

A gyurmától a ragtapaszig Sebességfüggő folyamatok

Nguyen Quang Chinh

ELTE, Fizikai Intézet
Anyagfizikai Tanszék
email: chinh@metal.elte.hu



Sebességfüggő folyamatok

Minden folyamat sebességfüggő (időfüggő) az atomok diffúziója miatt

$$p \propto e^{-\frac{Q}{kT}} \quad \text{vagy} \quad p \propto \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)$$

Q : aktiválási (diffúziós) energia,

k : Boltzmann állandó,

T : az abszolút hőmérséklet,

Szobahőmérsékleten, $T = 300 \text{ K}$,

$$k = 1.38059 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$kT = 4.14 \cdot 10^{-21} \text{J} = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{eV}$$

$$1 \text{eV} = 1.69 \cdot 10^{-19} \text{C} \cdot 1 \text{V} = 1.69 \cdot 10^{-19} \text{J}$$



Sebességfüggő folyamatok

Minden folyamat sebességfüggő (időfüggő) az atomok diffúziója miatt

$$p \propto e^{-\frac{Q}{kT}} \quad \text{vagy} \quad p \propto \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)$$

Al: $Q = 1.35 \text{ eV}$, $1\text{eV} = 1.69 \cdot 10^{-19} \text{C} * 1\text{V} = 1.69 \cdot 10^{-19} \text{J}$

Fe: $Q = 2.75 \text{ eV}$,

H-H kötés a ragasztóanyagban: Q kb. 0.4 eV , ezzel

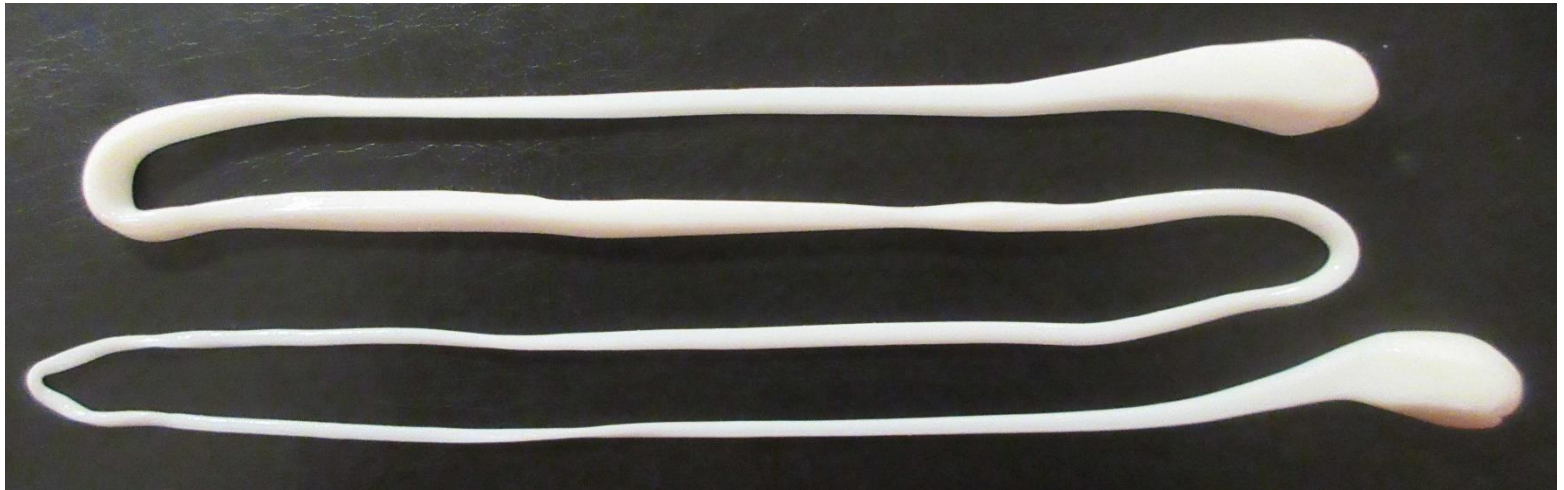
$$T_1 = 300 \text{ K} \rightarrow T_2 = 320 \text{ K}, \quad \text{akkor } p_2 \approx 2.5 \cdot p_1$$



Kedvenc játék: intelligens gyurma



Lassan deformálva: szuperképlékenység



Kedvenc játék: intelligens gyurma



Gyorsan deformálva: Rídegtörés



Kedvenc játék: intelligens gyurma

Erős sebességfüggő
deformáció-folyamat



Lassan deformálva: szuperképlékenység



Gyorsan deformálva: Rídeg törés



Kedvenc játék: intelligens gyurma

Erős sebességfüggő
deformáció-folyamat



Különleges anyagot, ami:

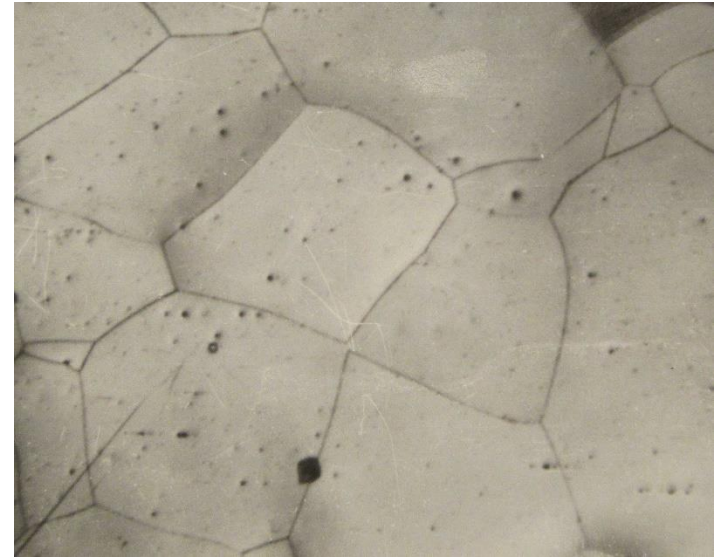
- Nyúlik, mint a rágógumi...
- Pattan, mint a labda...
- Szakad, mint a papír...
- Törik, mint a porcelán...

Fémes ötvözetek szuperképlékenysége

Szokásos polikritályos anyagok:

-Durva szemcseszerkezetű:
átlagos szemcseméret:
50-300 mikrométer

-Csak kismértékben
alakítható: 5-30%



----- = 100 mikron

Al-5.7Zn-1.9Mg-1.4Cu

Fémes ötvözetek szuperképlékenysége

Finomszemcsés anyagok:

- Átlagos szemcseméret < 10 mikron
- Megfelelően magas hőmérsékleten, megfelelő diffúzió biztosításával
- Megfelelő deformációs sebességgel

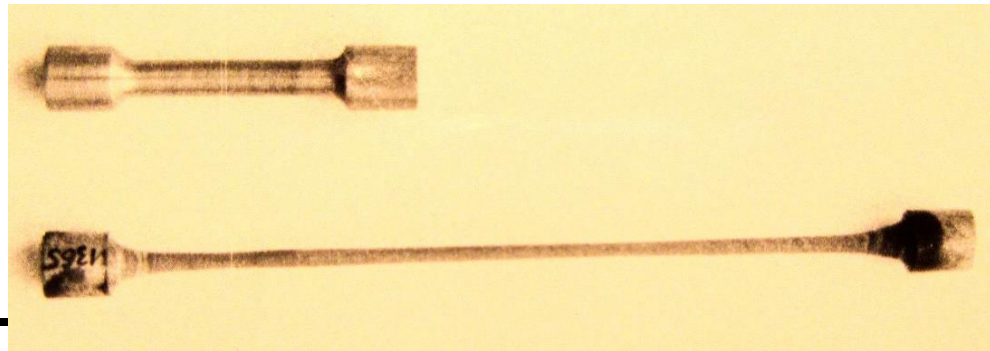


----- = 100 mikron

Al-5.7Zn-1.9Mg-1.4Cu-0.14Zr

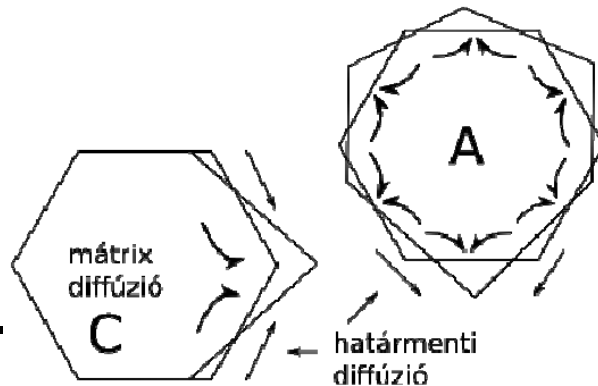
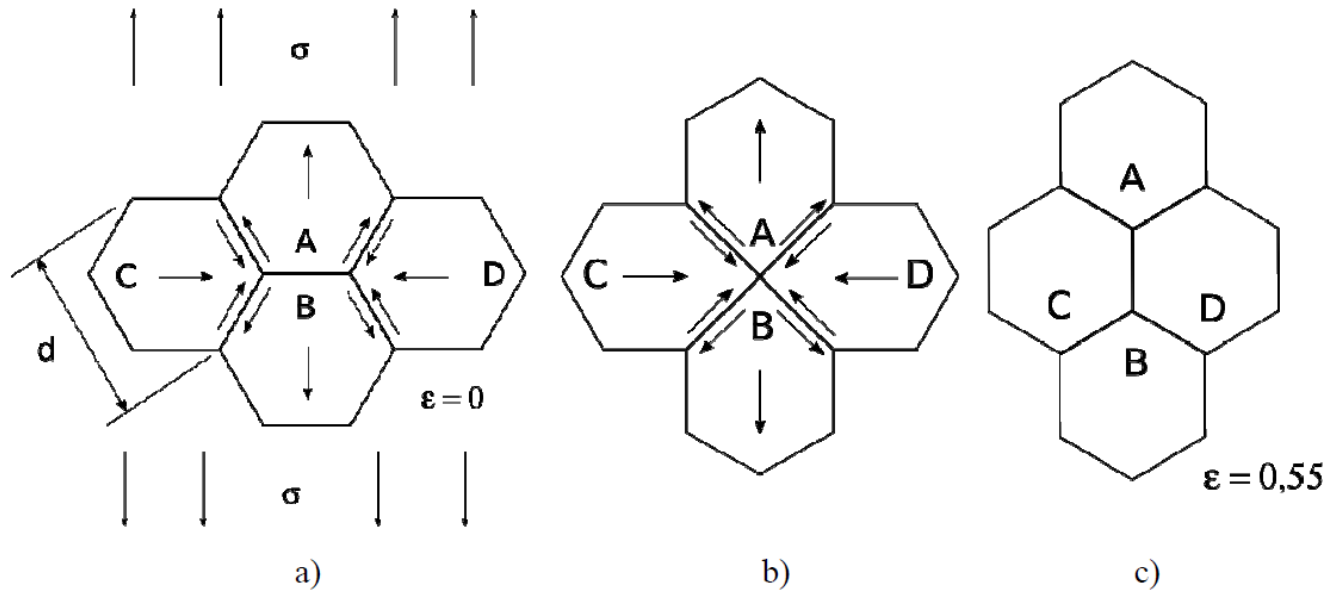
Nagy lehet a deformáció, $> 50\%$

Szuperképlékenység: $> 100\%$



Fémes ötvözetek szuperképlékenysége

-Szuperképlékenység alapmechanizmusa: Szemcsehatár-csúszás

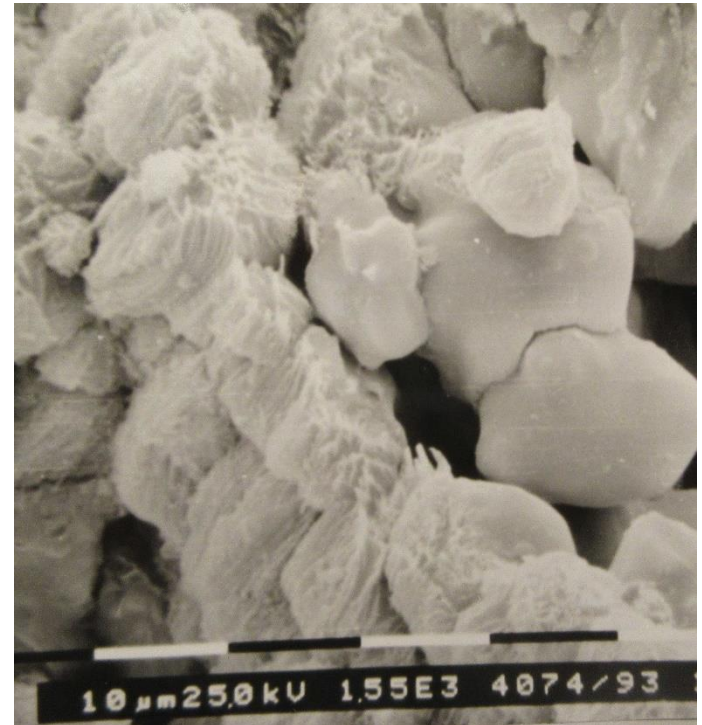
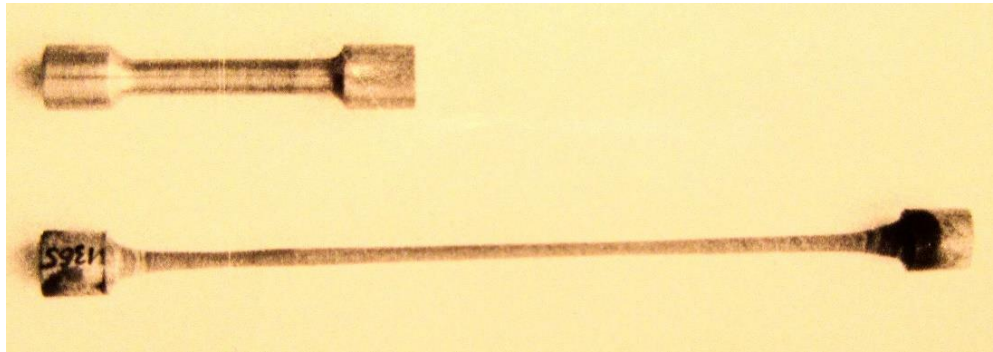


A diffúzió által szabályozott szemcsehatár-csúszás modellje
M.F. Ashby, R. A. Verral, Acta Metall. 21 (1973) 156.



