



BME  
ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK

Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat 2003/04

## Mechanikai tulajdonságok és vizsgálatuk

Dr. Krállics György  
krallics@eik.bme.hu

1

## 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 méroszámokat;
- a statikus és dinamikus keménységmérő eljárásokat, és az egyes eljárások méroszámait.

3

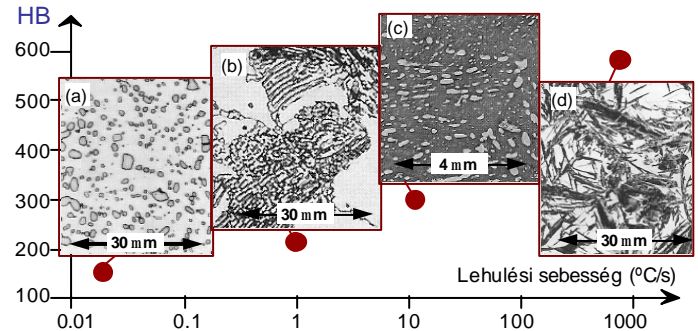
## Az előadás fő pontjai

- Bevezetés
- Rugalmas és képlékeny alakváltozás
- Egyszerű igénybevételek
- Szakítóvizsgálat és méroszámjai
- Zömítő-, hajlító- és csavaróvizsgálat
- Keménységmérési eljárások és alkalmazási területük

2

## Szerkezet, folyamat és tulajdonságok

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



- **Folyamat** is változtathatja a **szerkezetet**;  
Pl.: Szerkezetváltozás a lehülési sebesség hatására

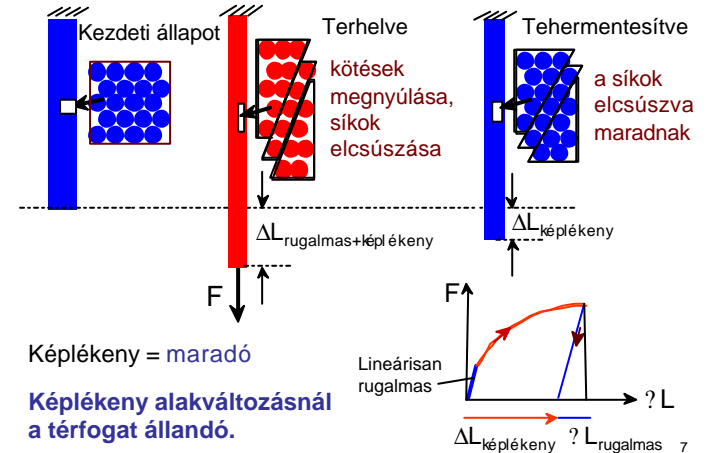
4

## Anyagtulajdonság csoportok

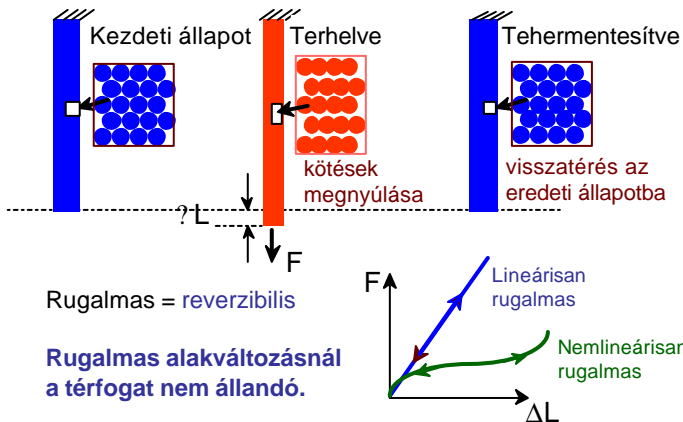
- **Mechanikai** (terhelés és alakváltozás hatása)
- **Elektromos** (elektromos tér hatása)
- **Hőfizikai** (hőmérséklet-mezo hatása)
- **Mágneses** (mágneses tér hatása)
- **Optikai** (elektromágneses tér hatása)
- **Kémiai**

