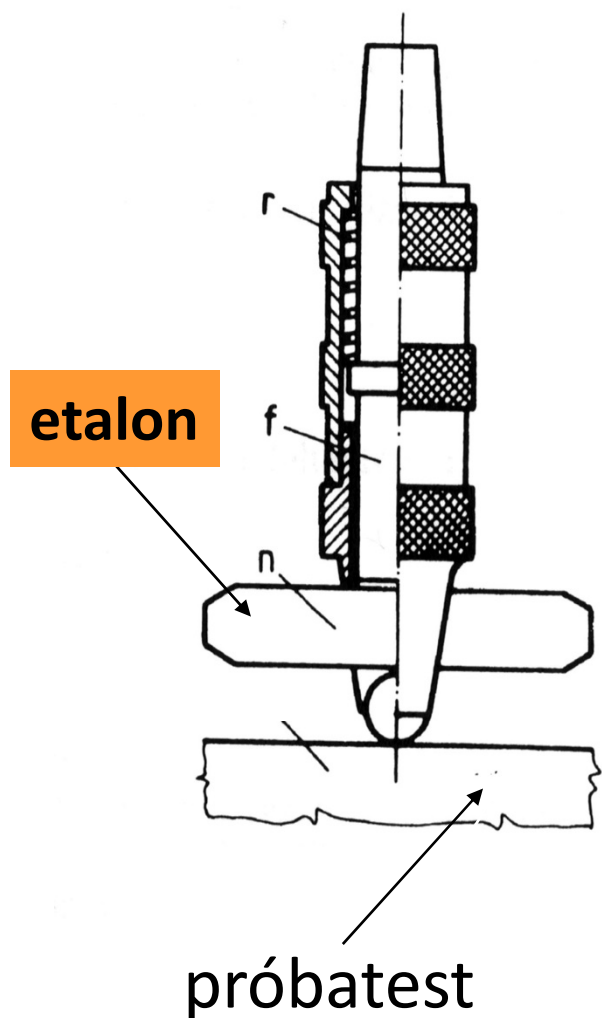
Jel	Szűrőszerszám	Előterhelés	Főterhelés	Keménység
HRA	 120°	98,07 N	490,3 N	100-h/0,002
HRB	 1,5875 mm	98,07 N	882,6 N	130-h/0,002
HRC	 120°	98,07 N	1373 N	100-h/0,002
HRH	 3,175 mm	98,07 N	490,3 N	130-h/0,002
...
HR15N	 120°	29,42 N	117,7 N	100-h/0,001
HR45T	 1,5875 mm	29,42 N	411,9 N	100-h/0,001

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

 - gyémántkúp

 - acél- vagy keményfém golyó

- **Gyors, lökészerű erőhatással végzett mérések**
- **Kivitelezés**
 - szűrőszerszámmal lenyomatot mérve
 - rugalmas visszapattanást mérve



