

POGLAVJE 1 – Elastomehanika, trdnost in fizika materialov

Osnovni fizikalni koncepti elastomehanike

Tlak in relativna deformacija

V mehanski fiziki sta tlak in deformacija ključna pojma za razumevanje vedenja snovi pod zunanjimi obremenitvami. Proučevanje teh pojavov omogoča analizo, kako materiali prenašajo sile, kako se odzivajo na obremenitve ter kakšne posledice imajo te obremenitve na njihovo strukturo.

- **Tlak** je fizikalna količina, ki opisuje silo, porazdeljeno na enoto površine.
- **Relativna deformacija** pa opisuje spremembo oblike ali velikosti telesa zaradi zunanjih sil glede na prvotno stanje.

Tlak

Tlak označuje intenzivnost sile, ki deluje pravokotno na površino telesa. Gre za skalarno količino, ki opisuje, kako močno zunanja sila deluje na določeno površino.

<https://www.youtube.com/watch?v=0P3b8bWqAkc>

Matematična definicija tlaka:

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

kjer je:

- p – tlak (v pascalih, Pa),
- F – sila, ki deluje pravokotno na površino (v newtonih, N),
- A – površina, na katero deluje sila (v kvadratnih metrih, m²).

Primer:

Če na površino 0,5 m² deluje sila 100 N, znaša tlak:

$$p = \frac{100 \text{ N}}{0,5 \text{ m}^2} = 200 \text{ Pa}$$

3. Večje enote tlaka

Ker je pascal majhna enota, se v praksi pogosto uporabljajo večkratniki:

- kilopascal (kPa):

$$1 \text{ kPa} = 1\,000 \text{ Pa}$$

- megapascal (MPa):

$$1 \text{ MPa} = 1\,000\,000 \text{ Pa}$$

- gigapascal (GPa):

$$1 \text{ GPa} = 1\,000\,000\,000 \text{ Pa}$$

Primeri uporabe:

- Atmosferski tlak na morski gladini znaša približno 101,3 kPa.
- Mehanske napetosti v jeklu pri obremenitvah se merijo v MPa.
- V geologiji se tlak v zemeljski skorji meri v GPa.

Primeri uporabe različnih enot

- **Meteorologija:** Atmosferski tlak se pogosto navaja v mbar (npr. 1013 mbar).
- **Industrija:** V hidravličnih sistemih se uporablja bar ali MPa za označevanje delovnega tlaka.
- **Medicina:** Krvni tlak se meri v mmHg (npr. 120/80 mmHg).
- **Avtomobilska industrija:** Tlak v pnevmatikah se pogosto navaja v psi.

- Tehnična atmosfera (at)

$$1 \text{ at} = 98\,066,5 \text{ Pa}$$

Uporablja se v hidravliki in pnevmatiki.

- Fizikalna atmosfera (atm)

$$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$$

Ustreza povprečnemu atmosferskemu tlaku na morski gladini.

- Tor (Torr)

$$1 \text{ Torr} = 133,322 \text{ Pa}$$

Uporablja se pri merjenju tlaka v vakuumskih sistemih.

- Milimeter živega srebra (mmHg)

$$1 \text{ mmHg} = 133,322 \text{ Pa}$$

Uporablja se v medicini za merjenje krvnega tlaka.

- Psi (pounds per square inch)

$$1 \text{ psi} = 6\,894,76 \text{ Pa}$$

Uporablja se v Združenih državah Amerike za merjenje tlaka v pnevmatikah in hidravličnih sistemih.

Pretvorbene vrednosti med enotami

Enota	Vrednost v Pascalih (Pa)
1 Pa	1
1 kPa	1.000
1 MPa	1.000.000
1 bar	100.000
1 atm	101.325
1 mmHg	133,322
1 Torr	133,322
1 psi	6.894,76

Hidrostatični tlak

<https://www.youtube.com/watch?v=UHUF0m28i0U>

Tekočina v mirujočem stanju (hidrostatika) ustvarja tlak zaradi teže lastne mase. Ta tlak se povečuje s povečano globino v tekočini.

Hidrostatični tlak na določeni globini je podan z enačbo:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

kjer je:

- p – hidrostatični tlak (v Pa),
- ρ – gostota tekočine (v kg/m^3),
- g – gravitacijski pospešek ($9,81 \text{ m/s}^2$),
- h – globina pod površino tekočine (v m).

Primer:

Voda ima gostoto $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$. Na globini 5 m je hidrostatični tlak:

$$p = 1000 \cdot 9,81 \cdot 5 = 49.050 \text{ Pa} = 49,05 \text{ kPa}$$

<https://www.youtube.com/watch?v=C0ujLqKPWew>

<https://www.youtube.com/watch?v=sAxEGpYIDUA>

Skupni tlak v tekočinah

Skupni tlak v tekočini vključuje hidrostatični tlak in zunanji tlak (npr. atmosferski tlak):

$$p_{\text{skupni}} = p_{\text{zunanji}} + \rho gh$$

Pascalov zakon:

<https://www.youtube.com/watch?v=jarmWzGe78k>

Pascalov zakon pravi, da se sprememba tlaka, povzročena v eni točki mirujoče tekočine, prenese enakomerno na vse točke tekočine in na stene posode.

Relativna deformacija

Deformacija pomeni spremembo oblike ali velikosti telesa zaradi zunanje sile. Relativna deformacija meri, kolikšen delež prvotne dolžine ali dimenzije se je spremenil.

Vrste deformacij:

- **Raztezanje** (telo se podaljša),
- **Stiskanje** (telo se skrajša),
- **Strižna deformacija** (plasti materiala drsijo druga mimo druge),
- **Upogib** (kombinacija raztezanja in stiskanja),
- **Zvijanje** (rotacijska deformacija okoli vzdolžne osi).