Fémes ötvözetek szuperképlékenysége

-Szuperképlékenység alapmechanizmusa:
Szemcsehatár-csúszás

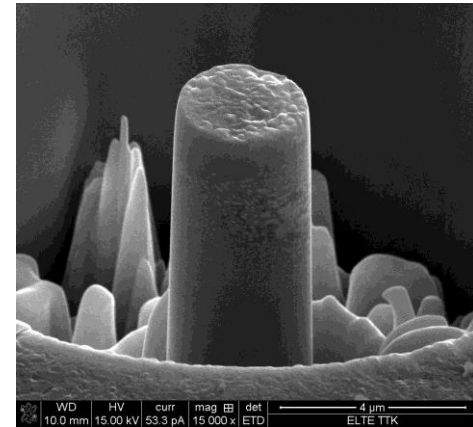
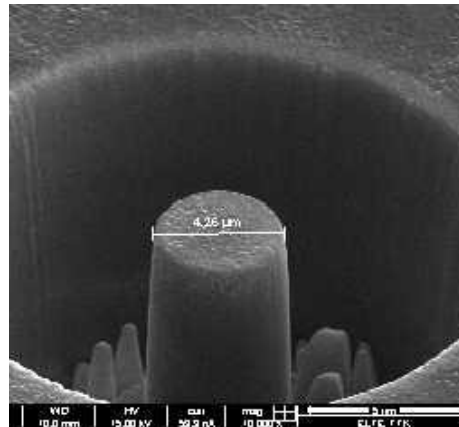
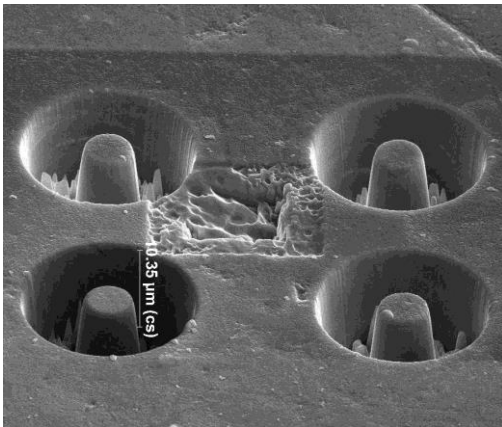


Töretfelület,
(Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel (SEM))

Fémes ötvözetek szuperképlékenysége

-Szuperképlékenység alapmechanizmusa:
Szemcsehatár-csúszás

Kísérleti vizsgálat: mikro-oszlopok összenyomása



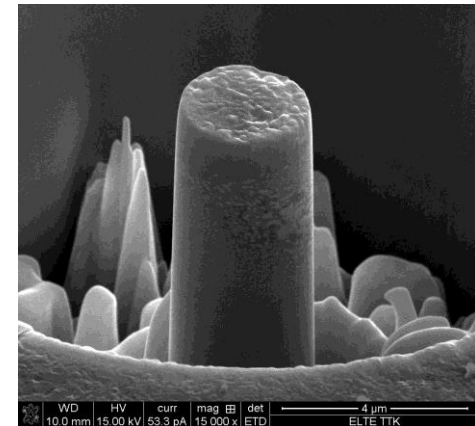
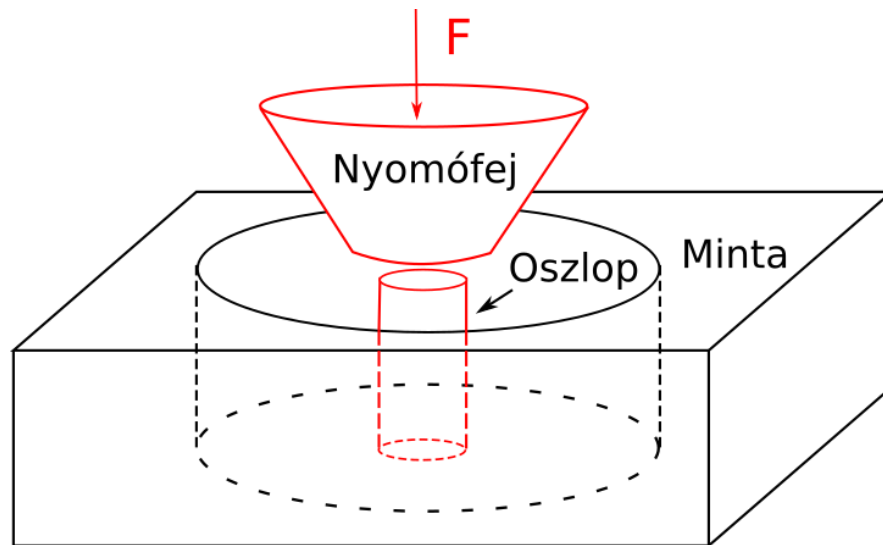
3 μm átmérőjű,
10 μm magas

MRS Communications 2 (2012) 75-78.,
Adv. Eng. Mater. 16 (2014) 1000-1007.

Fémes ötvözetek szuperképlékenysége

-Szuperképlékenység alapmechanizmusa:
Szemcsehatár-csúszás

Kísérleti vizsgálat: mikro-oszlopok összenyomása

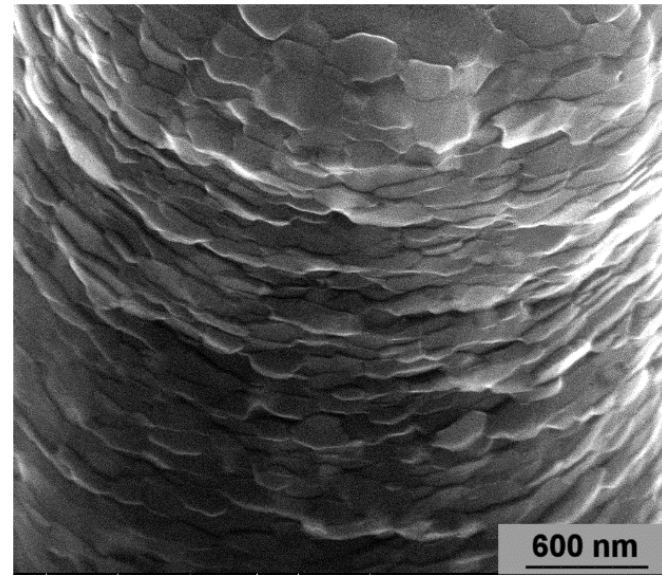
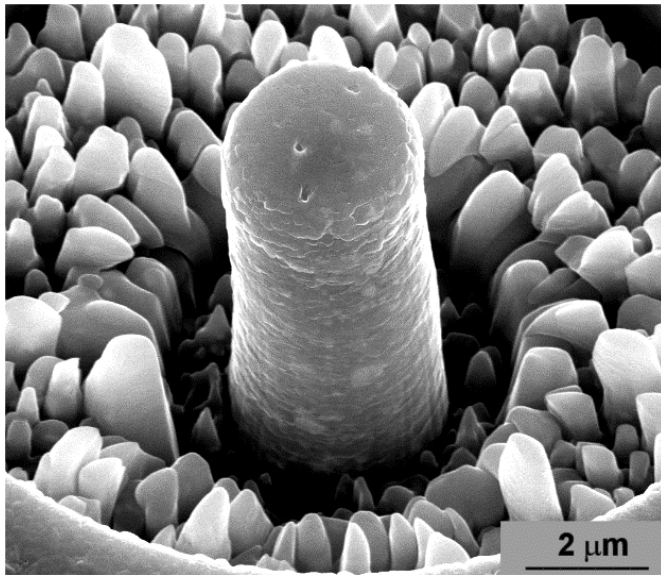


3 μm átmérőjű,
10 μm magas

MRS Communications 2 (2012) 75-78.,
Adv. Eng. Mater. 16 (2014) 1000-1007.

Fémes ötvözetek szuperképlékenysége

-Szuperképlékenység alapmechanizmusa: Szemcsehatár-csúszás



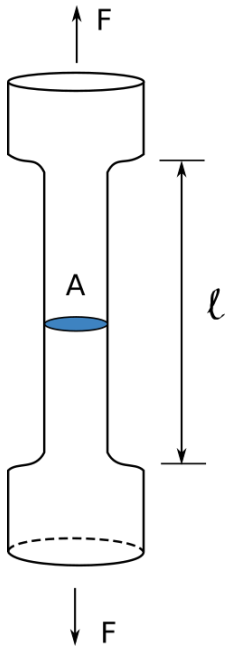
Összenyomott mikro-oszlop felülete, (Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel (SEM))

MRS Communications 2 (2012) 75-78.,
Adv. Eng. Mater. 16 (2014) 1000-1007.
Mater. Lett. 186 (2017) 334- 337.

Sebességfüggő folyamatok

Plasztikus instabilitás

- Ötvözetekben
- Alapjelenség anyagfizikában
- Ötvöző atomok diffúziója kristályrácsban

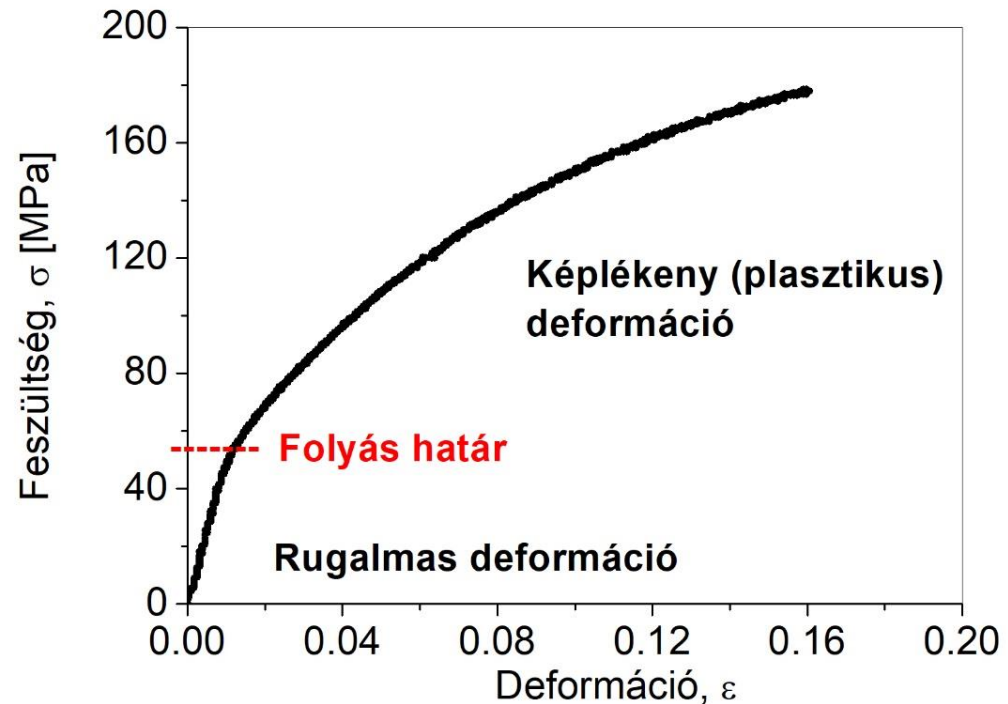


Feszültség:

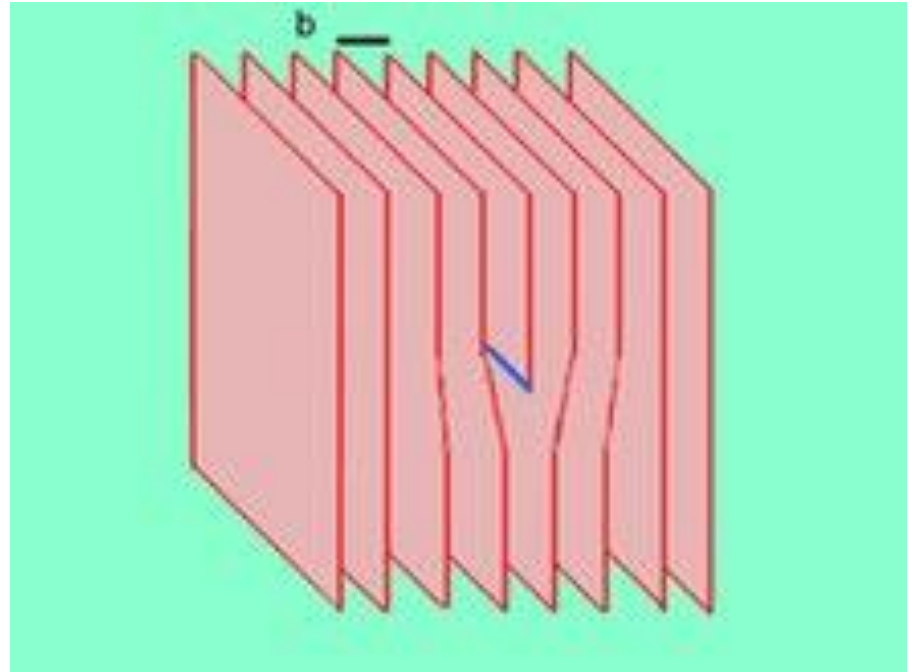
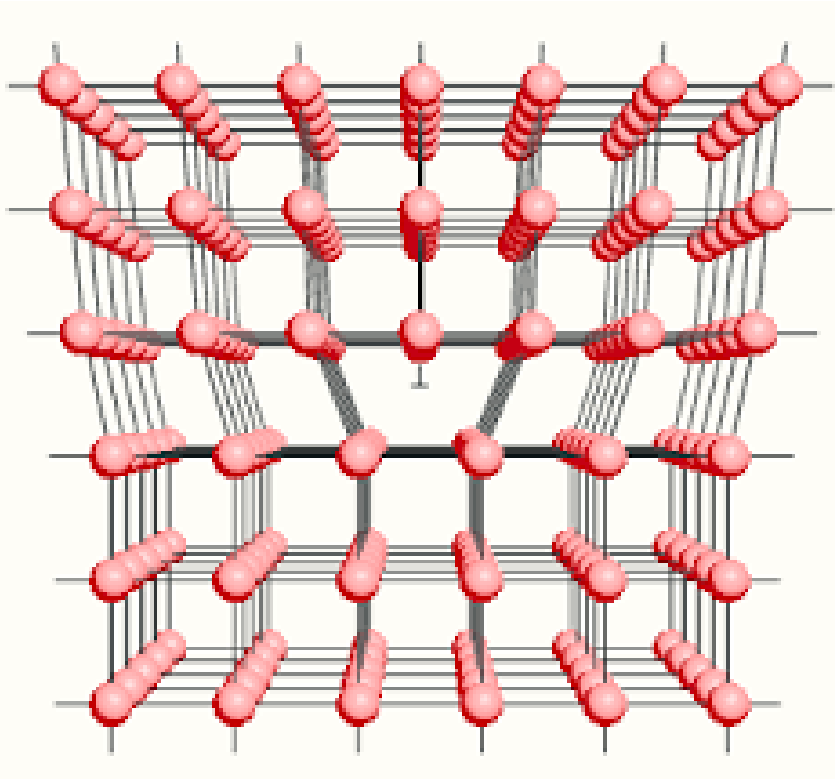
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Deformáció:

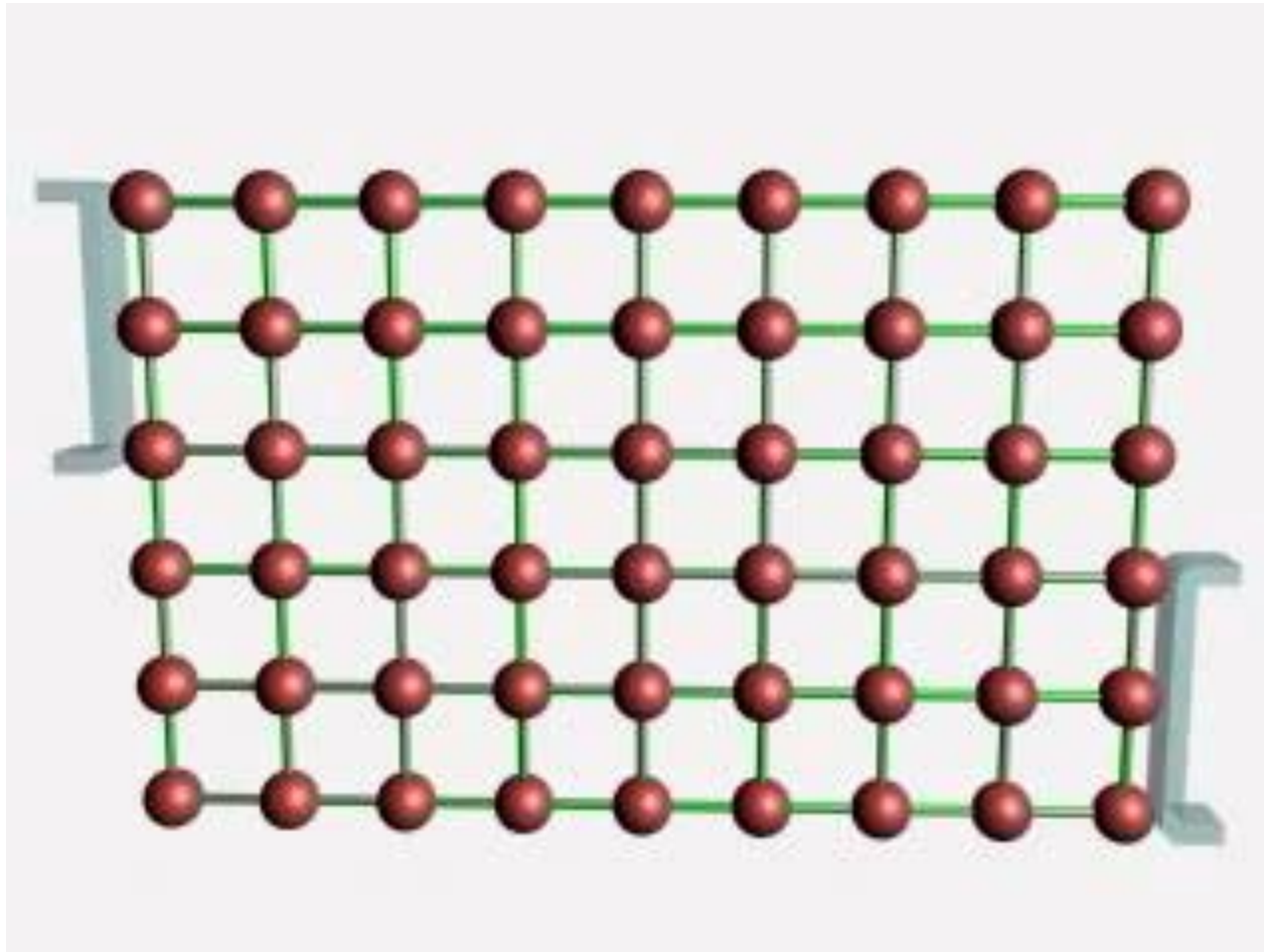
$$\varepsilon = \ln \left(\frac{l}{l_0} \right)$$



Képlékeny deformáció „közvetítője”: **diszlokáció**



Képlékeny deformáció „közvetítője”: **diszlokáció** **diszlokáció-mozgás**

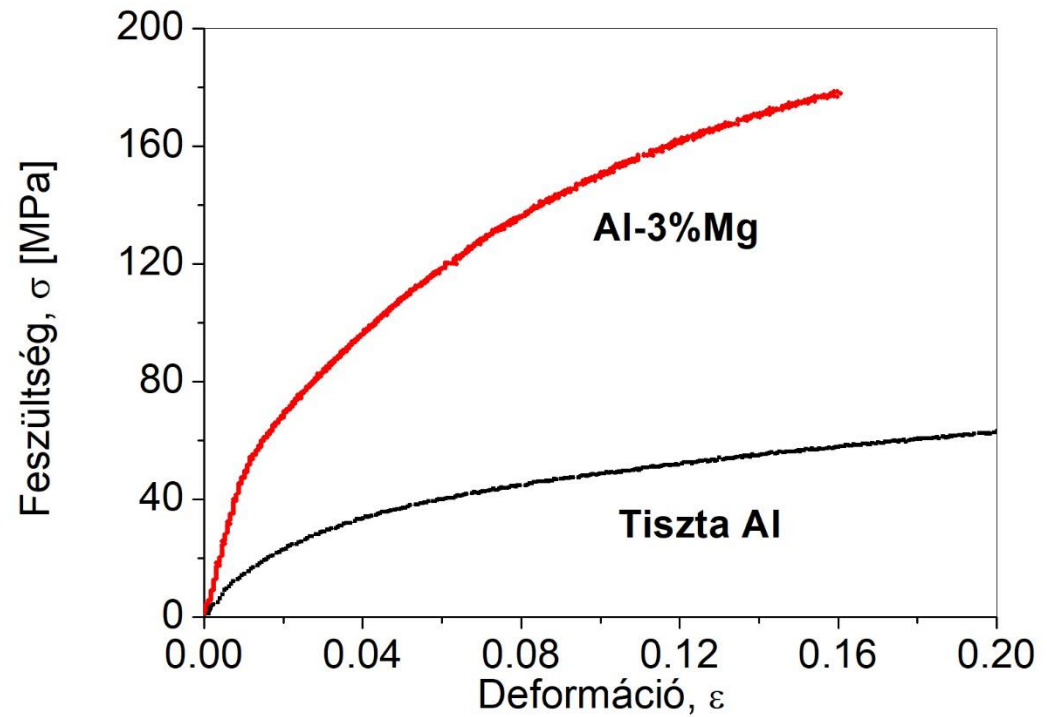


Sebességfüggő folyamatok

Plasztikus instabilitás

- Ötvözetekben
- Alapjelenség anyagfizikában
- Ötvöző atomok diffúziója kristályrácsban

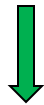
Ötvöző atomok
szilárdságnövelő
hatása



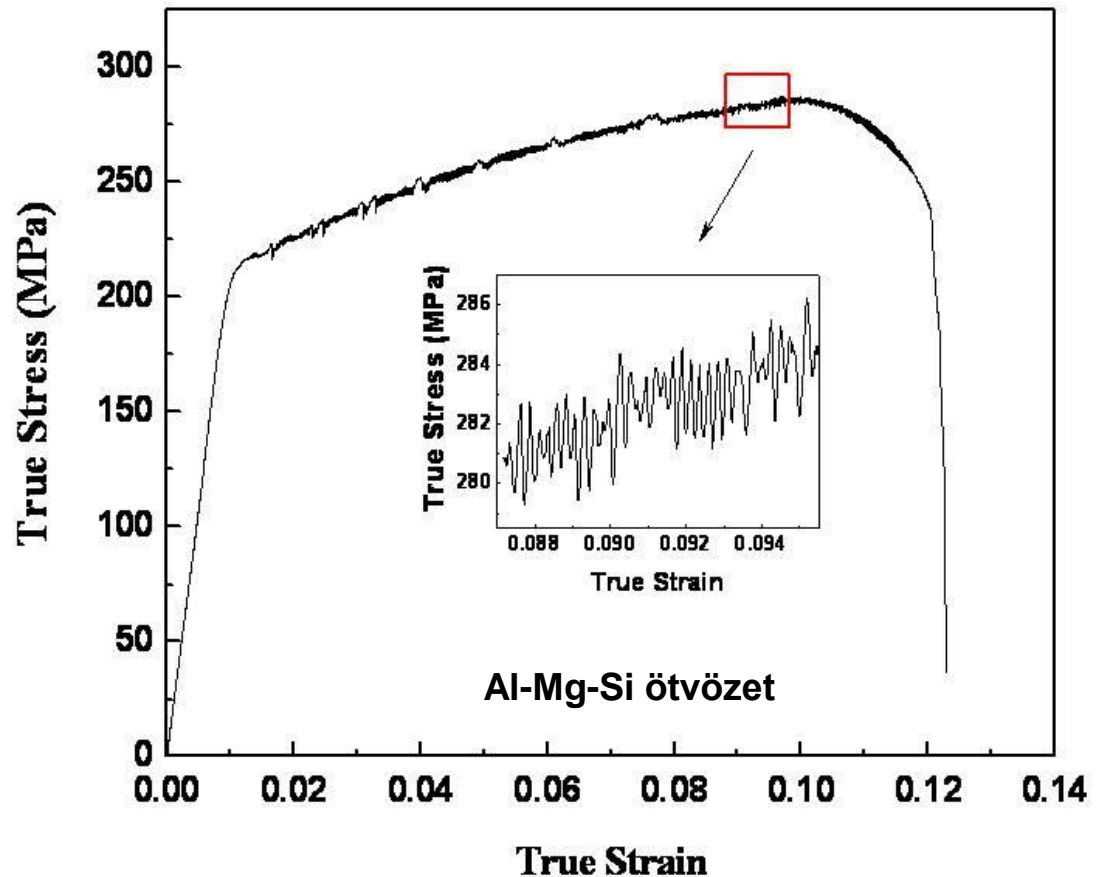
Sebességfüggő folyamatok

**Plasztikus
Instabilitás
Al ötvözetek
deformációjában**

*Állandó sebességgel
deformálva*



Feszültség-esések, $\Delta\sigma$



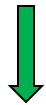
Portevin – Le Châtelier – effektus (1923)

A. Portevin and F. Le Chatelier, Compt. Rend. Acad. Sci. Paris 176 (1923) 507.

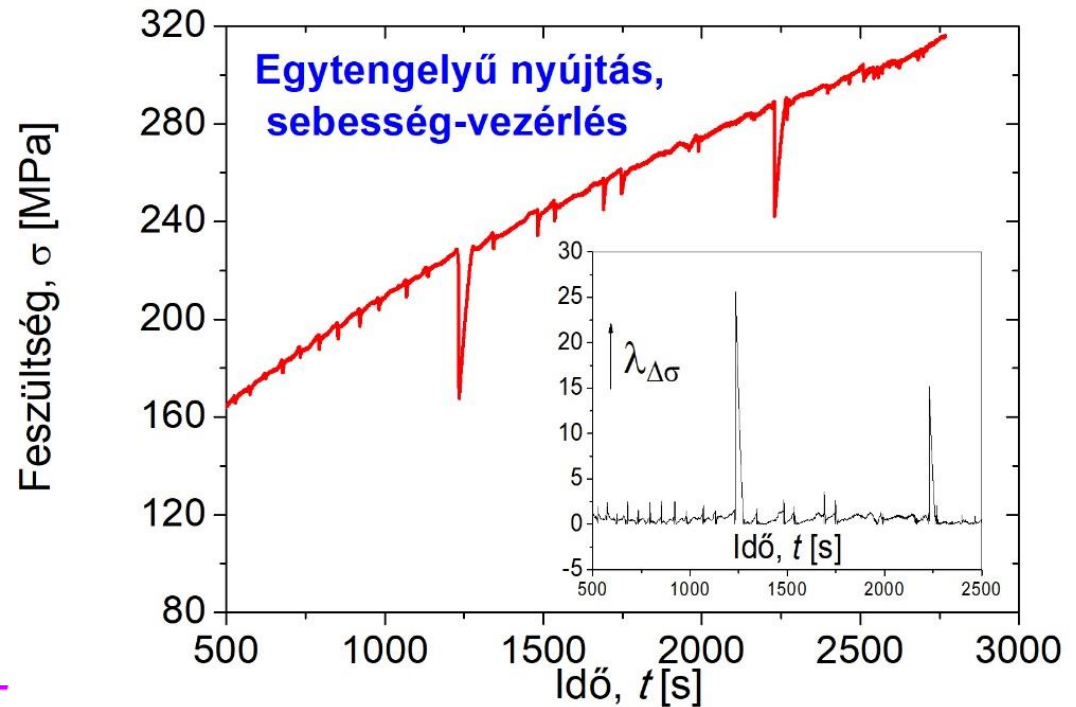
Sebességfüggő folyamatok

**Plasztikus
Instabilitás
Al ötvözetek
deformációjában**

*Állandó sebességgel
deformálva*



Feszültség-esések, $\Delta\sigma$



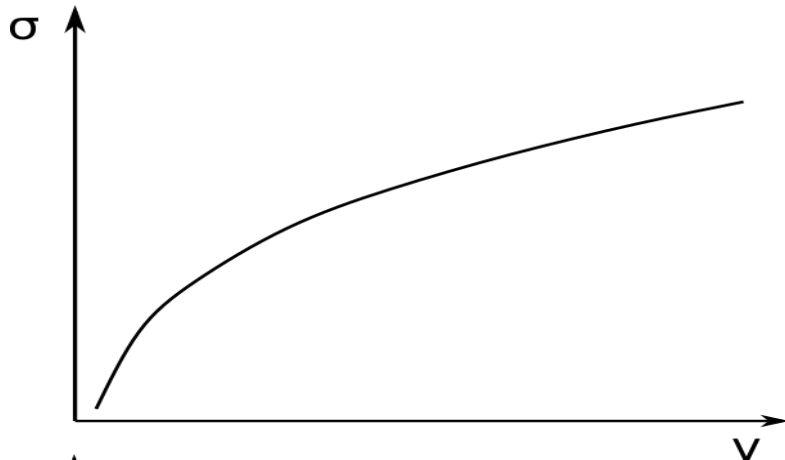
Al-1.2%Zn-4.8%Mg-0.14Zr

MRS Communications 2 (2012) 1-4.