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

HB_m – az etalon keménysége

HB_x – a próbatest keménysége

d_m – a lenyomat átmérője a mintán

d_x – a lenyomat átmérője az etalonon



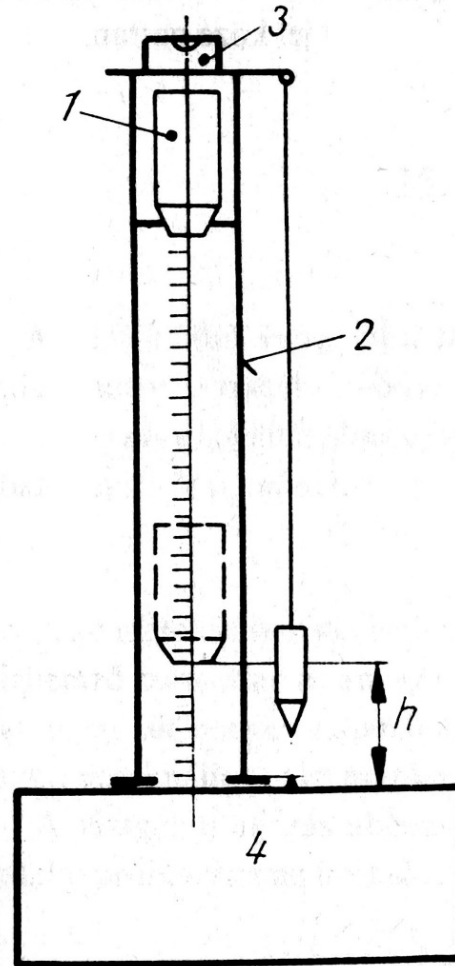
- **Mérés elve**

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

- **Berendezések**

- Szkleroszkóp
- Duroszkóp

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

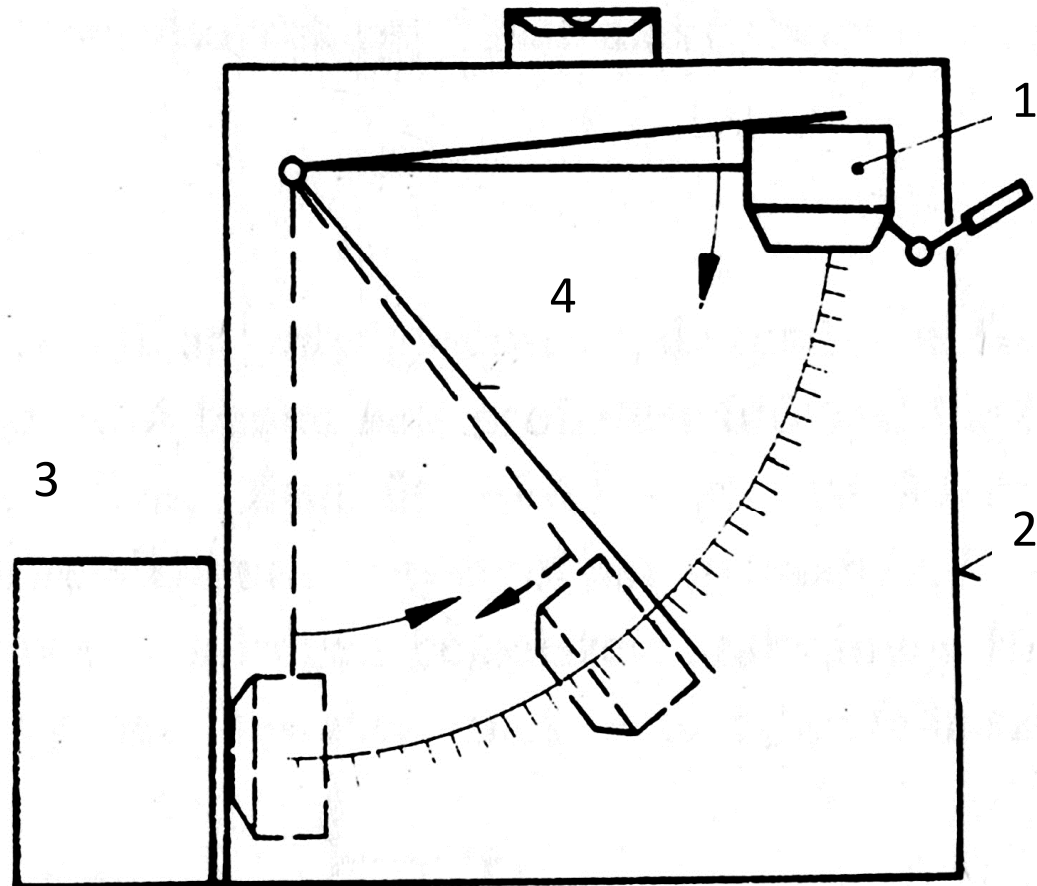


Roncsolásmentes,
egyszerű és
gyors módszer.