Matematična definicija relativne deformacije:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

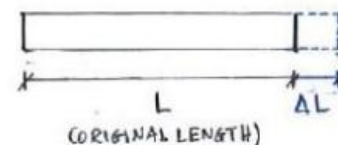
kjer je:

- ϵ – relativna deformacija (brez enote),
- ΔL – sprememba dolžine (v metrih, m),
- L_0 – začetna dolžina telesa (v metrih, m).

Primer:

Če se palica dolžine 1 m pod vplivom sile podaljša za 2 mm, je relativna deformacija:

$$\epsilon = \frac{0,002 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 0,002 \text{ ali } 0,2\%$$



Formula:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

(Units: *dimensionless* or ϵ)

TYPES OF LOADS & DEFORMATIONS

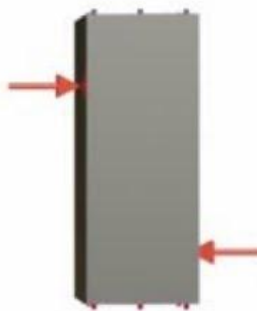
COMPRESSION



TENSION



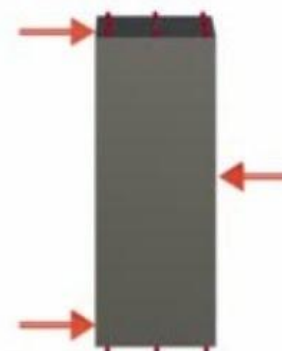
SHEAR



TORSION



BENDING



BUCKLING



© Copyright Pro-Level Civil Engineering. All Rights Reserved.

<https://www.youtube.com/watch?v=LgB3UxdLu2c>

Povezava med tlakom in deformacijo

Pritisk zunanjih sil povzroča deformacijo materialov. V linearno elastičnem območju velja **Hookov zakon**, ki povezuje napetost (ki je prav tako definirana kot tlak v materialu) in relativno deformacijo:

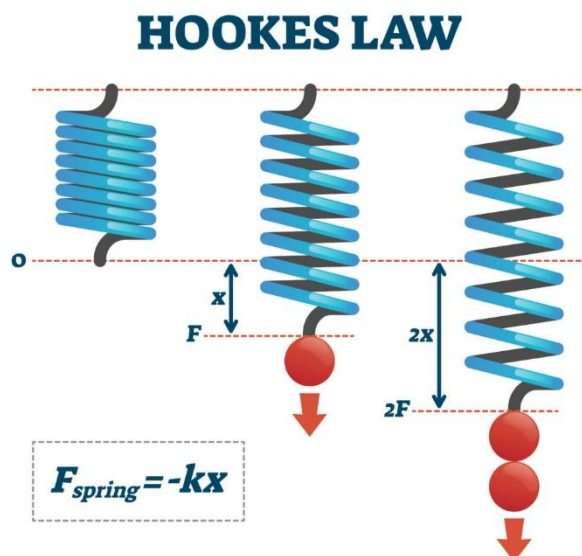
kjer je:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

- σ – napetost (v Pa),
- E – modul elastičnosti (Youngov modul) materiala (v Pa),
- ϵ – relativna deformacija.

https://www.youtube.com/watch?v=gZ_KnZHCn4M

Hookov zakon opisuje **linearen odnos med napetostjo (tlakom) in deformacijo (raztezek oziroma stiskanje)** v elastičnih materialih, dokler material ne doseže svoje meje elastičnosti.

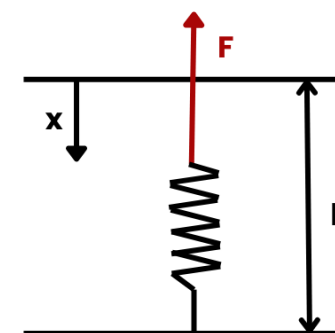


HOOKE'S LAW OF ELASTICITY

Definition:

Hooke's Law of Elasticity states that the force exerted by a spring is directly proportional to the displacement from its equilibrium position, up to the limit of proportionality.