5

## Képlékeny alakváltozás



## Rugalmas alakváltozás



6

## Húzó és nyomó igénybevétel

Alakváltozás

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

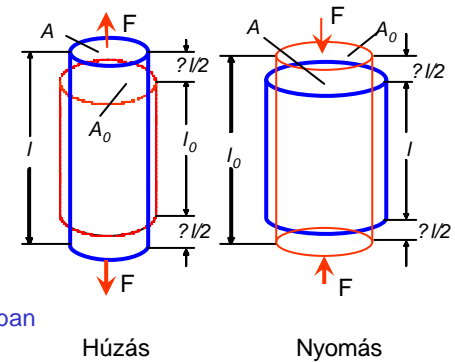
Feszültség

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

Rugalmas állapotban

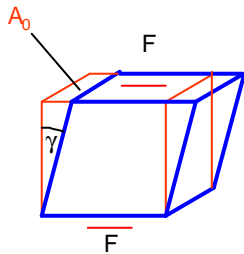
$$s = E e$$

(Hooke-törvény)



8

## Nyíró igénybevétel

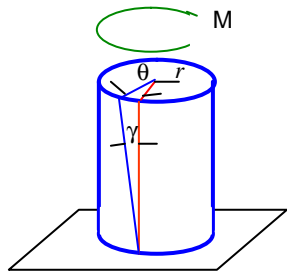


Egyszeru nyíras

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

Rugalmas állapotban

$$t = Gg$$



Csavarás

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

9

## Szabványos mérőszámok

Feszültségi mérőszámok

Alakváltozási 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]

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

Kontrakció

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100 [\%]$$

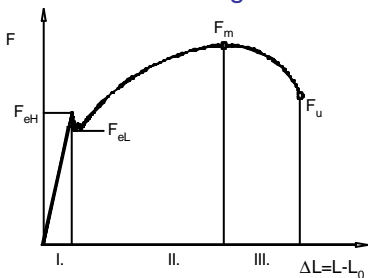
Szakadási nyúlás

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} 100 [\%]$$

11

## Szakítóvizsgálat

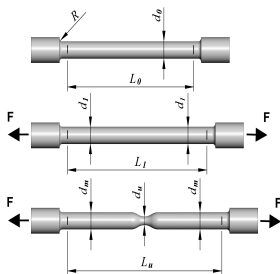
Szakítódigram



I. Rugalmas alakváltozás

II. Egyenletes képlékeny alakváltozás

III. Kontrakció



10

## Mechanikai mennyiségek

• Mérnöki rendszer

• Valódi rendszer

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

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

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

$$W_c = \int_0^{e_u} s_E de$$

Alakváltozás

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

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

Feszültség

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

Fajlagos törési munka [J/cm<sup>3</sup>]

$$W_c = \int_0^{j_u} s_T dj$$

12

## Feszültségi és alakváltozási állapot a kontrakciónál

$\sigma_{zz}$   
 $\tilde{\sigma}_{zz}$

$\sigma_{rr} = \sigma_{\phi\phi}$

$R_g$

$d_{min}$

$r$

$z$

$$s_{zz} = \bar{s} \left[ 1 + \ln \left( 1 + \frac{r_{min}^2 - r^2}{2r_{min} R_g} \right) \right]$$

$$s_{rr} = s_{jj} = s_{zz} - \bar{s}$$

$$j_z = 2 \ln \frac{d_0}{d_{min}}$$

$$j_r = j_j = \ln \frac{d_{min}}{d_0}$$

$$\bar{J} = j_z$$

$\bar{s}$  – egyenértékű feszültség  $\bar{J}$  – egyenértékű alakváltozás 13

## Lineáris rugalmas tulajdonságok

- Rugalmassági modulus  
E (Young-modulus)
- Hooke-törvény:  
 $\sigma = E \varepsilon$
- Poisson-tényező,  $\nu$ :  
 $n = -\frac{e_r}{e}$

fémek:  $\nu \sim 0,33$   
kerámiák:  $\nu \sim 0,25$   
polimerek:  $\nu \sim 0,40$