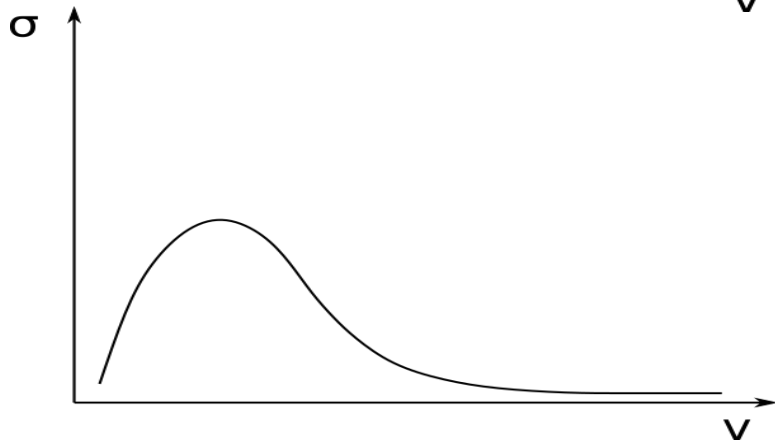
Sebességfüggő folyamatok

Plasztikus instabilitás alapmechanizmus:

**Diszlokációk és ötvöző atomok
dinamikus, sebességfüggő kölcsönhatása**



**diszlokáció-diszlokáció
kölcsönhatás**

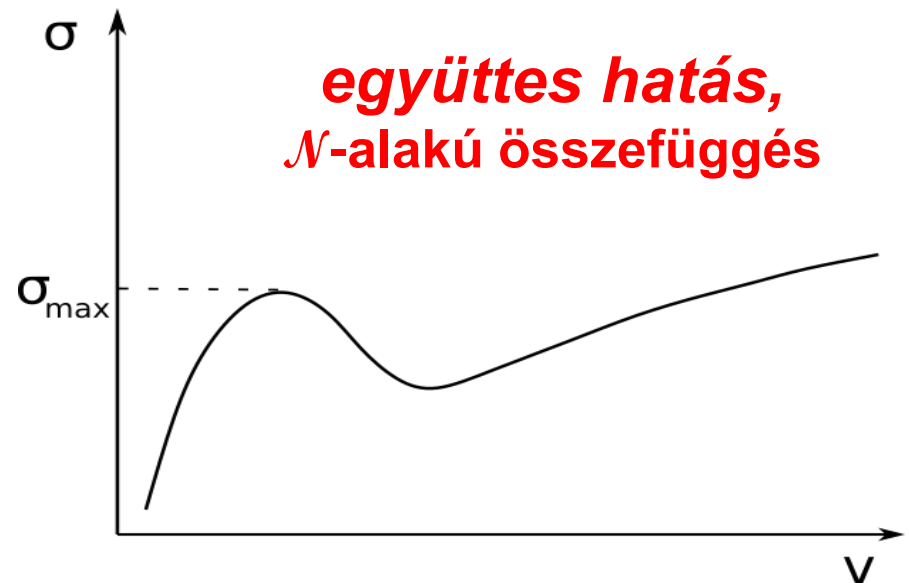
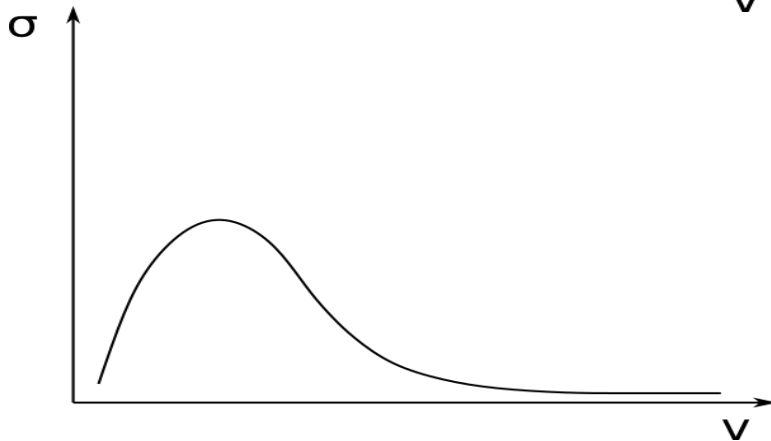
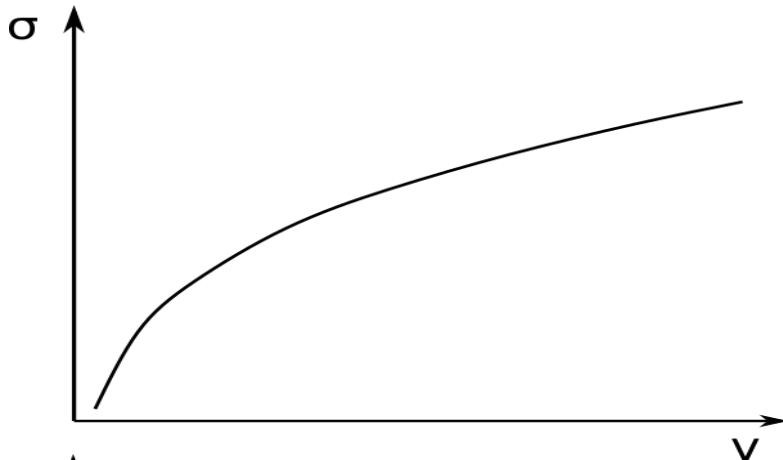


**diszlokáció-ötvöző
kölcsönhatás**

Sebességfüggő folyamatok

Plasztikus instabilitás alapmechanizmus:

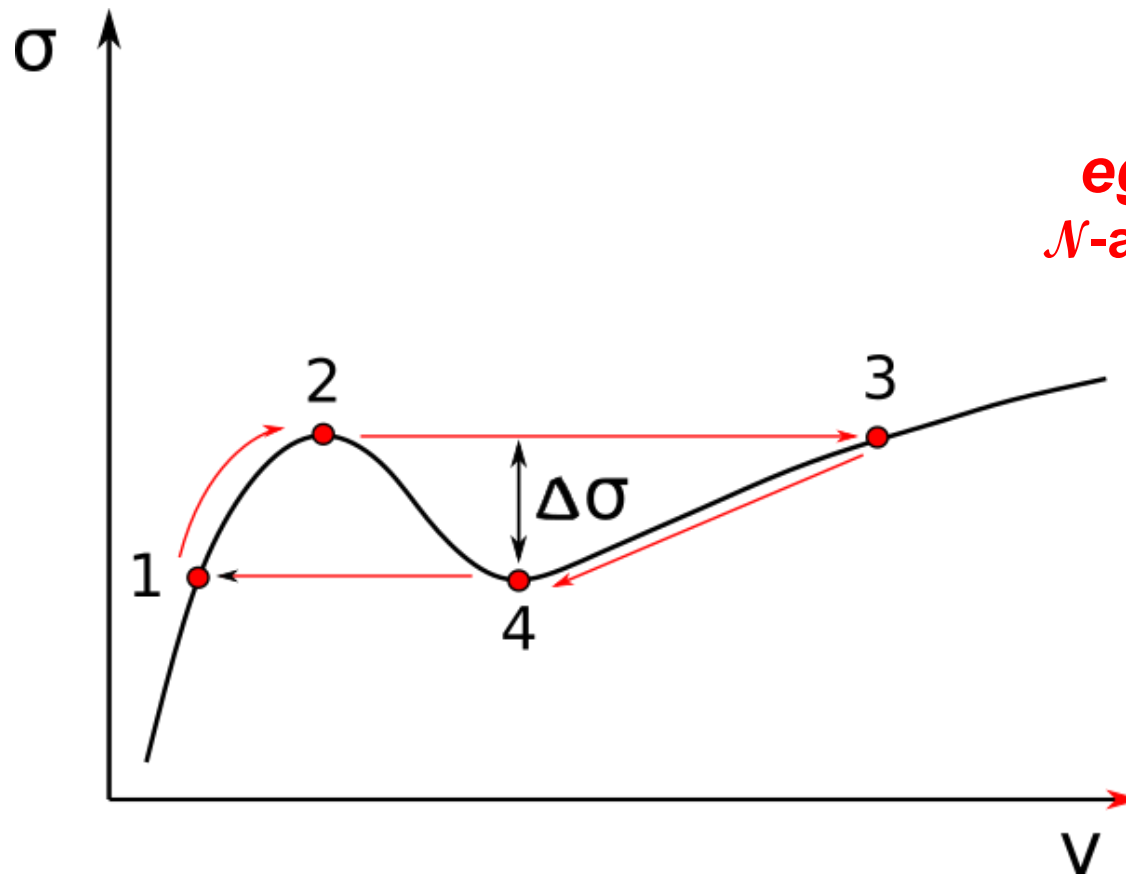
Diszlokációk és ötvöző atomok
dinamikus, sebességfüggő kölcsönhatása



Sebességfüggő folyamatok

Plasztikus instabilitás alapmechanizmus:

Diszlokációk és ötvöző atomok
dinamikus, sebességfüggő kölcsönhatása

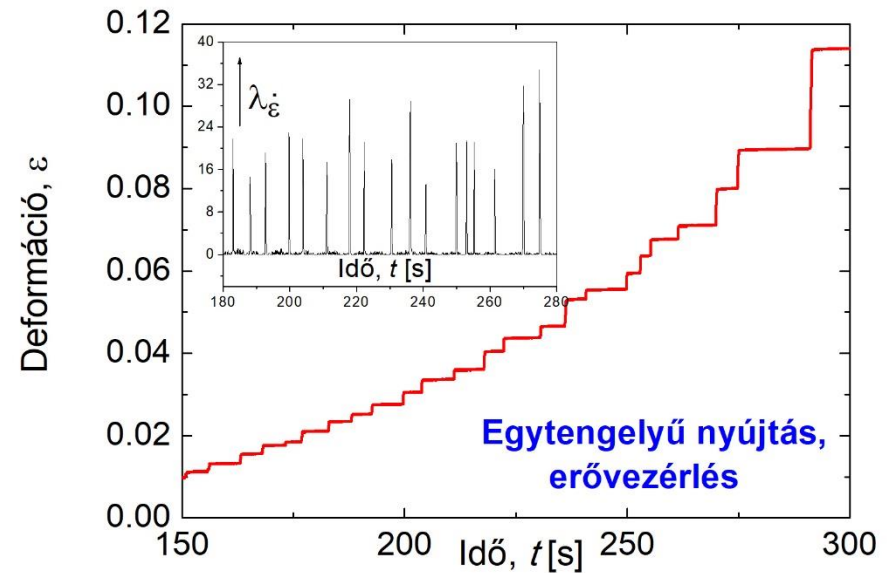
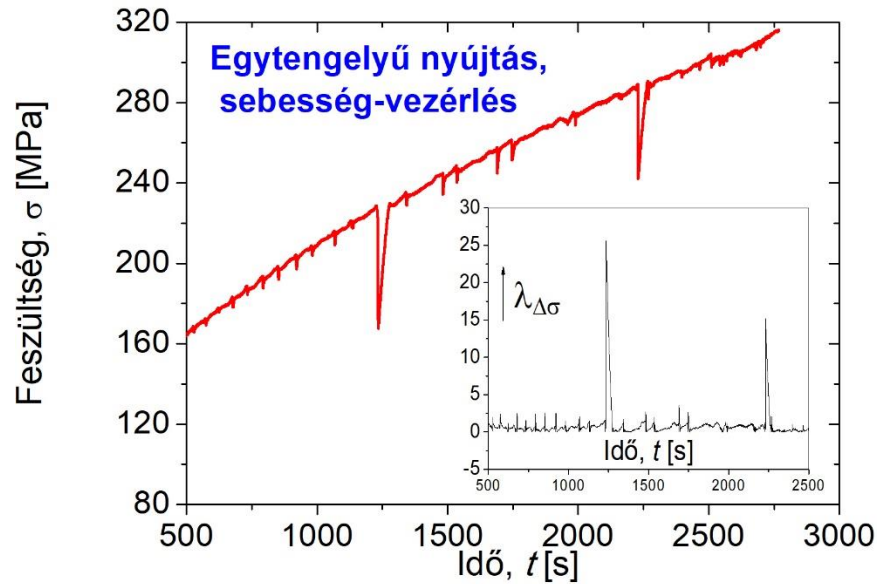


**együttes hatás,
 \mathcal{N} -alakú összefüggés**

Sebességfüggő folyamatok

Plasztikus instabilitás különböző módokban:

-Egytengelyű nyújtás:



Al-1.2%Zn-4.8%Mg-0.14Zr

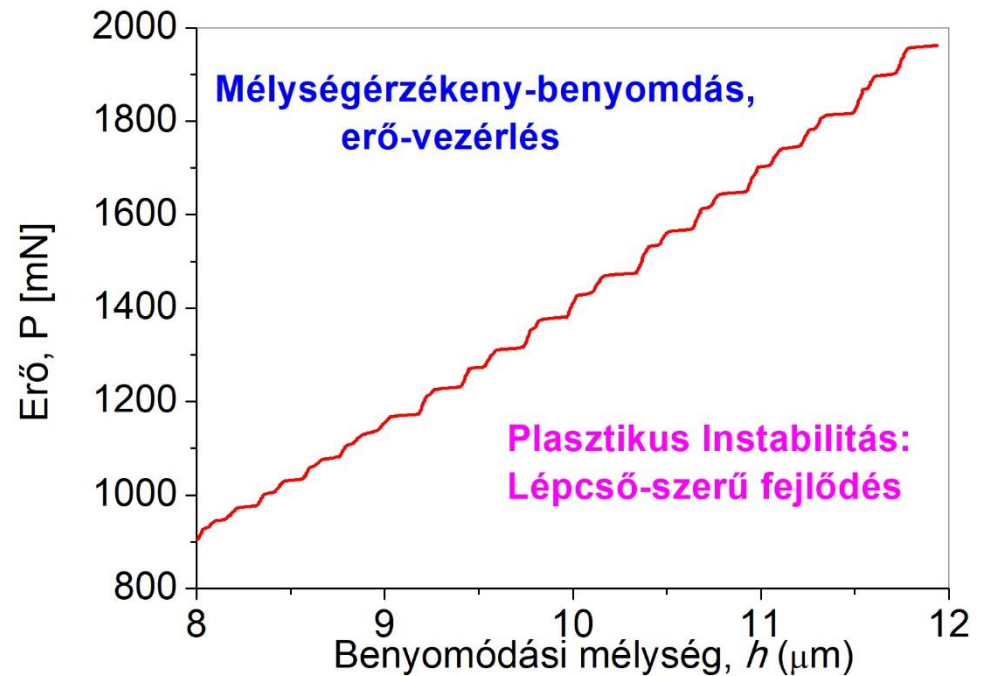
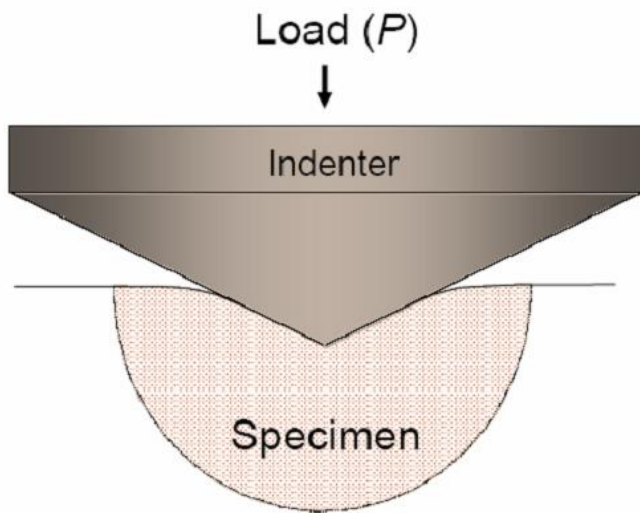
MRS Communications 2 (2012) 1-4.



Sebességfüggő folyamatok

Plasztikus instabilitás különböző módokban:

-Mélységérzékeny benyomódás:



Acta Mater. 46 (1998) 2029-2037.