Formula: $F = kx$



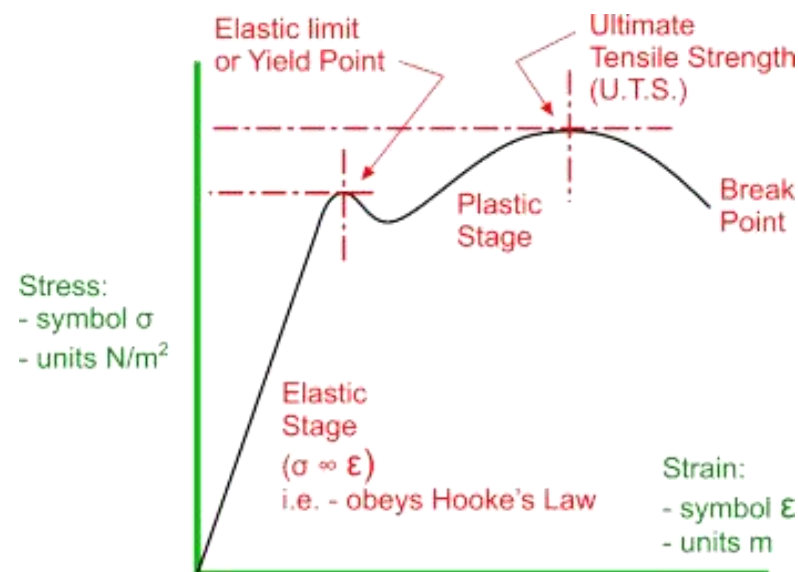
Ex Examples.com

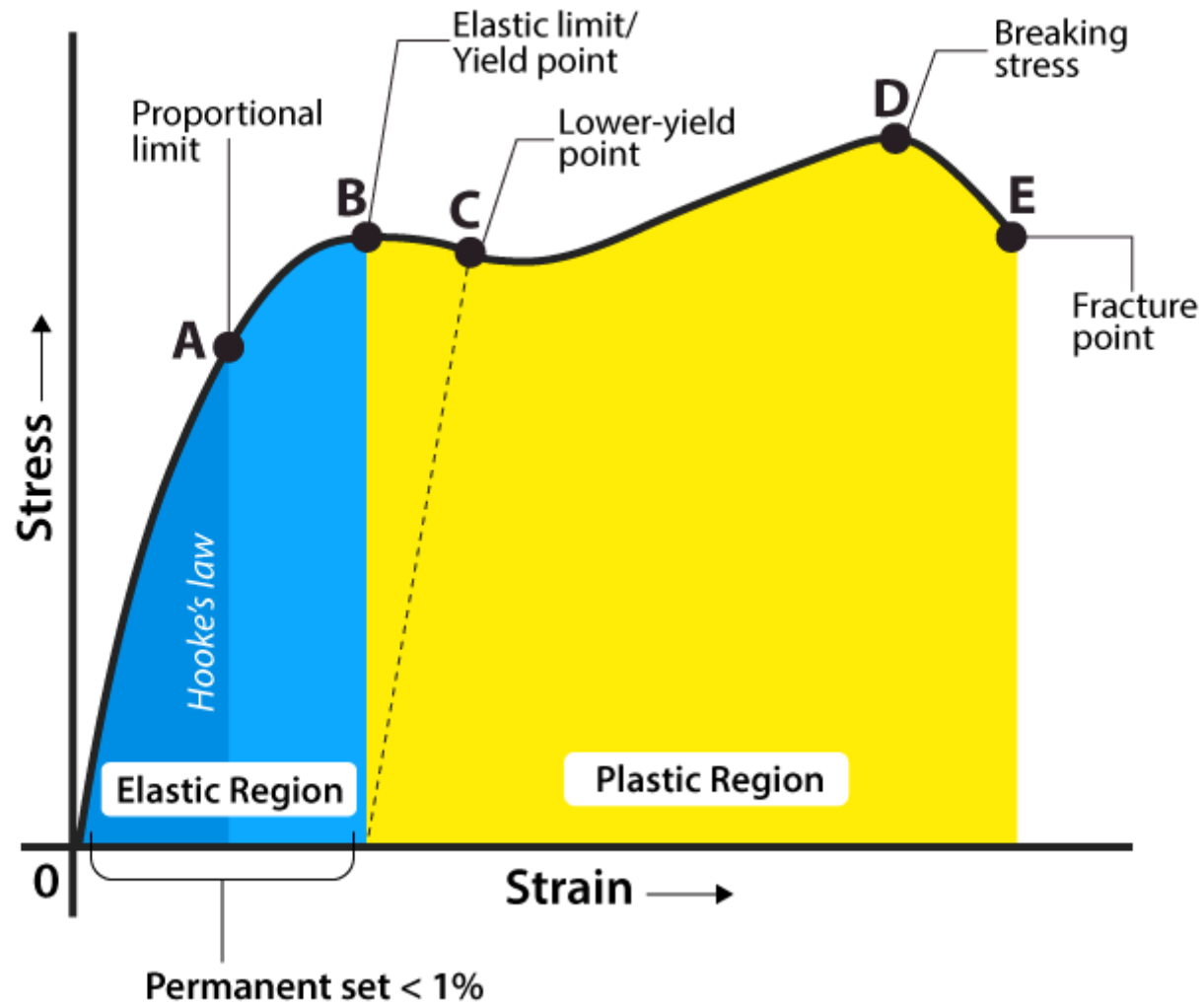
Napetostno-deformacijska krivulja

Razmerje med napetostjo in deformacijo se pogosto prikaže s pomočjo **napetostno-deformacijske krivulje**, ki prikazuje različna obnašanja materiala glede na stopnjo obremenitve.

Glavna območja krivulje:

- **Elastično območje:**
 - Material se po odstranitvi sile vrne v prvotno stanje.
 - Hookov zakon.
- **Meja plastičnosti/elastičnosti:**
 - Točka, kjer material preide iz elastičnega v plastično območje.
 - Po odstranitvi sile ostane trajna deformacija.
- **Plastično območje:**
 - Material se deformira brez bistvenega povečanja napetosti.
 - Deformacije so trajne.
- **Točka loma:**
 - Najvišja napetost, ki jo material še lahko prenese.
 - Pri tej točki material počí ali se zlomi.





Vrste deformacij glede na materialne lastnosti

Elastična deformacija:

- Reverzibilna; material se po odstranitvi sile vrne v prvotno obliko.
- Primer: kovine pri majhnih obremenitvah.
- <https://www.youtube.com/watch?v=frGL1jTnDsg>

Plastična deformacija:

- Nepovratna; material po odstranitvi sile ohrani spremenjeno obliko.
- Primer: mehčane kovine, gline.
- <https://www.youtube.com/watch?v=33y4zMn4dA0>