**Egységek:**  
E: [GPa] vagy [MPa]  
 $\nu$ : dimenzió nélküli

Lineárisan rugalmas

Egytengelyű igénybevétel

$\varepsilon_r$  - radiális alakváltozás

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

15

## Feszültség - alakváltozás görbék

$$F = s_T S = s_E S_0 \Rightarrow s_T = s_E (1 + e)$$

$$j = \ln(1 + e)$$

14

- Csúszató rugalmassági modulus, G
- Hooke-törvény:  
 $\tau = G \gamma$
- Térfogati rugalmassági modulus, K

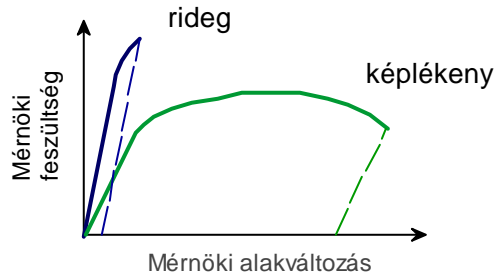
$$p = -K \frac{\Delta V}{V_0}$$

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

Hidrosztatikus nyomás alkalmazása  
kezdeti térfogat:  $V_0$   
térfogat változás:  $dV$

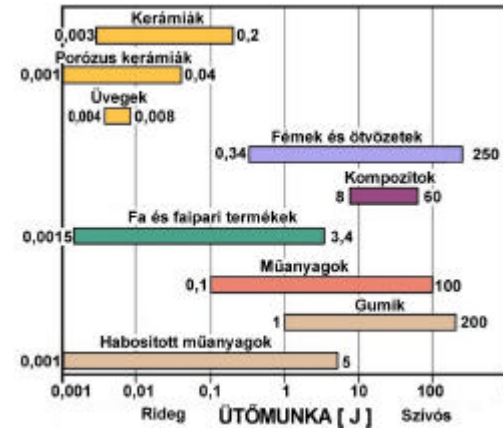
16

## Képlékeny / rideg viselkedés



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

17



19

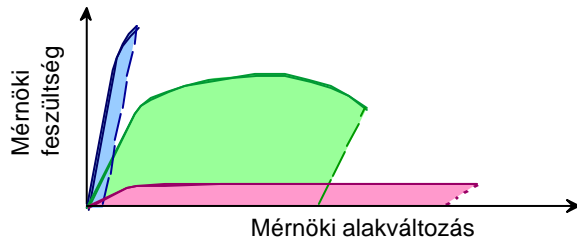
## Szívósság

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)

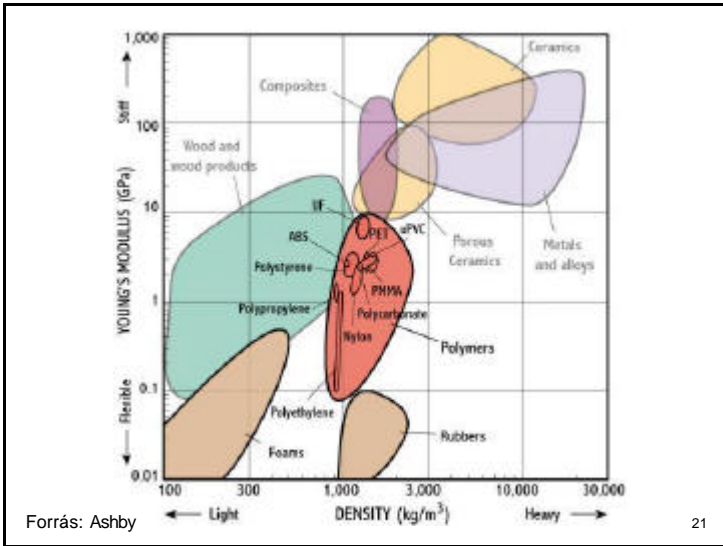


18

## Különböző anyagok mechanikai tulajdonságai 20 °C-on

Anyag	E [GPa]	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>50</sub> [%]
Acél	190-210	200-1700	400-1800	65-2
Alumínium-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
Kerámia	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