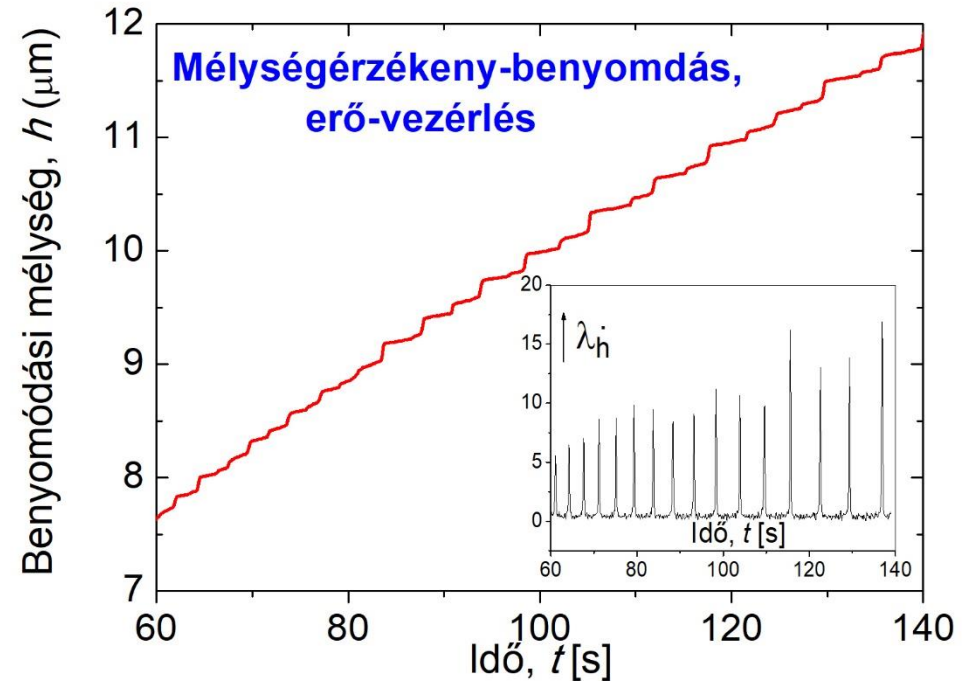
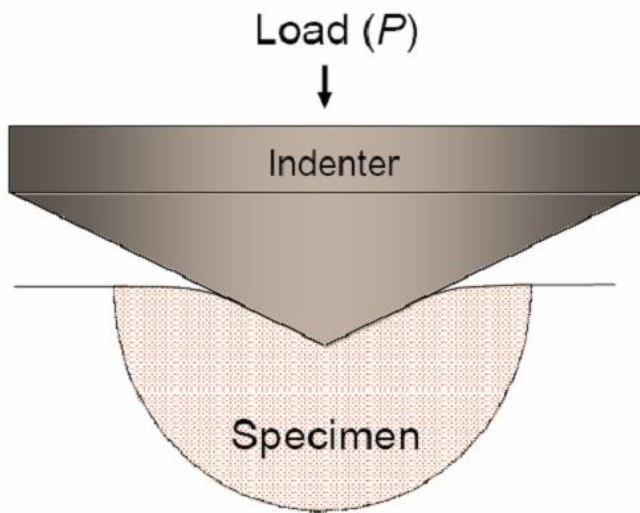
J. Mat. Research 13 (1998) 1411-1413.

Al-1.2%Zn-4.8%Mg-0.14Zr

Sebességfüggő folyamatok

Plasztikus instabilitás különböző módokban:

-Mélységérzékeny benyomódás:

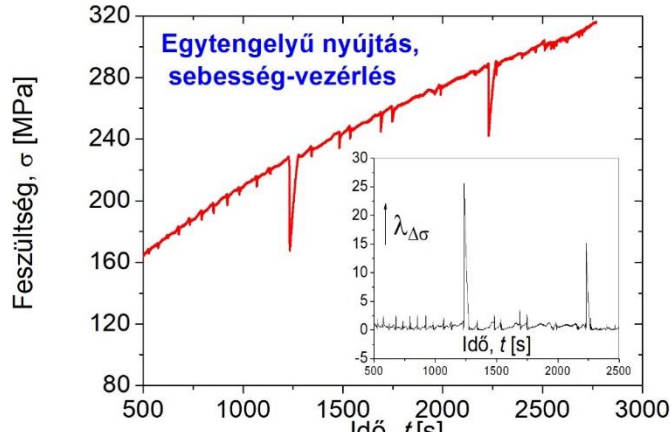


Al-1.2%Zn-4.8%Mg-0.14Zr

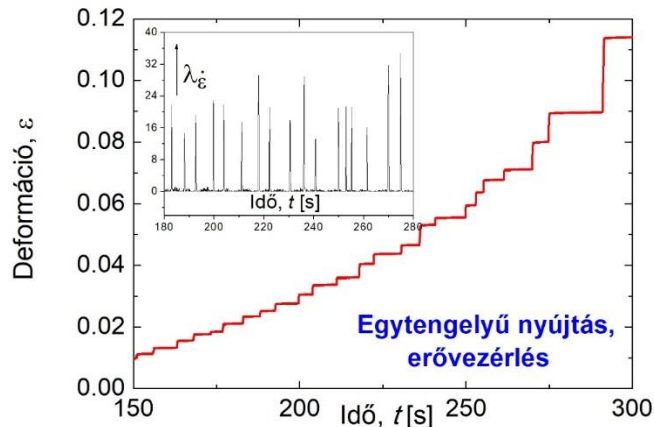
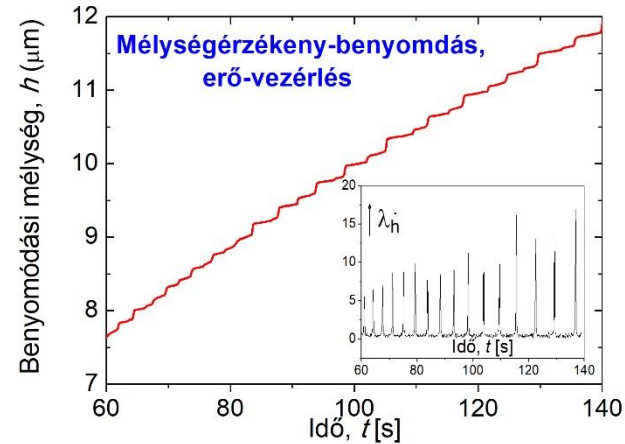
Sebességfüggő folyamatok

Plasztikus instabilitás különböző módokban:

-Egytengelyű nyújtás:



-Mélységérzékeny benyomódás:



Benyomódási térfogat kb. $125 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$

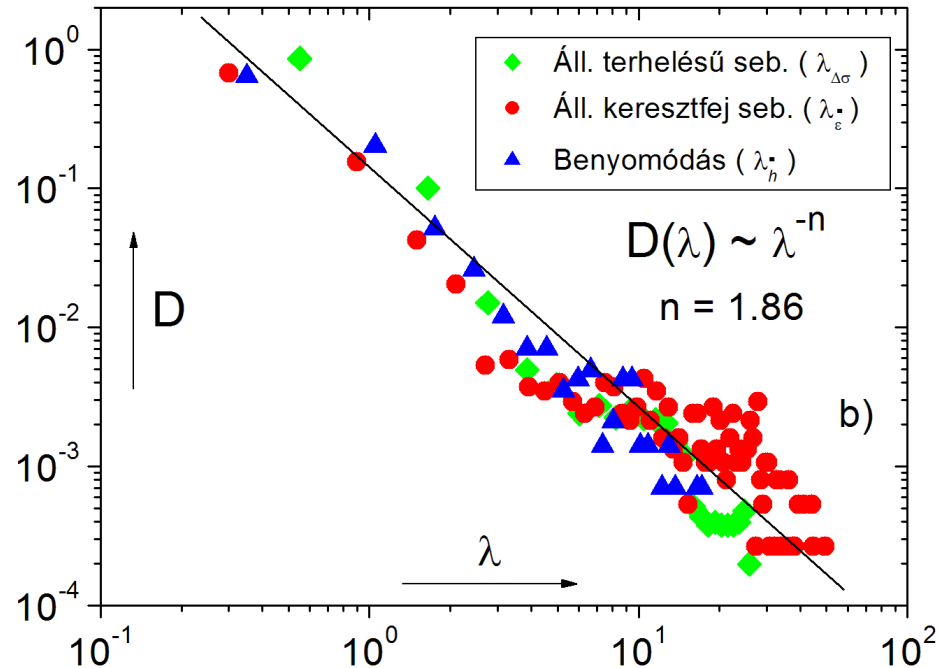
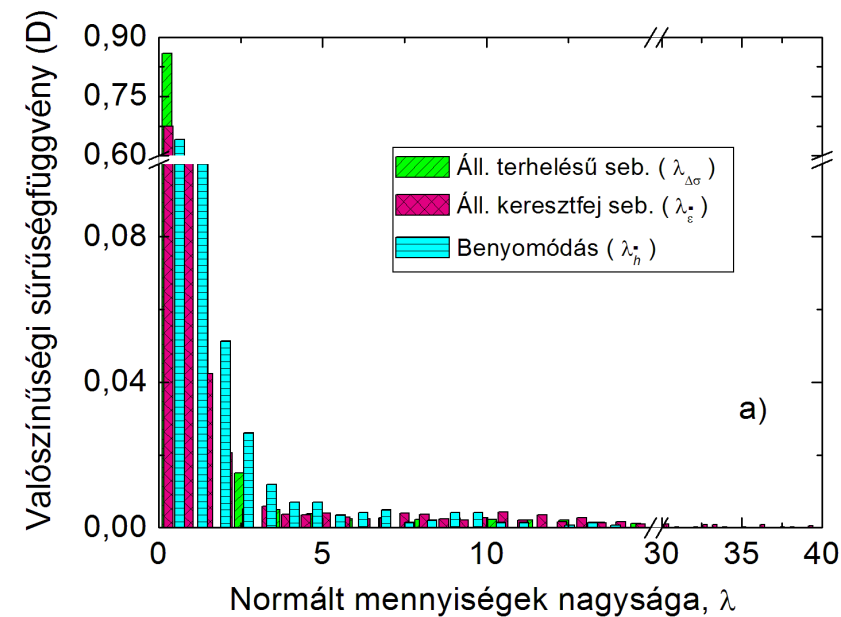
***Nyújtási minta: 4 mm átmérőjű, 30 mm hosszú,
Deformált térfogat kb. 370 mm^3***

MRS Communications 2 (2012) 1-4.

Sebességfüggő folyamatok

Plasztikus instabilitás különböző módokban:

Azonos „rengés” statisztikával



MRS Communications 2 (2012) 1-4.

Al-1.2%Zn-4.8%Mg-0.14Zr



Anyagfizikai Tanszék
Eötvös Loránd Tudományegyetem

Sebességfüggő folyamatok

Plasztikus instabilitás különböző módokban:

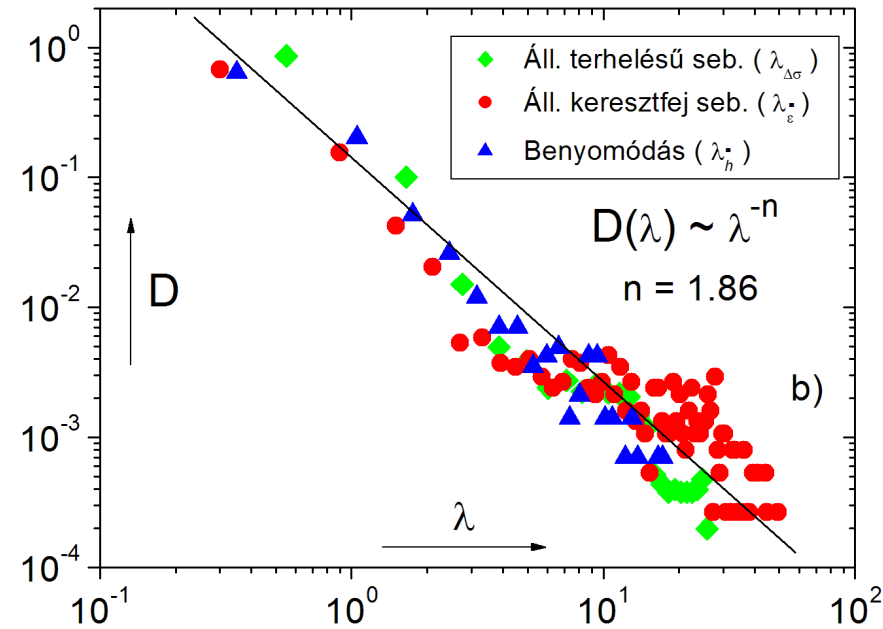
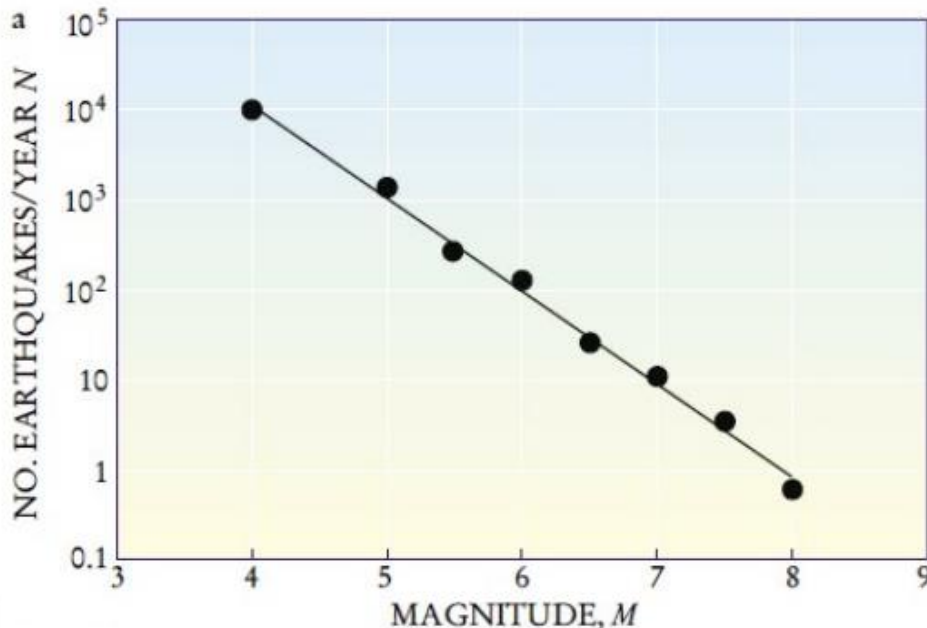
Azonos „rengés” statisztikával

Földrengés statisztikák:

Gutenberg-Richter törvény:

$$N_{>M} = 10^{a-bM}$$

M: magnitúdó (logaritmikus) $b \approx 1$



**Skálafüggetlen eloszlás:
események minden skálán**

MRS Communications 2 (2012) 1-4.

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája



Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

Alapkérdések:



-Miért kell lassan lehúzni
a szentakaró tapaszt (sebtapaszt)?