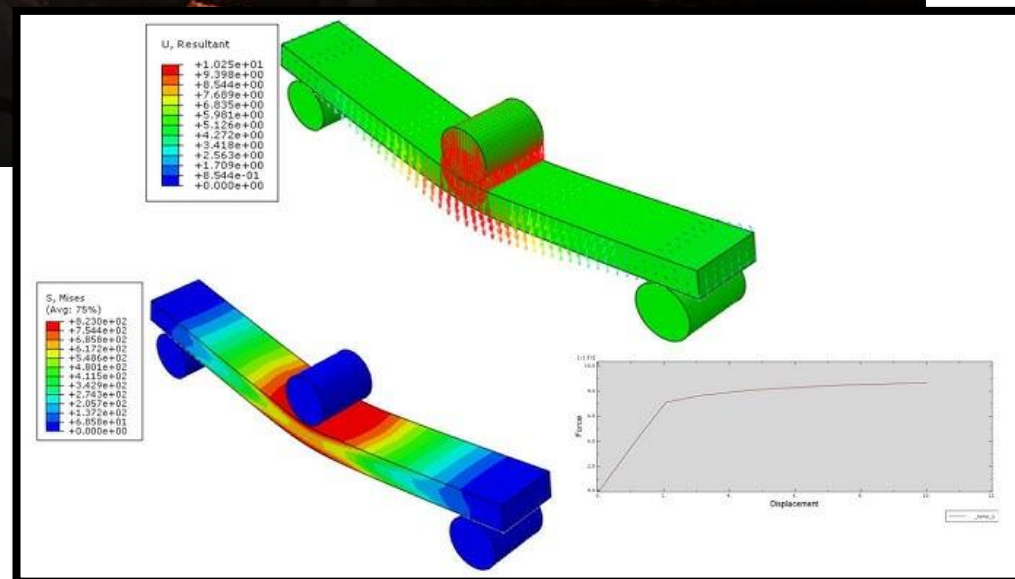
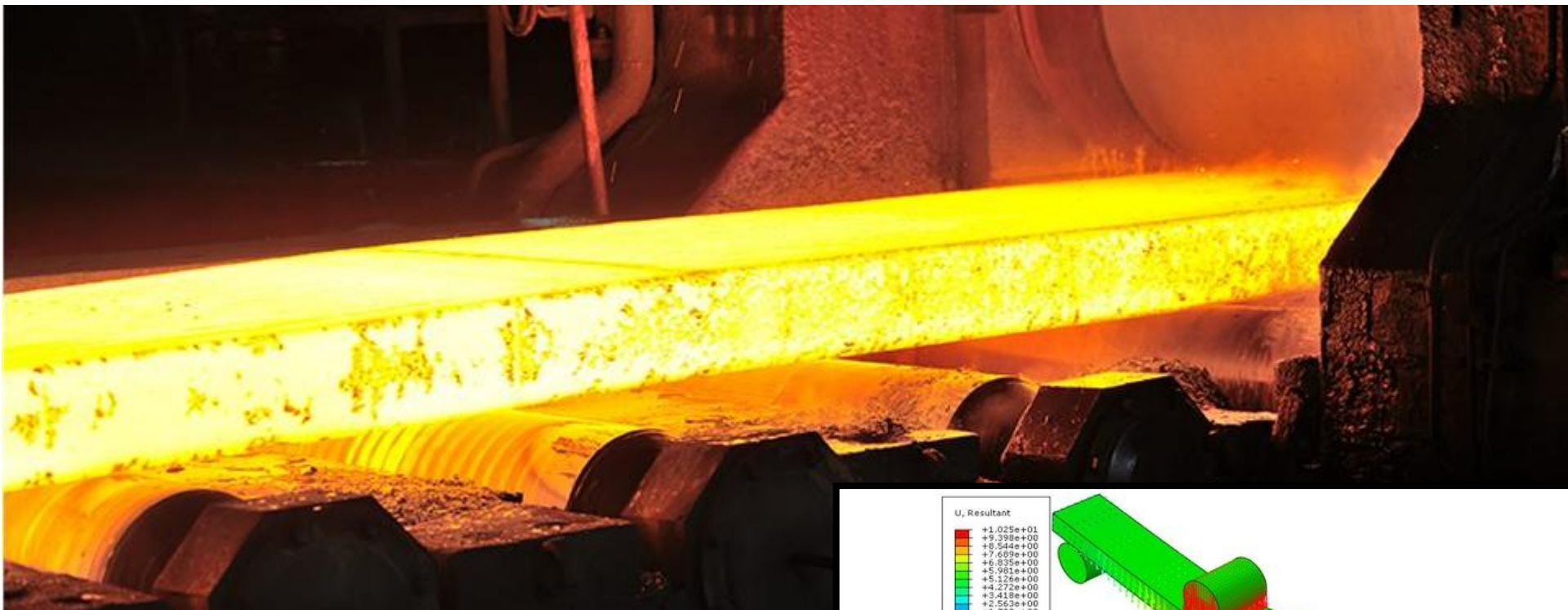
Lomna deformacija:

- Material se pod obremenitvijo nenadoma zlomi brez predhodne plastične deformacije.
- Primer: steklo, keramika.
- <https://www.youtube.com/watch?v=ru8zXGoVRDk>