20



## Ideális súrlódási viszonyok

nagy viszkozitású kenőanyag

**Alakváltozások**

$$e = \frac{h - h_0}{h_0}, \quad j = \ln \frac{h}{h_0}$$

$$\bar{\epsilon} = \left| \frac{v_{z\text{öml}}}{h} \right|$$

**Feszültségek**

$$s_r = \frac{F}{S} = \frac{4F}{d^2 p}, \quad s_\epsilon = \frac{F}{S_0} = \frac{4F}{d_0^2 p}$$

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

## Nyomóvizsgálat

$\Delta h$

$h_0$

$d_0$

EIO

növekvő súrlódás

súrlódás nélkül

$F_e$

$\Delta h$  elmozdulás

## Hordósodás jelensége

$R_g$

$h_0$

$h$

$d_{\min}$

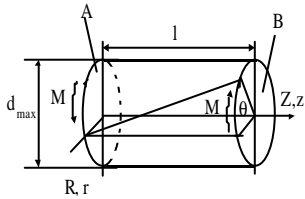
$d_{\max}$

$$s_{zz} = -\bar{s} \left( 1 - \ln \frac{d_{\max} R_g}{d_{\min} R_g - \frac{d_{\max}^2}{4} + r^2} \right)$$

$$s_{jj} = s_{rr} = \bar{s} + s_{zz}$$

$$j_z = 2 \ln \frac{d_0}{d_{\max}}, \quad j_r = j_j = \ln \frac{d_{\max}}{d_0}, \quad \bar{j} = |j_z|$$

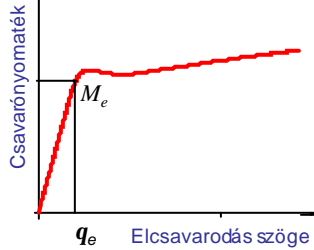
## Csavaróvizsgálat



$$\bar{\epsilon} = \int_0^l \bar{\epsilon} dt = \int_0^l \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{r}{l} \frac{dq}{dt} dt = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{r}{l} q$$

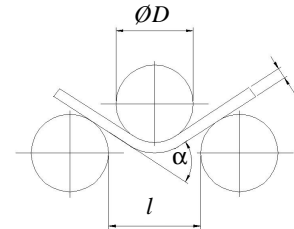
$$s_{sj} = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$$

Csavaró folyáshatár  $R_e = \frac{2\sqrt{3}M_e}{p r_{\max}^3}$



25

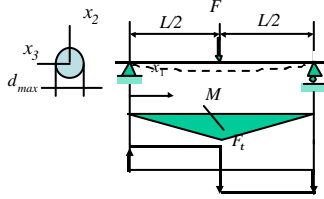
## Lemezanyag alakíthatóságának vizsgálata



A hajlítást a lemez repedéséig végezzük, és mérjük a töréshez tartozó  $\alpha$  hajlítási szöget.

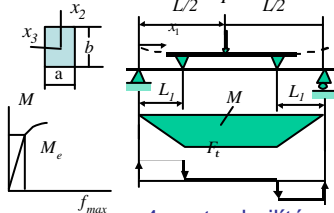
27

## Hajlítóvizsgálat



3 pontos hajlítás

$$E = \frac{FL}{4f_{\max}} \left( \frac{L^2}{12I} + \frac{k}{A} \right)$$



4 pontos hajlítás

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

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

$$E = \frac{FL_1(3L^2 - 4L_1^2)}{48If_{\max}}$$

26

## Keménységmérés

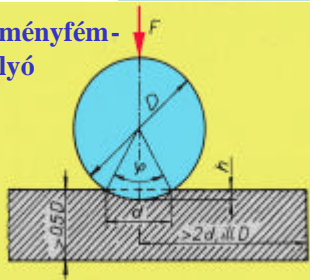
- **A (statikus) keménység fogalma:**
  - A vizsgált anyag ellenállása az adott geometriájú szűrőszerszám behatolásával szemben.
- **A keménység kapcsolata más tulajdonságokkal:**
  - Keménységi adatokból becsülhetők a szilárdsági és technológiai tulajdonságok.
- **A keménységmérés kivitelezése:**
 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