*-Miért kell gyorsan letépn
a szőrtelenítő gyantalapot?*

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

Válasz:



A kívánt hatások miatt:

- Szemöldököt nem szeretnénk lehúzni
- Szőrszálakat igen

Fizikai magyarázat???

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

Gyakorlati tapasztalatok:



A letépesi sebesség (v) és szükséges erő (F)
között van összefüggés

F-v összefüggés?

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

További tapasztalatok:



Lassan húzva: csendes + mattos szalagfelület

Gyorsan húzva: zajos + átlátszó szalagfelület



Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

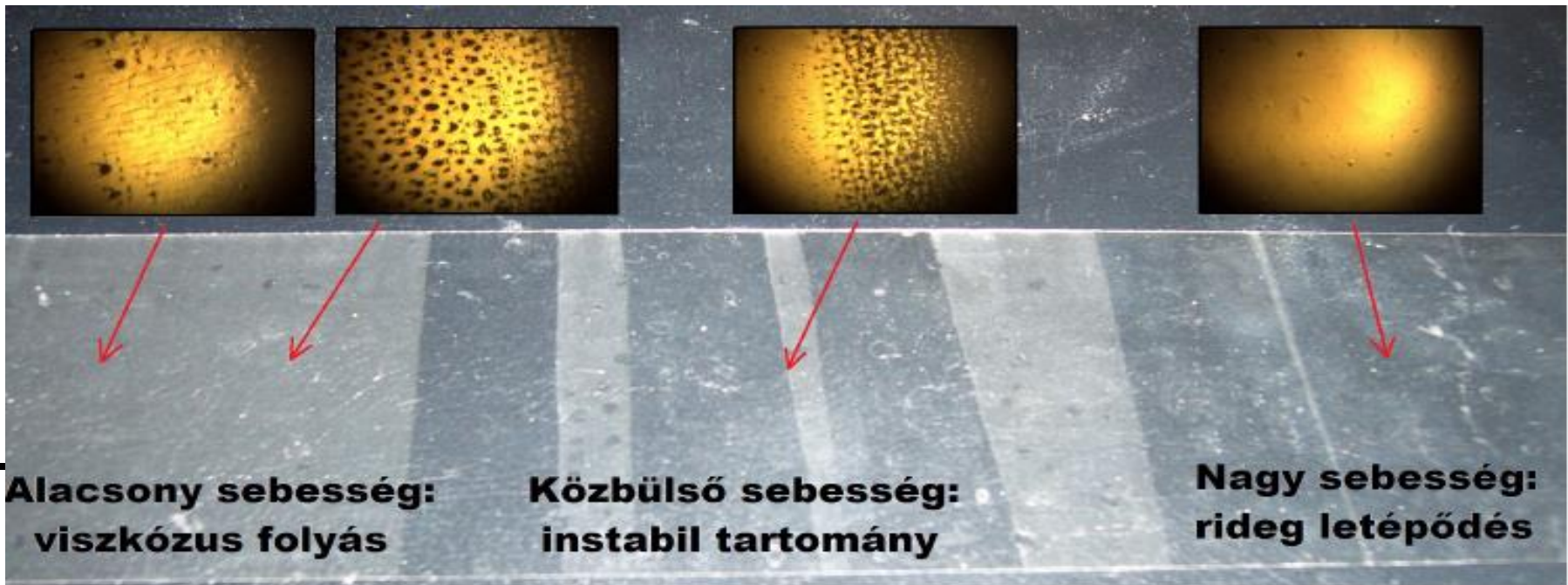
További tapasztalatok:



Lassan húzva: csendes + mattos szalagfelület

Gyorsan húzva: zajos + átlátszó szalagfelület

„Közepesen” húzva: instabil + csíkos szalagfelület



Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája



Szisztematikus vizsgálatok:

3 féle szalag,

20-60 Celsius hőmérséklettartományban,

állandó v -vel húzva \longrightarrow F erő mérése,

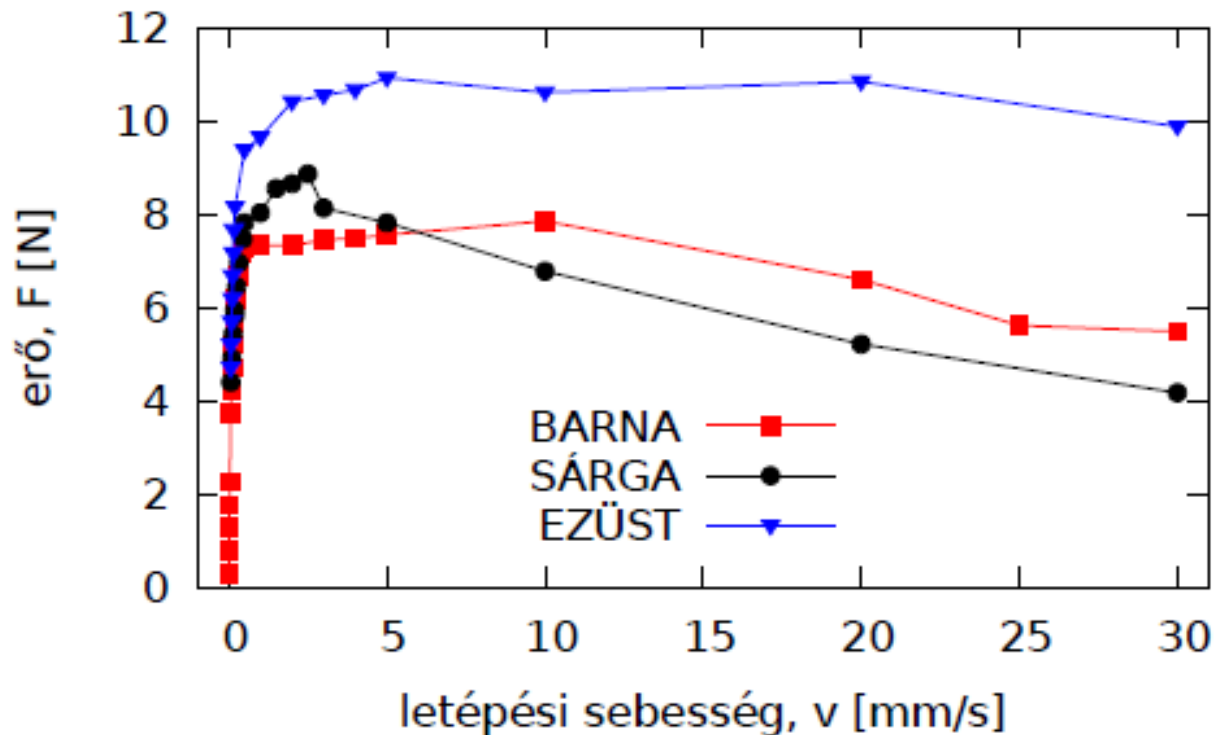
állandó F -fel húzva \longrightarrow v sebességmérése

F-v összefüggés elemzése

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

Erő-sebesség ($F-v$) összefüggések:



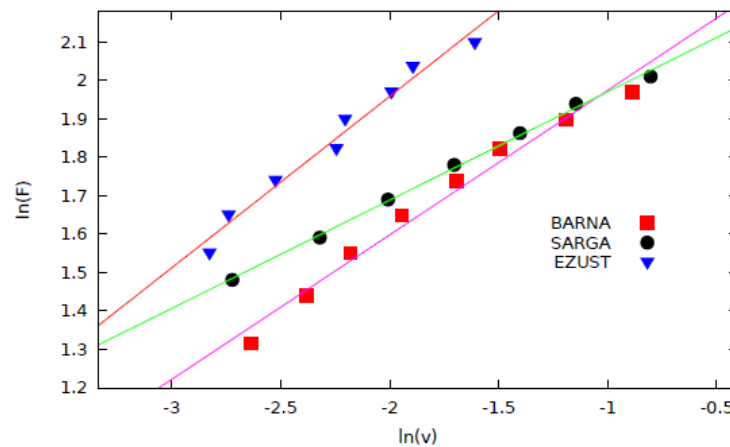
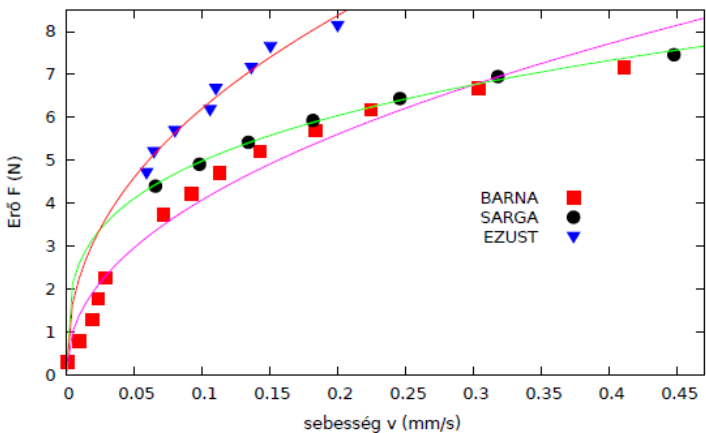
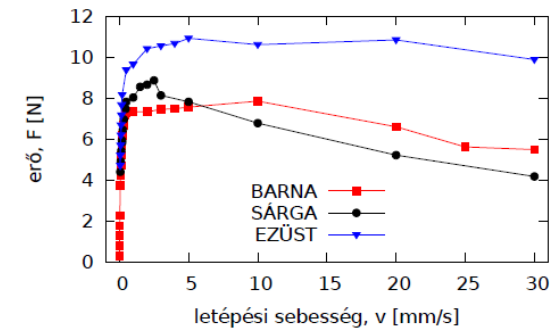
Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

Erő-sebesség (F-v) összefüggések:

Kis sebességeknél, $v < 1\text{ mm/s}$:

$$F \propto v^n$$



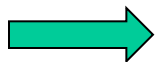
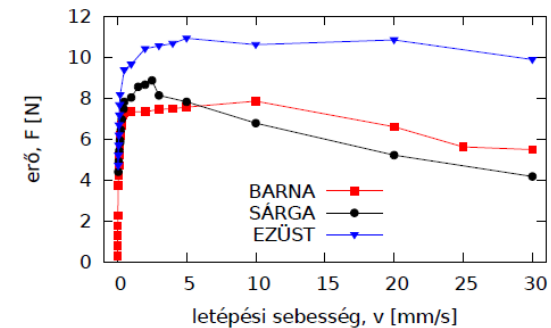
Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

Erő-sebesség (F - v) összefüggések:

Kis sebességeknél, $v < 1$ mm/s:

$$F \propto v^n$$



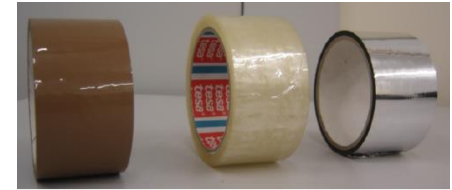
A töltőanyag viszkózusan folyik,
és úgy hagyja el a tekercset,
hogy közben bezár apró levegő buborékokat

Nagyon lassú letépéshez szükséges erő nagyon kicsi

Sebességfüggő folyamatok

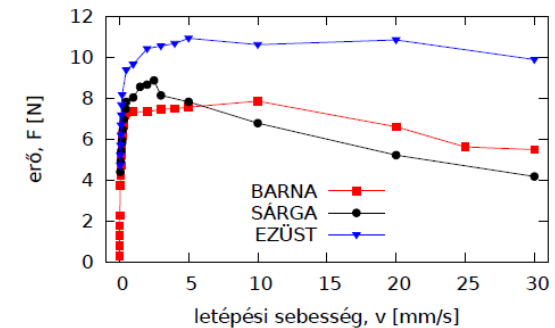
Ragasztószalagok leválásának dinamikája

Erő-sebesség ($F-v$) összefüggések:



Nagy sebességeknél, $v > 5$ mm/s:

Viszonylag nagy erő szükséges,
Nem nagyon függ a sebességtől



(zajosan, tiszta - átlátszó - lehúzott felülettel)

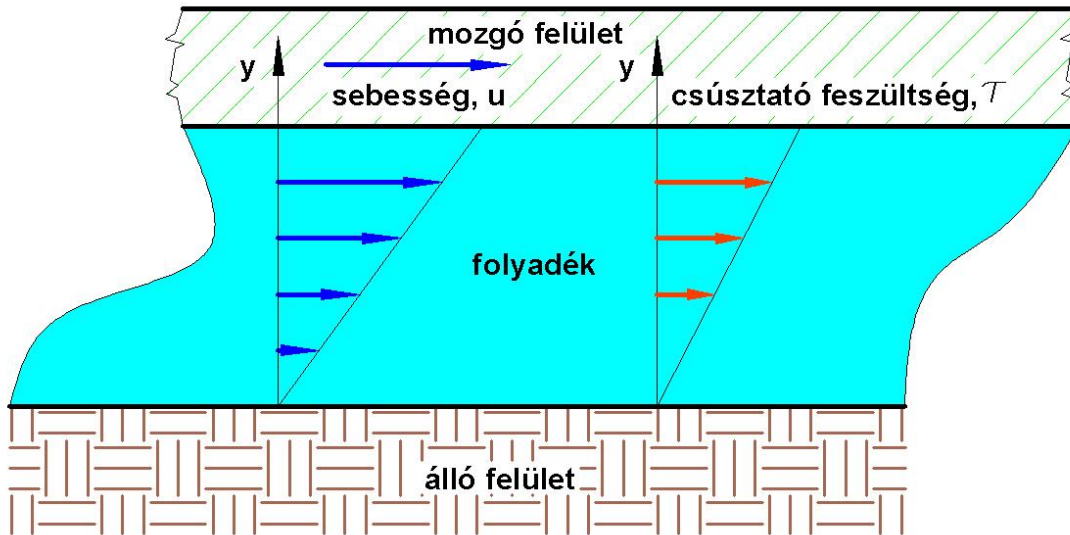


A töltőanyag a szilárd testekre jellemzőan
„ridegen” válik le a tekercsről

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

Nagy sebességeknél, $v > 5$ mm/s:



(Wikipédiából vett kép)