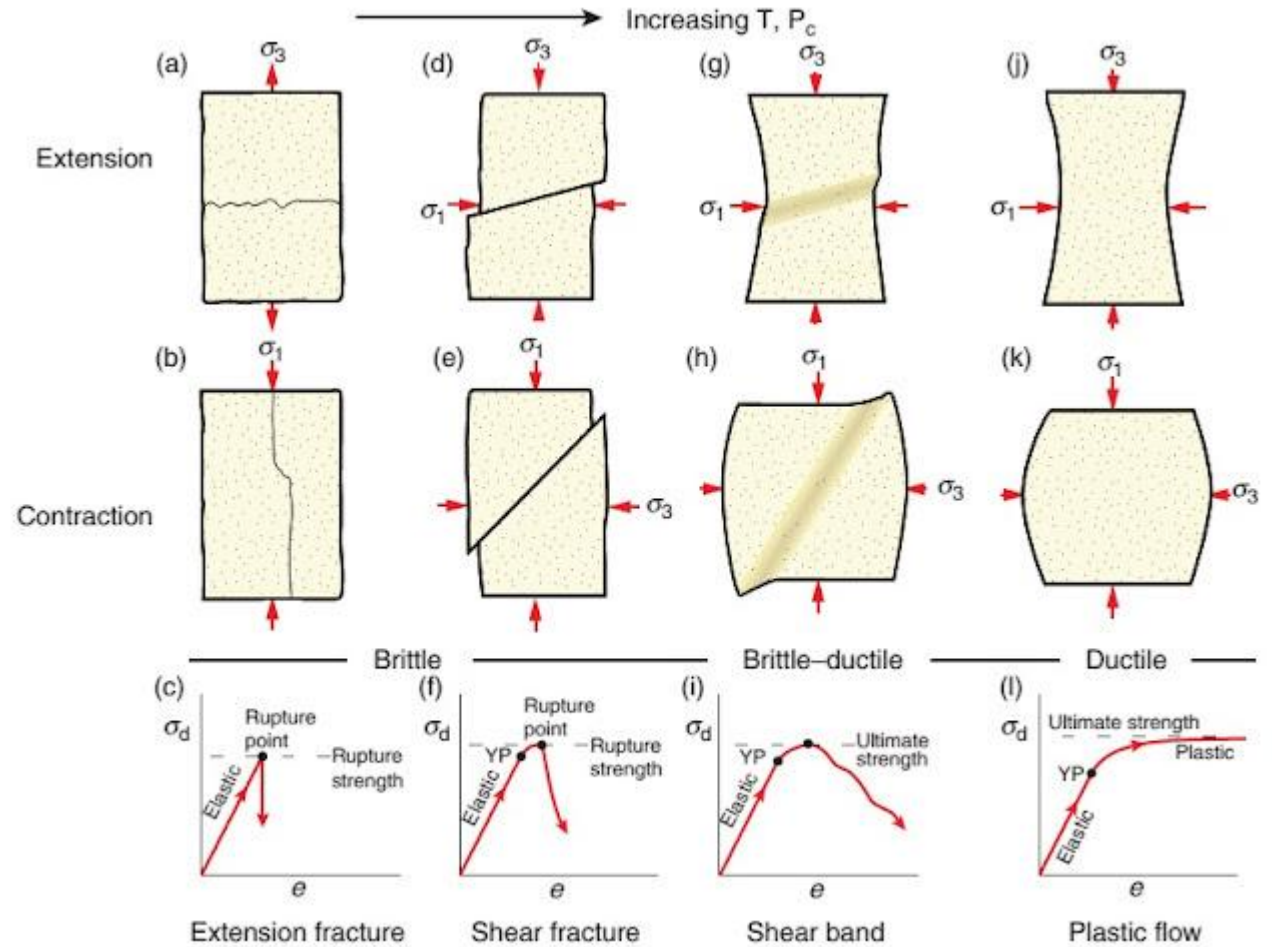
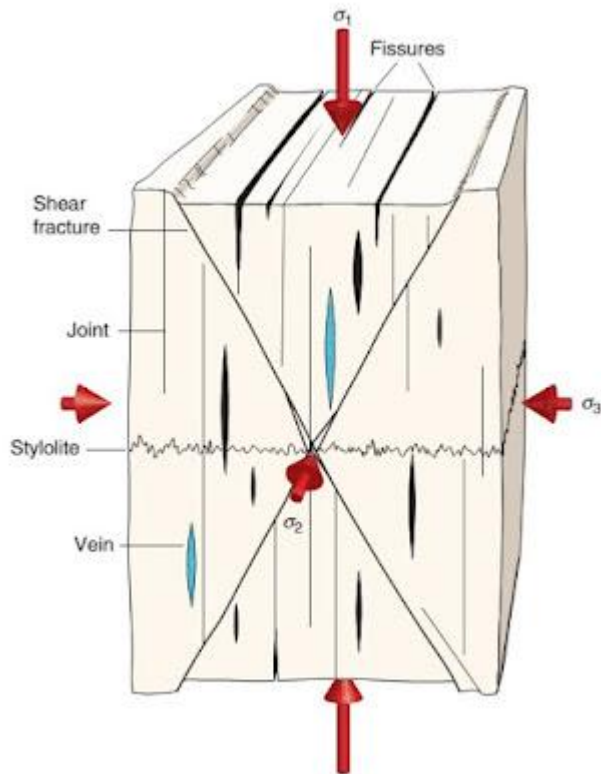
Viskozna deformacija:

- Material se pod stalno silo neomejeno deformira s časom.
- Primer: asfalt, med.
- <https://www.youtube.com/shorts/QW9SaqjMQSo>

Plastična/viskozna deformacija



Lomna deformacija





Teorija loma

Uvod v teorijo loma

Teorija loma proučuje obnašanje materialov, ki so podvrženi obremenitvam, in mehanizme, ki vodijo do pojava razpok ter končnega zloma materiala. Razumevanje nastanka in rasti razpok je ključno za varno načrtovanje konstrukcij in strojnih delov, saj večina materialov ne odpove zaradi splošne preobremenitve, temveč zaradi razvoja mikrorazpok, ki sčasoma prerastejo v kritične napake.

Vrste loma

Glede na obnašanje materiala med lomom ločimo dve osnovni vrsti loma:

Krhek lom (brittle fracture):

- Značilen za materiale z nizko duktilnostjo (steklo, keramika, liti želez).
- Do loma pride nenadoma brez opaznih plastičnih deformacij.
- Površina loma je čista in ravna.

Plastičen lom (ductile fracture):

- Prisoten pri duktilnih materialih (jeklo, aluminij).
- Pred lomom pride do opazne plastične deformacije.
- Površina loma je hrapava in pogosto vsebuje "vrat" (zoženje prereza).