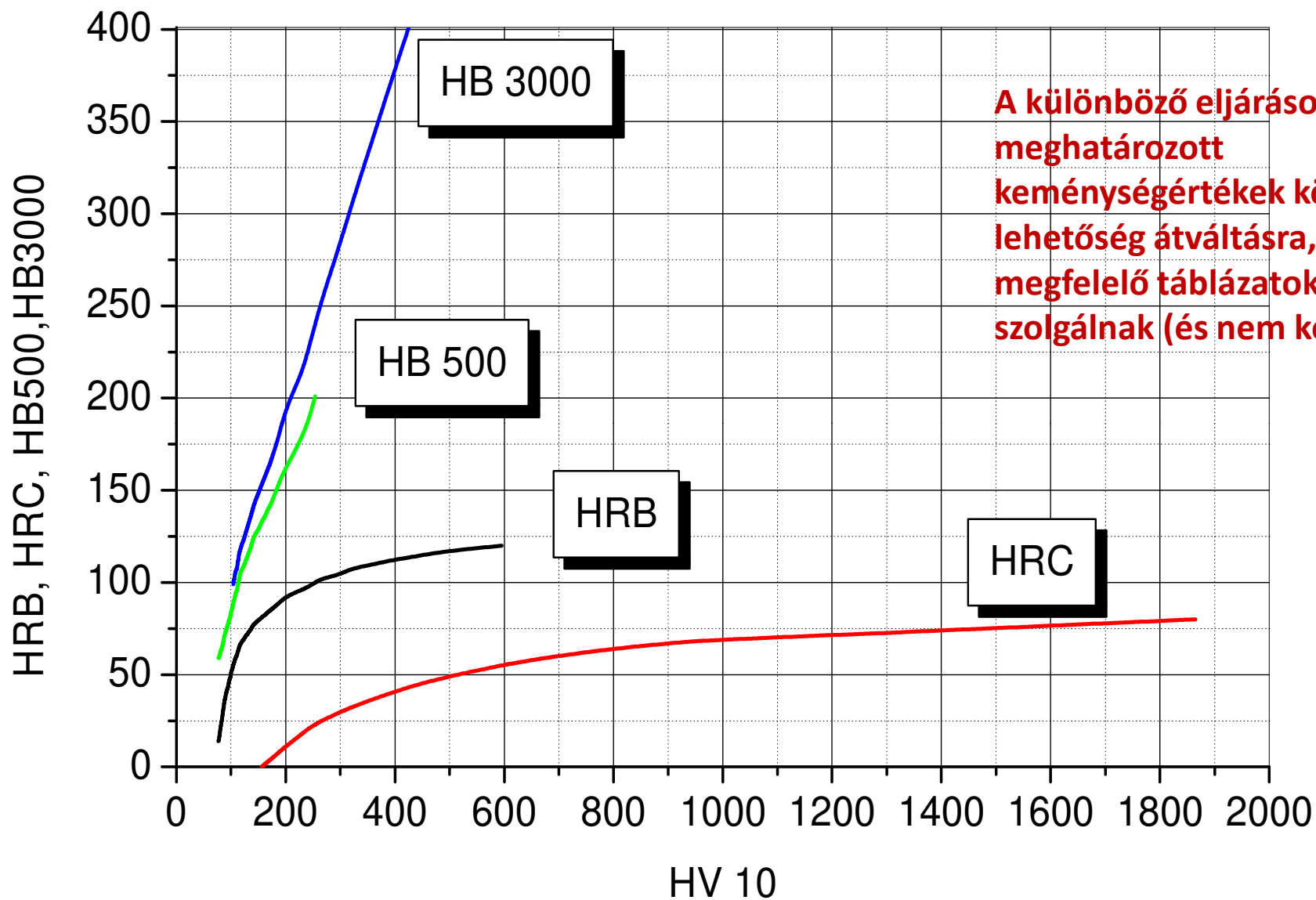
A mérendő tárgy tömege befolyásolja a mérési eredményt:
kis tömeg → rezgések → kisebb visszapattanás.



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



A tömeg és felület minősége befolyásolja.



A különböző eljárásokkal meghatározott keménységértékek között van lehetőség átváltásra, erre megfelelő táblázatok szolgálnak (és nem képletek).

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.

- a) Határozza meg a valódi feszültség – valódi alakváltozás rendszerben a 3 erőhöz tartozó alakváltozás és feszültség értékét!
- b) Határozza meg a mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás rendszerben a 3 erőhöz tartozó alakváltozás és feszültség értékét!
- c) Határozza meg a fajlagos törési munka közelítő értékét!

a) A valós rendszerben

$$\frac{l}{l_0} = \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = 1 + \varepsilon = \frac{S_0}{S} = \frac{d_0^2}{d_{p0,2}^2} \Rightarrow d_{p0,2} = 9,99 \text{ mm} \approx d_0 \quad \text{a térfogat-állandóságból}$$

$$\sigma_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_{p0,2}} = 280 \text{ MPa}$$

$$\varphi_{p0,2} = \ln \frac{l_{p0,2}}{l_0} = \ln \frac{d_0^2}{d_{p0,2}^2} = 2 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_m} = 436 \text{ MPa}$$

$$\varphi_m = \ln \frac{d_0^2}{d_m^2} = 0,167$$

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \Rightarrow d_u = 6,32 \text{ mm}$$

$$\varphi_u = \ln \frac{d_0^2}{d_u^2} = 0,918$$

$$\sigma_u = \frac{F_u}{S_u} = 732 \text{ MPa}$$

b) A mérnöki rendszerben

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} = 280 \text{ MPa} \quad \varepsilon_{p0,2} = \frac{l_{p0,2}}{l_0} - 1 = \frac{l_0 + 0,002}{l_0} - 1 = 0,002$$

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} = 369 \text{ MPa} \quad \varepsilon_m = \frac{l_m}{l_0} - 1 = \frac{S_0}{S_m} - 1 = \frac{d_0^2}{d_m^2} - 1 = 0,181$$

$$R_u = \frac{F_u}{S_0} = 293 \text{ MPa} \quad \varepsilon_u = \frac{l_u}{l_0} - 1 = \frac{S_0}{S_u} - 1 = \frac{d_0^2}{d_u^2} - 1 = 1,504$$

c) A fajlagos törési munka közelítő értéke:

$$W_c \approx \frac{R_{p0,2} + \sigma_u}{2} \varphi_u = 465 \frac{\text{J}}{\text{cm}^3}$$

1. Prohászka János: A fémek és ötvözetek mechanikai tulajdonságai; Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2001.
2. Gillemot László: Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat; Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1996.

Köszönöm a figyelmet!