Rideg leválás, mert nagy a belső súrlódás

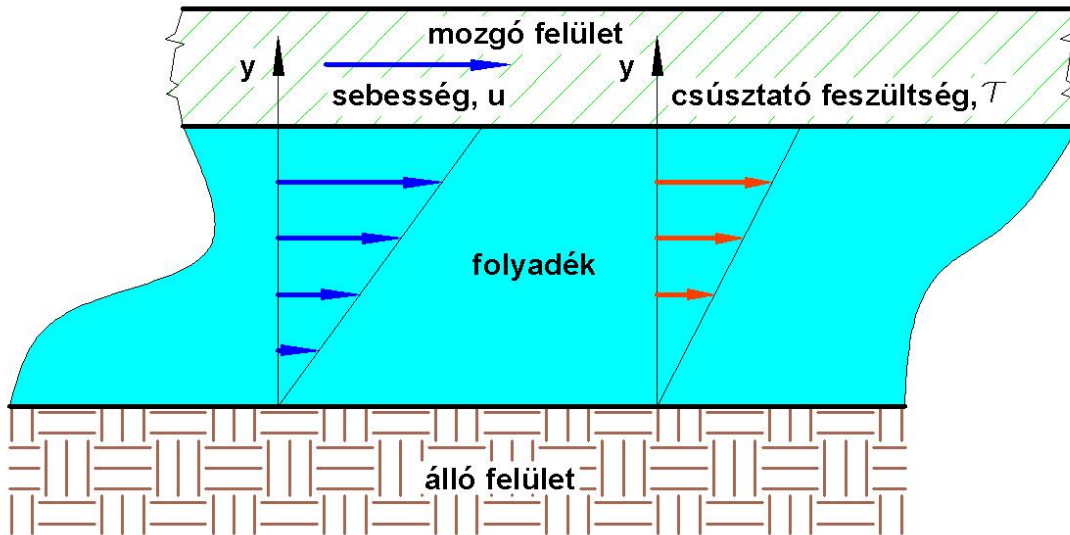
$$F_s = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

Newton-féle belső súrlódási törvény

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

Nagy sebességeknél, $v > 5 \text{ mm/s}$:



(Wikipédiából vett kép)

Rideg leválás, mert nagy a belső súrlódás

$$F_s = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

Newton-féle belső súrlódási törvény

A töltőanyag vastagsága: $\Delta y \approx 50 \mu\text{m} = 5 \cdot 10^{-5} \text{m}$

Kívül: $v = 5 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, Belül: $v \approx 0$, $\Delta v \approx 5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$

→ $\frac{\Delta v}{\Delta y} \approx 100 \text{ s}^{-1}$, nagy érték → nagy F_s



Sebességfüggő folyamatok

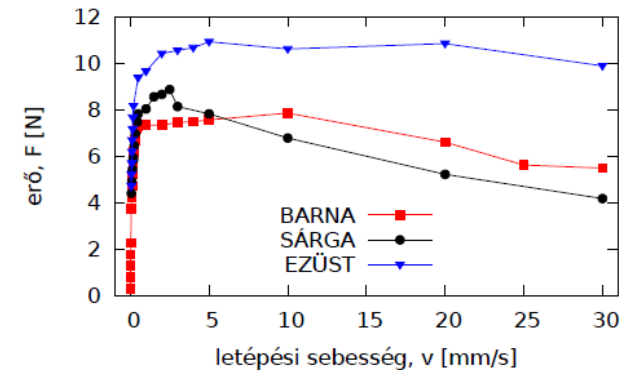
Ragasztószalagok leválásának dinamikája

Erő-sebesség ($F-v$) összefüggések:



Közbülső sebességeknél,
 $1\text{ mm/s} < v < 5\text{ mm/s}$:

Instabil, szaggatott folyamat
(csíkozott a lehúzott felület)



A töltőanyag váltakozva viszkózus folyással
vagy „ridegen” válik le a tekercsről

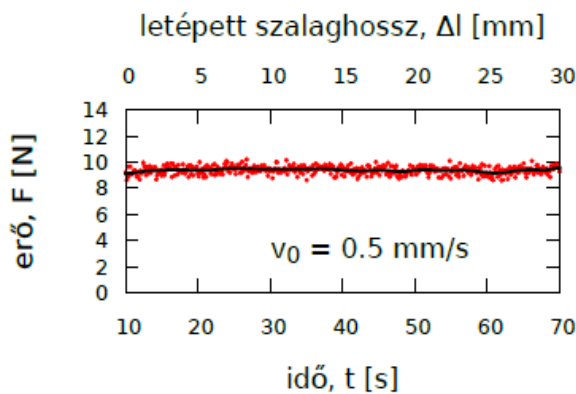
Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

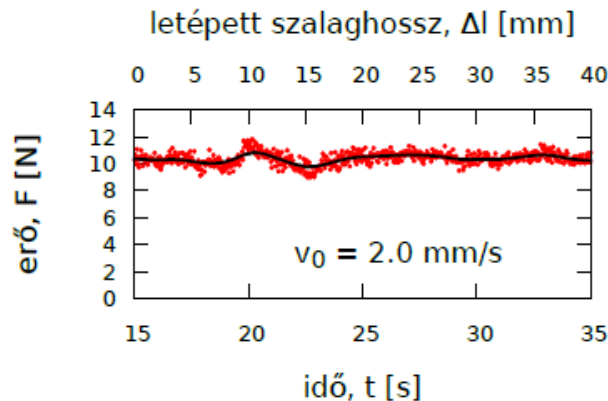
Erő-sebesség ($F-v$) összefüggések:



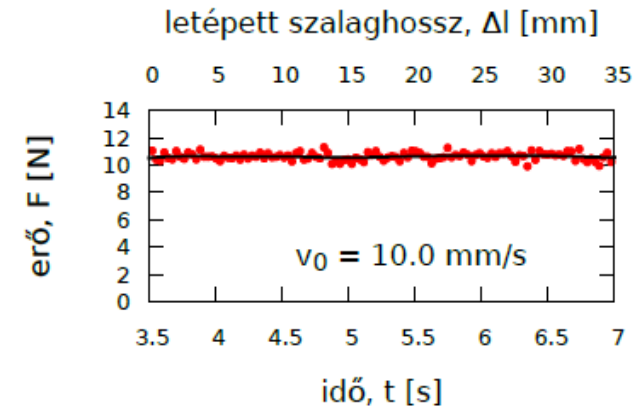
Közbülső sebességeknél,
 $1\text{ mm/s} < v < 5\text{ mm/s}$:



$v = 0.5\text{ mm/s}$,
stabil



$v = 2\text{ mm/s}$,
instabil



$v = 10\text{ mm/s}$,
stabil

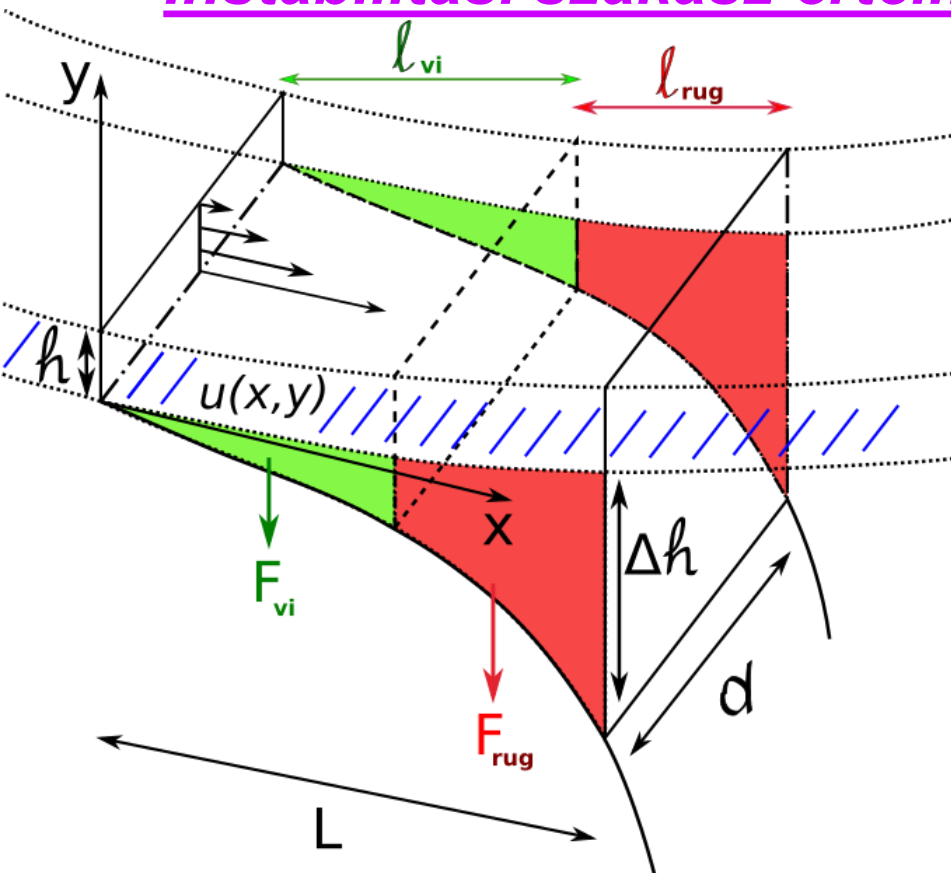
Az erő időbeli ingadozása beállított sebesség mellett

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

A leválási folyamatok egységes leírása

Instabilitási szakasz értelmezése:



-A viszkózus töltőanyag leválása egy meghatározott térrészben történik

-Különböző leválási sebességű – különböző mechanizmusra jellemző zónákra osztható

-A piros színű tartományban „rideg” leválással, F_{rug} erővel

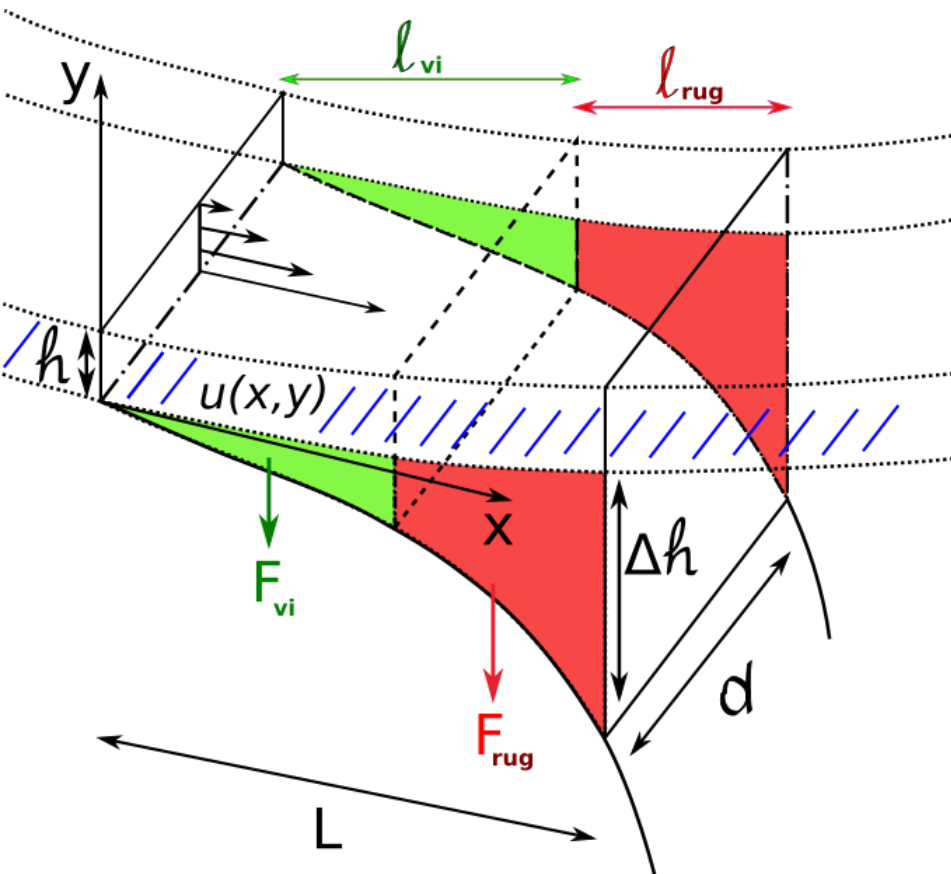
-A zöld színű tartományban viszkózus folyással, F_{vi} erővel

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

A leválási folyamatok egységes leírása

Instabilitási szakasz értelmezése:



-A kísérletileg mérhető F erő:

$$F(v) = F_{rug}(v) + F_{vi}(v),$$

$$F_{rug}(v) = A_1 \cdot p_{rug}(v)$$

$$F_{vi}(v) = A_2 \cdot v^n \cdot p_{vi}(v)$$

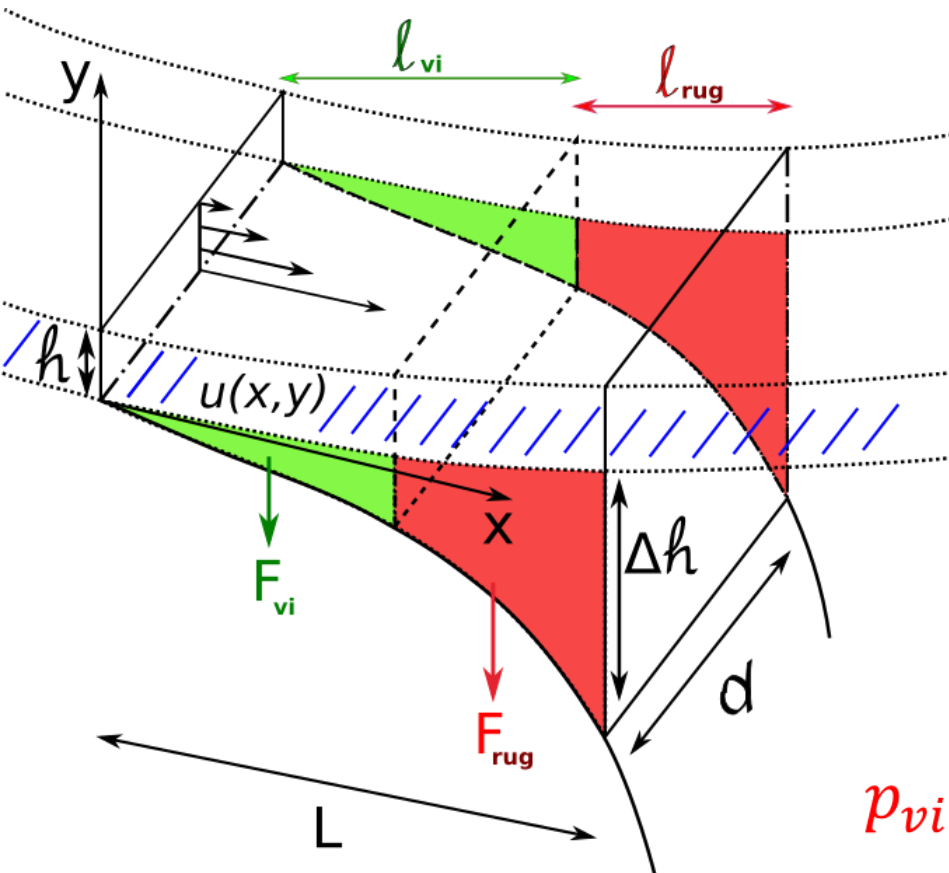
A_1 és A_2 állandók

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

A leválási folyamatok egységes leírása

Instabilitási szakasz értelmezése:



-A kísérletileg mérhető F erő:

$$F(v) = F_{rug}(v) + F_{vi}(v),$$

$$F_{rug}(v) = A_1 \cdot p_{rug}(v)$$

$$F_{vi}(v) = A_2 \cdot v^n \cdot p_{vi}(v)$$

$$p_{rug}(v) = \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right)$$

$$p_{vi}(v) = 1 - \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right)$$

v_0 : egy állandó (karakterisztikus sebesség)