28

## Brinell-keménységmérés

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

keményfém-golyó



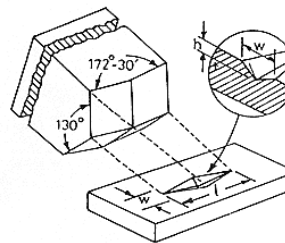
$F$  – terhelőerő [N]  
 $A$  – lenyomatfelület [ $mm^2$ ]  
 $D$  – golyóátmérete [mm]  
 $d$  – lenyomat átmérete [mm]  
 $h$  – lenyomatmélysége [mm]

Átlagos keménység értéket ad (inhomogén anyag vizsgálatánál elonyós).  
 Következetténi lehet az anyag szilárdságára. Öntöttvasak, színes- és könnyűfémek, lágyacélok mérésére alkalmazható.

29

## Knoop-keménységmérés

gyémánt gúla



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

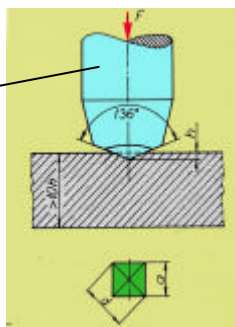
$F$  – terhelőerő [N]  
 $A$  – lenyomat felület [ $mm^2$ ]  
 $l$  – a lenyomat hosszabbik átlója [mm]

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

31

## Vickers-keménységmérés

gyémánt-gúla



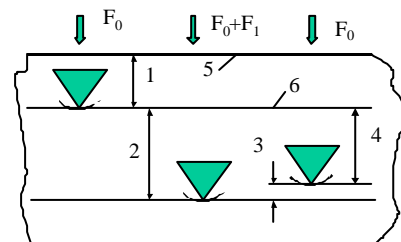
$$HV = \frac{0.102F}{A} = 0.189 \frac{F}{d^2}$$

$F$  – terhelőerő [N]  
 $A$  – lenyomatfelület [ $mm^2$ ]  
 $d$  – lenyomat átló [mm]

Lokális keménység pontos meghatározása. Tetszoleges anyagminőség laboratóriumi vizsgálata. A kis terhelésű és mikro-Vickers eljárás vékony lemezek, rétegek és szövetelemek vizsgálatára használható.

30

## Rockwell-keménységmérés



1 - a lenyomat mélysége az  $F_0$  előterhelésnél  
 2 - a lenyomat mélysége az  $F_1$  foterhelésnél  
 3 - a rugalmas visszarugózás az  $F_1$  foterhelés levétele után  
 4 - a maradó lenyomat  $h$  mélysége  
 5 - a mintadarab felülete  
 6 - a mérés referencias íkja

32



## Rockwell-eljárások

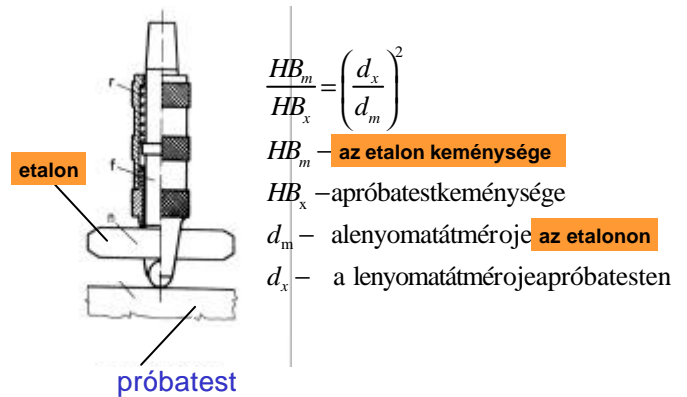
Jel	Szűrőszerszám	Eloterhelés	Foterhelés	Keménység
HRA	▽ 120°	98,07 N	490,3 N	100-h/0,002
HRB	● 1,5875 mm	98,07 N	882,6 N	130-h/0,002
HRC	▽ 120°	98,07 N	1373 N	100-h/0,002
HRH	● 3,175 mm	98,07 N	490,3 N	130-h/0,002
...	...	...	...	...
HR15N	▽ 120°	29,42 N	117,7 N	100-h/0,001
HR45T	● 1,5875 mm	29,42 N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