Ductile vs. Brittle Failure



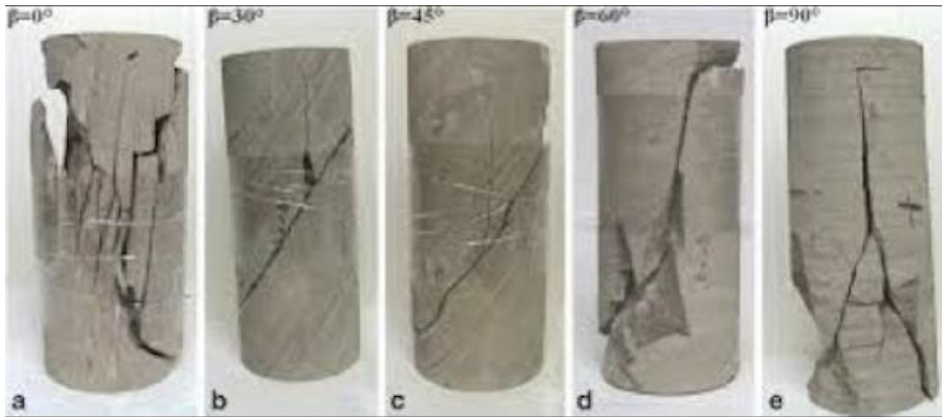
cup-and-cone fracture



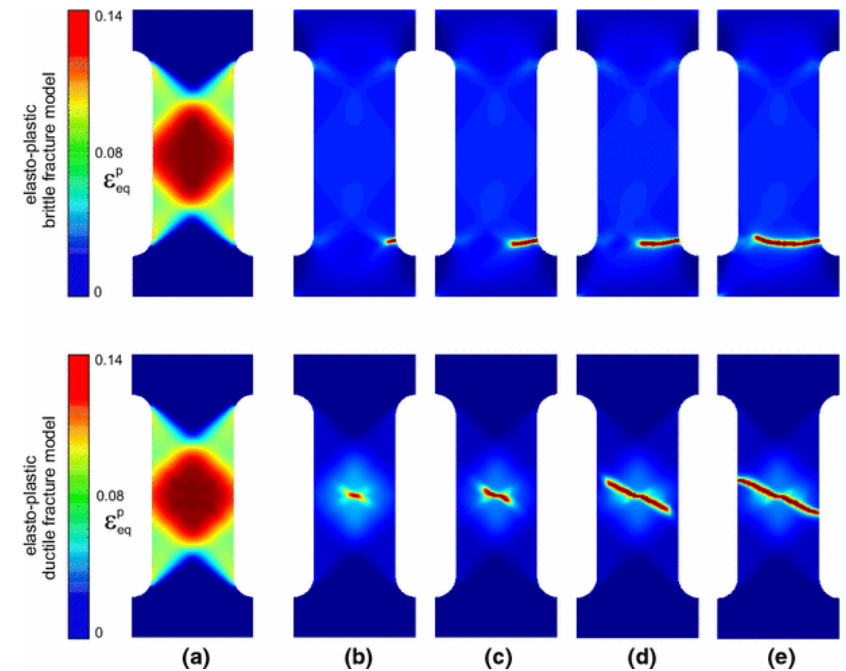
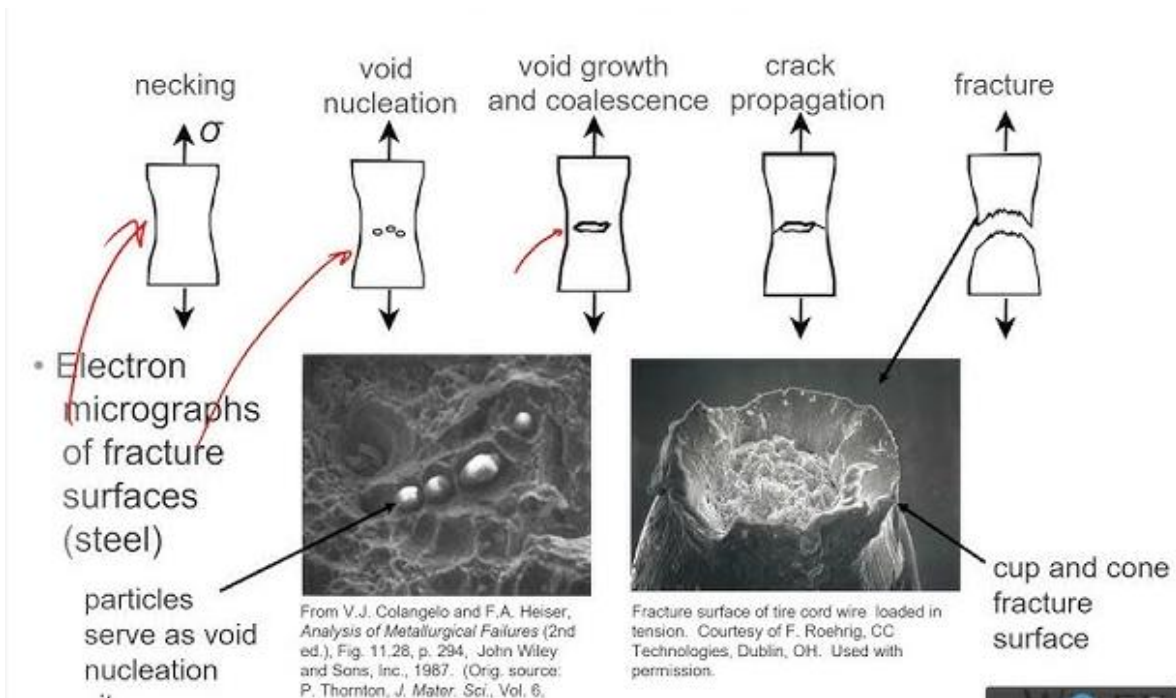
brittle fracture

Eksperimenti s stiskanjem/raztezanjem materialov





Triaksialni kompresijski test



Tenzijski testi in duktilni lom

Utrujenje materiala in lom zaradi cikličnih obremenitev

V praksi se materiali pogosto srečujejo s ponavljajočimi se obremenitvami (npr. vibracije, nihajoče sile), kar vodi do **utrujenosti materiala**. Ciklična obremenitev lahko povzroči rast mikrorazpok tudi pri napetostih, manjših od mejne trdnosti materiala.

Krivulja utrujanja (S-N krivulja):

- Povezuje amplitudo napetosti (S) s številom ciklov do loma (N).
- Vsak material ima določeno **mejo utrujanja**, pod katero lahko prenese neskončno število ciklov brez loma.