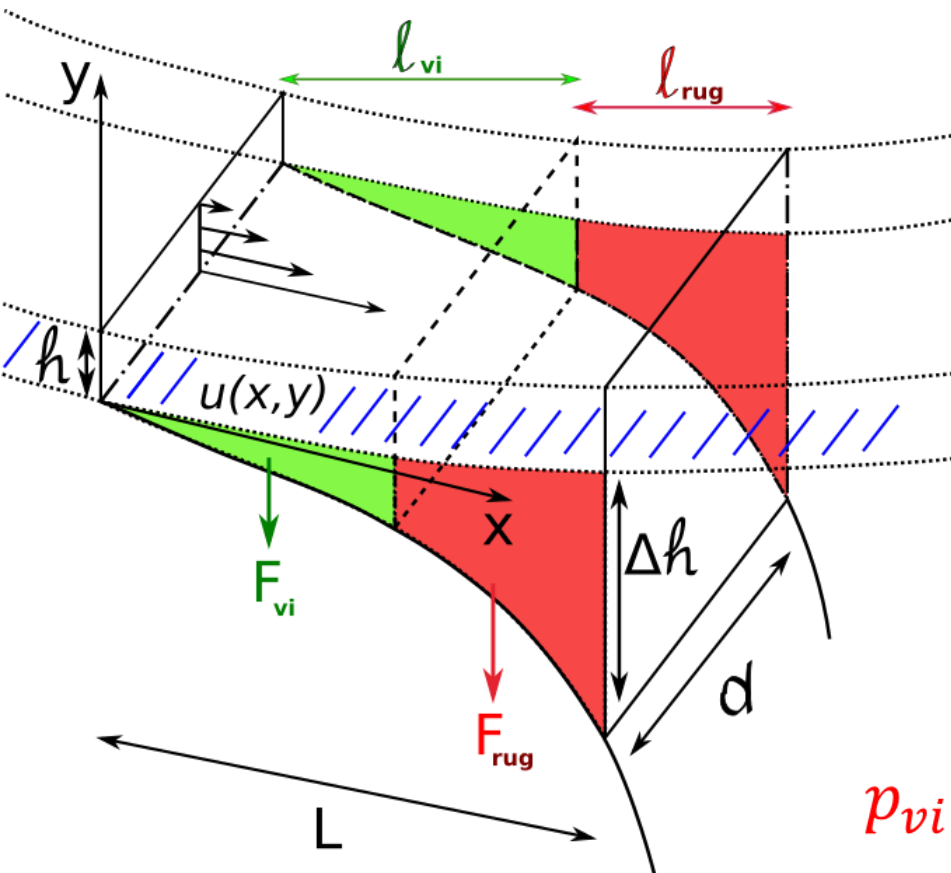


Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

A leválási folyamatok egységes leírása

Instabilitási szakasz értelmezése:



-A kísérletileg mérhető F erő:

$$F(v) = F_{rug}(v) + F_{vi}(v),$$

$$F_{rug}(v) = A_1 \cdot p_{rug}(v)$$

$$F_{vi}(v) = A_2 \cdot v^n \cdot p_{vi}(v)$$

$$p_{rug}(v) = \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right)$$

$$p_{vi}(v) = 1 - \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right)$$

Valószínűségekkel

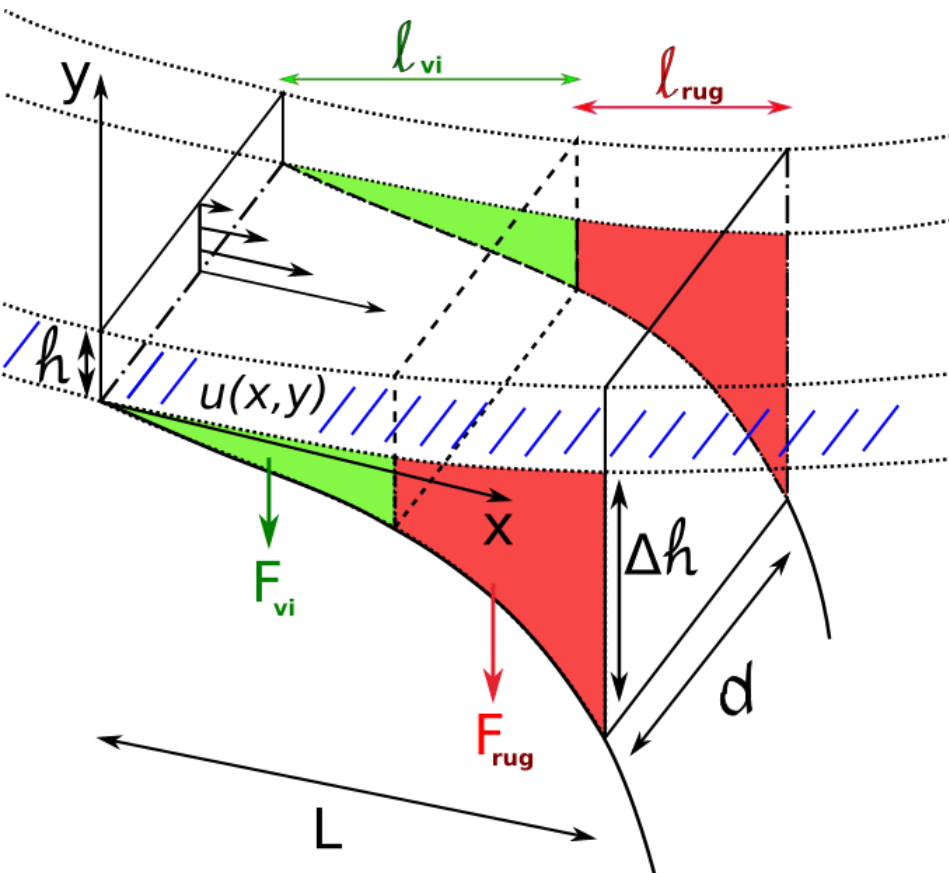
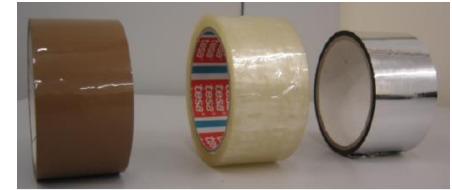


Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

A leválási folyamatok egységes leírása

Instabilitási szakasz értelmezése:



$$p_{vi}(v) = 1 - \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right)$$

A viszkózus folyás
bekövetkezési valószínűsége

$$p_{rug}(v) = \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right)$$

A rideg leválás
bekövetkezési valószínűsége

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

A leválási folyamatok egységes leírása

Instabilitási szakasz értelmezése:



Az alapfolyamatok bekövetkezési valószínűsége erősen függ a sebességtől

$$p_{vi}(v) = 1 - \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right), \quad p_{rug}(v) = \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right),$$

Becslés (fehér szalagra): $v_0 \approx 2.9 \text{ mm/s}$

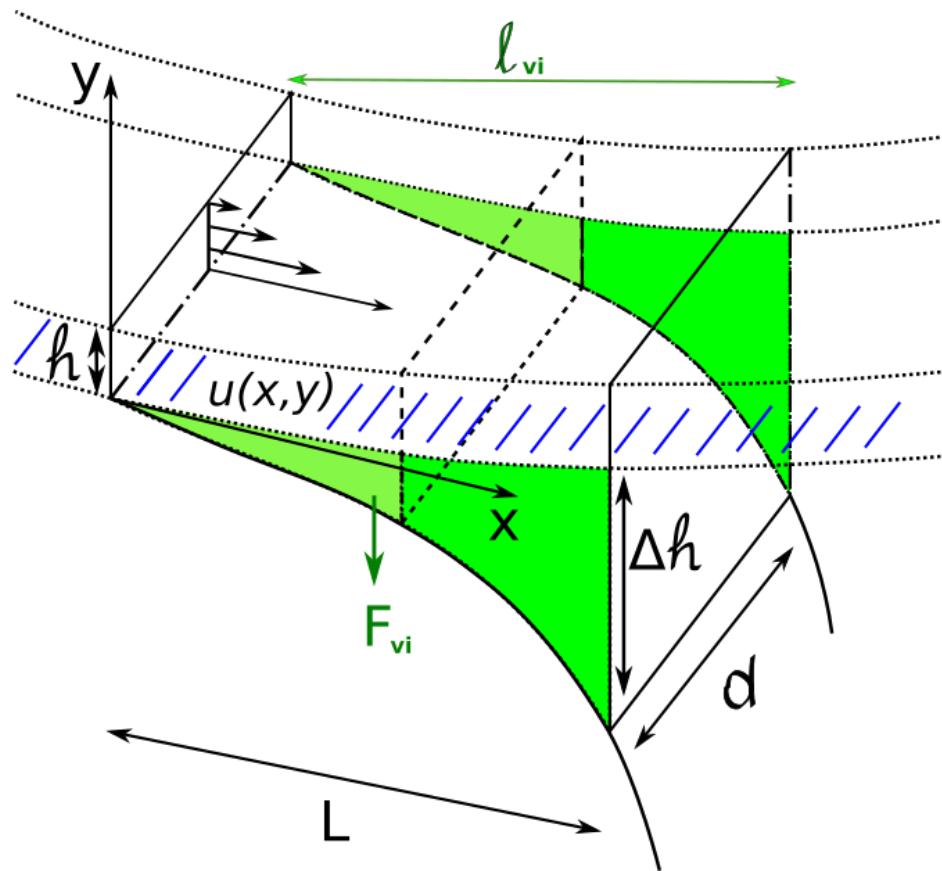
i) $v = 0.5 \text{ mm/s}$ esetén $p_{vi} \approx 0.84$, főleg viszkózus folyás

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

A leválási folyamatok egységes leírása

Instabilitási szakasz értelmezése:



Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

A leválási folyamatok egységes leírása

Instabilitási szakasz értelmezése:



Az alapfolyamatok bekövetkezési valószínűsége erősen függ a sebességtől

$$p_{vi}(v) = 1 - \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right), \quad p_{rug}(v) = \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right),$$

Becslés (fehér szalagra): $v_0 \approx 2.9 \text{ mm/s}$

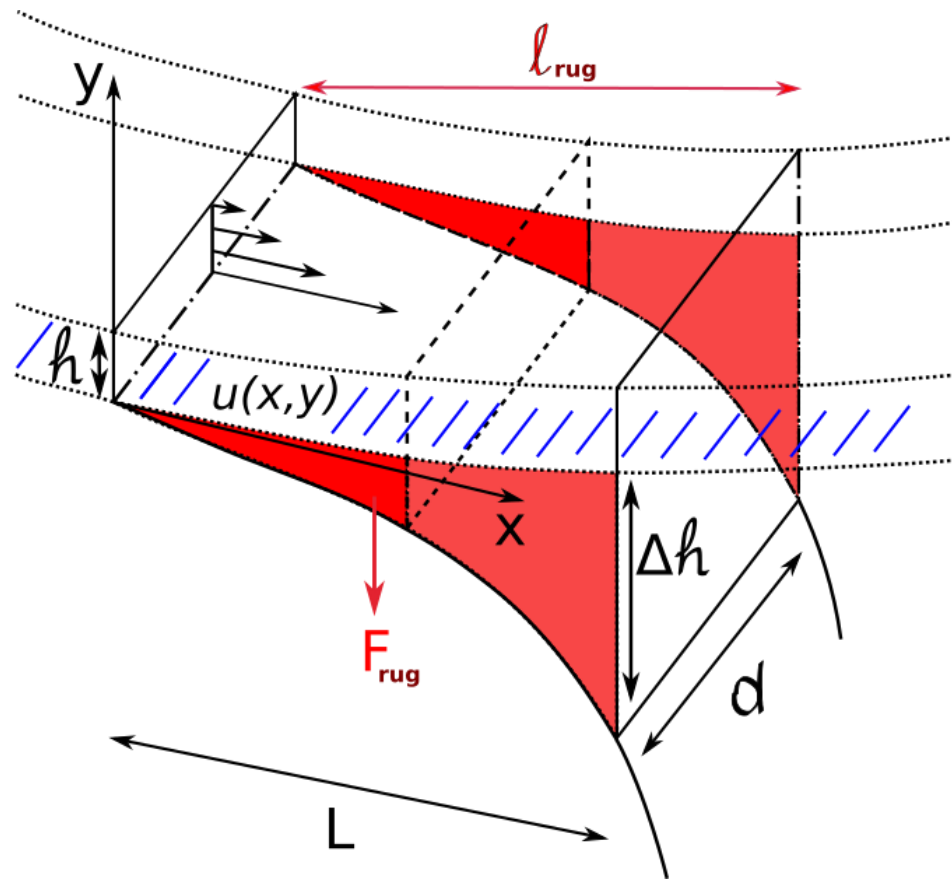
- i) $v = 0.5 \text{ mm/s}$ esetén $p_{vi} \approx 0.84$, főleg viszkózus folyás
- ii) $v = 10 \text{ mm/s}$ esetén $p_{rug} \approx 0.97$, főleg rideg leválás

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

A leválási folyamatok egységes leírása

Instabilitási szakasz értelmezése:



Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

A leválási folyamatok egységes leírása

Instabilitási szakasz értelmezése:



Az alapfolyamatok bekövetkezési valószínűsége erősen függ a tépési sebességtől

$$p_{vi}(v) = 1 - \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right), \quad p_{rug}(v) = \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right),$$

Becslés (fehér szalagra): $v_0 \approx 2.9 \text{ mm/s}$

i) $v = 0.5 \text{ mm/s}$ esetén $p_{vi} \approx 0.84$, főleg viszkózus folyás

ii) $v = 10 \text{ mm/s}$ esetén $p_{rug} \approx 0.97$, főleg rideg leválás

iii) $v = 2 \text{ mm/s}$ esetén $p_{vi} \approx p_{rug} \approx 0.50 \longrightarrow$ összemérhető

mind a két alapfolyamat bekövetkezhet \longrightarrow **INSTABILITÁS**

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája

Fizikai magyarázatok:



-Miért kell lassan lehúzni
a szentakaró tapaszt (sebtapaszt)?

-Miért kell gyorsan letépni
a szőrtelenítő gyantalapot?

Sebességfüggő folyamatok

Ragasztószalagok leválásának dinamikája



Fizikai magyarázatok:

-Miért kell lassan lehúzni
a szentakaró tapaszt (sebtapaszt)?

Viszkózus folyással, csak kis erő szükséges

-Miért kell gyorsan letépni
a szőrtelenítő gyantalapot?

Rideg leválással, viszonylag nagy erő szükséges

Köszönöm szépen a figyelmet!



Köszönetnyilvánítás:

Lendvai János

Máté Mihály

Werne Bence

Bérces György

Csikor F. Ferenc

Szommer Péter

Kovács Zsolt

Anyagfizikai Tanszék

Anyagtudományi Kiválósági Program

Magyar-Orosz TÉT Pályázat