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

▽ - gyémántkúp      ● - acél- vagy keményfém golyó

33

## Mérés Poldi-kalapáccsal



35

## Dinamikus keménységmérő eljárások

- Gyors, lökészerű erőhatással végzett mérése k
- Kivitelezés
  - Szűrőszerszámmal lenyomatot mérve
  - Rugalmas visszapattanást mérve

34

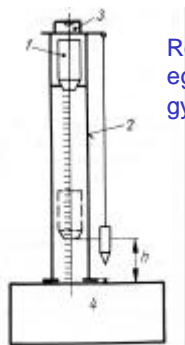
## Eljárások a rugalmas visszahatás alapján

- Mérés elve
  - A vizsgált tárgy felületére adott energiával ráejtett kalapács / golyó visszapattanásának magassága arányos a tárgy keménységével
- Berendezések
  - Szkleroszkóp
  - Duroszkóp

36

## Szkeloroszkóp

1. Ejtósúly (gyémántvéggel)
2. Üvegcsó
3. Libella
4. Mérendo tárgy



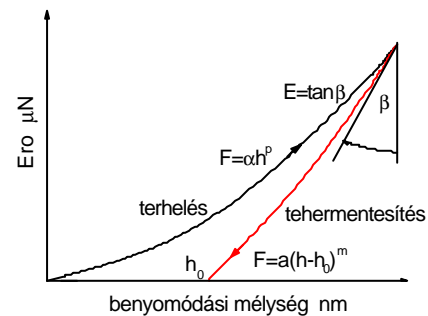
Roncsolásmentes, egyszerű és gyors módszer.

A mérendo tárgy tömege befolyásolja a mérési eredményt :  
kis tömeg ? rezgések ? kisebb visszapattanás.

37

## Muszerezett keménységmérési eljárások

### Ero - nyomódás görbe felvétele

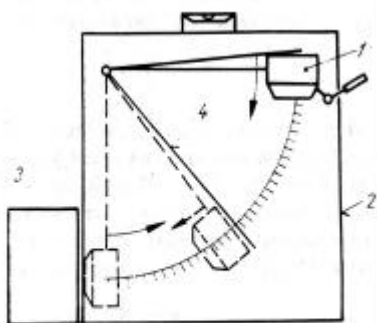


Vékony rétegek mérése

39

## Duroszkóp

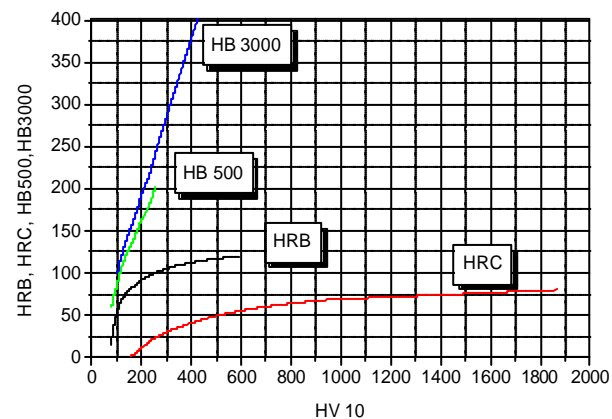
1. Mérokalapács
2. Doboz
3. Mérendo tárgy
4. Mutató



A tömeg és felület minősége befolyásolja.

38

## Keménység konverzió



40

## 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
- Nyomó folyáshatár
- Csavaró folyáshatár
- Hajlító folyáshatár
- Statikus keménység
- Brinell-keménység
- Vickers-keménység
- Knopp-keménység
- Rockwell-keménység
- Dinamikus keménység
- Muszerezett keménységmérés