Comet metal fatigue: <https://www.youtube.com/watch?v=ccGPQdhf6Ho>

Comet metal fatigue: <https://www.youtube.com/watch?v=3qdnA2rrA5M>

S-N curves: https://www.youtube.com/watch?v=o-6V_JoRX1g&t=40s

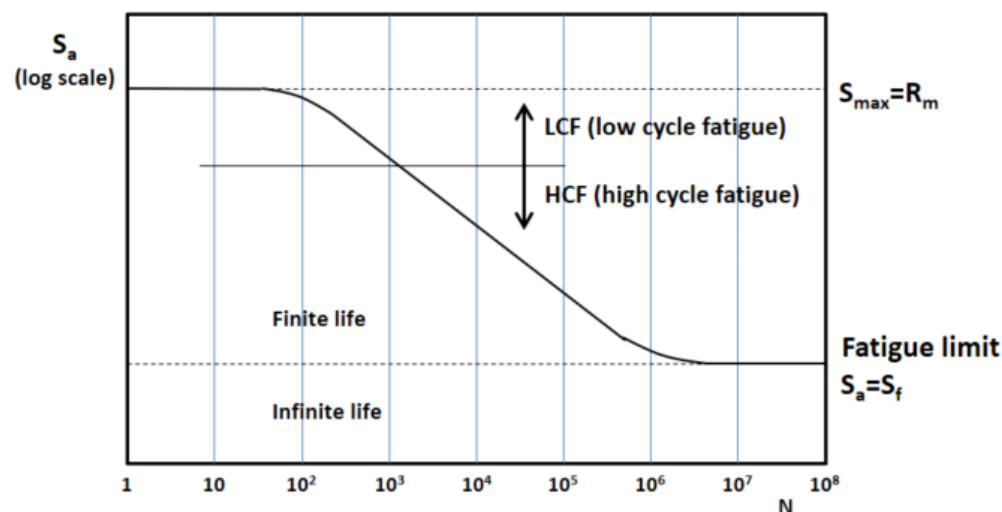
S-N curves !: https://www.youtube.com/watch?v=LhUclxBUV_E

Germany train disaster: <https://www.youtube.com/watch?v=-u0YPA1QsPw>

Metal fatigue documentaries:

<https://www.youtube.com/watch?v=F0kgLDf1LxA>

Aircrash investigation: <https://www.youtube.com/watch?v=9kxxd3bDS7c&t=34s>



Uporaba tehničnih materialov

Materiali, ki se uporabljajo pri izdelavi traktorjev in drugih delovnih strojev, so izbrani glede na njihovo trdnost, vzdržljivost, odpornost na obrabo ter sposobnost prenosa velikih obremenitev in napetosti. Izbira ustreznih tehničnih materialov je ključna za zagotavljanje dolge življenjske dobe strojev ter učinkovitega in varnega delovanja. V tem poglavju bomo podrobneje obravnavali najpogostejše uporabljene materiale ter njihove lastnosti, prednosti in pomanjkljivosti, s posebnim poudarkom na vrstah poškodb in okvar, ki se lahko pojavijo zaradi utrujenosti materialov.

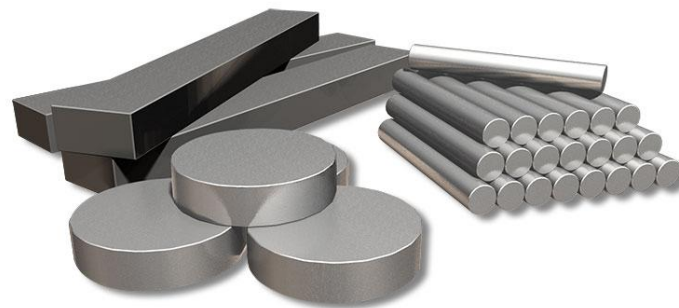


1. Jeklo

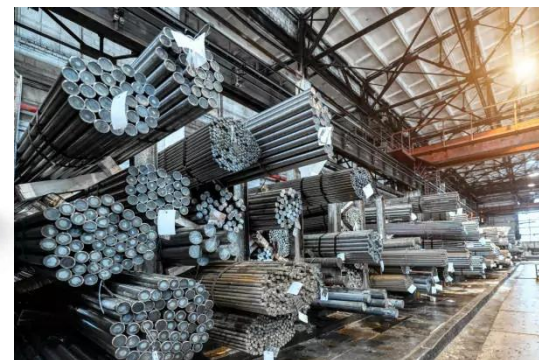
Opis: Jeklo je eden izmed najpogostejše uporabljenih materialov v konstrukciji traktorjev in delovnih strojev. Gre za zlitino železa in ogljika, pri čemer je delež ogljika odločilni dejavnik za trdnost in trdoto jekla. Jeklo je zelo prilagodljivo, saj je možno z različnimi toplotnimi obdelavami in dodatki drugih elementov (npr. kroma, niklja, molibdena) izboljšati njegove lastnosti, kot so odpornost proti koroziji, trdnost in žilavost.

Najpogostejša uporaba:

- Okvirji traktorjev in delovnih strojev
- Pogonski sklopi (gredi, zobniki)
- Podvozja in ohišja strojev
- Hidravlični cilindri



Načini okvar: Najpogostejše okvare jeklenih komponent so posledica **utrujenosti materiala**, ki se pojavi zaradi ponavljajočih se obremenitev. Sčasoma lahko to privede do razpok, še posebej na mestih, kjer je material podvržen visokim napetostim. **Korozija** je še en pogost pojav, še posebej pri neustrezno zaščitene jeklenih delih, ki so izpostavljeni vlagi in kisiku. **Abrazivna obraba** se pojavlja na delih, ki so v stiku z drugimi površinami ali materiali (npr. zobniki), kar lahko povzroči izgubo materiala in zmanjšanje funkcionalnosti.





Pridobivanje jekla v jeklarni

2. Lito železo

Opis: Lito železo je zlitina železa z višjim deležem ogljika (več kot 2 %) in silicija. Zaradi višje vsebnosti ogljika je lito železo bolj krhko kot jeklo, a hkrati zelo trdo in odpornejše proti obrabi. Uporablja se predvsem za dele, kjer so zahteve po vzdržljivosti višje, a ni potrebna velika duktilnost ali žilavost.

Najpogostejša uporaba:

- Ohišja motorjev in menjalnikov
- Zavorni bobni in diski
- Hidravlične komponente
- Bloki valjev



Načini okvar: **Krhkost litega železa** pomeni, da je material nagnjen k lomljenju, še posebej pri udarcih ali drugih nenadnih obremenitvah. **Termična utrujenost** je prav tako pogosta težava pri delih, ki so izpostavljeni visokim temperaturam (npr. motorji), saj lahko ponavljajoče segrevanje in hlajenje povzroči razpoke. **Korozija** je tudi pogosta pri litih železnih delih, ki niso zaščiteni z ustreznimi premazi ali ki delujejo v agresivnih okoljih.



3. Aluminijeve zlitine

Opis: Aluminijeve zlitine se zaradi nizke gostote, visoke odpornosti proti koroziji in dobre toplotne prevodnosti pogosto uporabljajo za dele, kjer je pomembno razmerje med trdnostjo in težo. Aluminij je prav tako zelo odporen proti oksidaciji, kar ga naredi idealnega za uporabo v okoljih, kjer so stroji izpostavljeni vlagi in atmosferskim vplivom.

Najpogostejša uporaba:

- Motorni deli (npr. bati, ohišja motorjev)
- Ohišja hidravličnih komponent
- Deli podvozja
- Senzorski in elektronski ohišji



Načini okvar: Aluminijeve zlitine so nagnjene k **utrujenosti materiala**, še posebej na mestih, kjer se pojavljajo visoke obremenitve in ponavljajoče upogibanje. **Termična razteznost** aluminija je višja kot pri jeklu, kar pomeni, da lahko pri pogostem segrevanju in hlajenju pride do deformacij. **Korozija pod napetostjo** je poseben tip korozije, ki se lahko pojavi pri aluminijevih zlitinah, ko so izpostavljene sočasnemu vplivu korozivnega okolja in mehanskih napetosti.





4. Baker in bakrove zlitine

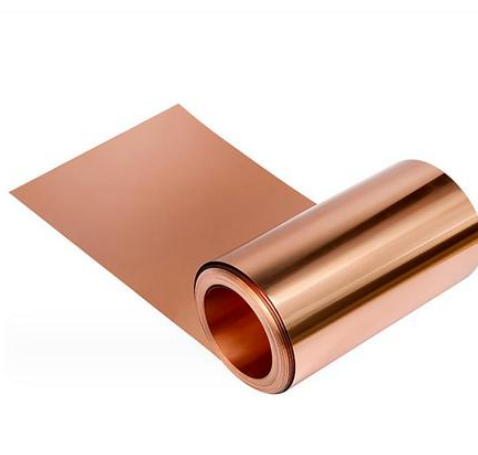
Opis: Baker in njegove zlitine, kot je bron, so pogosto uporabljeni materiali zaradi odličnih toplotnih in električnih lastnosti. Prav tako so zelo odporni na korozijo, kar jih naredi primerne za uporabo v vlažnih in korozivnih okoljih.

Najpogostejša uporaba:

- Električni vodi in komponente
- Ležaji
- Hidravlični priključki
- Radiatorji in hladilni sistemi



Načini okvar: **Kavitacijska obraba** je pogosta pri hidravličnih komponentah iz bakra ali brona, saj tekočine pri visokih hitrostih in tlakih povzročijo mikro poškodbe na površini materiala. **Termična utrujenost** se pojavlja pri električnih komponentah, kjer bakrene dele izpostavljamo pogostim ciklom segrevanja in hlajenja. **Oksidacija** bakra je sicer počasna, a sčasoma lahko na površini materiala tvori plast oksidov, kar vpliva na njegove električne lastnosti.



5. Guma in elastomeri

Opis: Guma in različni elastomeri so ključni materiali za tesnila, blažilnike in cevi. Ti materiali so cenjeni zaradi svoje elastičnosti, odpornosti proti abraziji ter sposobnosti prenašanja velikih deformacij brez trajnih poškodb.

Najpogostejša uporaba:

- Tesnila in O-obroči
- Hidravlične in pnevmatske cevi
- Blažilci vibracij in udarcev
- Zračne komponente



Načini okvar: **Utrujenost materiala** pri gumi se kaže v pojavu mikro razpok, ki sčasoma vodijo do popolne okvare tesnila ali cevi. **Staranje materiala** je še ena pogosta težava, saj lahko zračni vplivi, UV-svetloba in kemikalije povzročijo krhkost gume in elastomerov. **Toplotna degradacija** se pojavi pri komponentah, ki so izpostavljene visokim temperaturam, kar vodi do izgube elastičnosti in posledične okvare.



6. Plastika in polimeri

Opis: Plastika in polimeri so priljubljeni materiali zaradi svoje lahкости, odpornosti proti koroziji ter sposobnosti oblikovanja v zapletene oblike. Njihova uporaba se povečuje, zlasti pri izdelavi komponent, ki ne prenašajo visokih obremenitev, a zahtevajo visoko odpornost na kemične vplive.

Najpogostejša uporaba:

- Ohišja elektronskih naprav
- Pokrovi in zaščitni deli
- Cevi za tekočine z nizkim pritiskom
- Izolacijski materiali



Načini okvar: **Krhkost zaradi staranja** je pogost problem pri plastičnih komponentah, ki so izpostavljene sončni svetlobi ali kemikalijam. **Termična degradacija** povzroča razpad polimernih vezi pri višjih temperaturah, kar zmanjšuje trdnost in elastičnost materiala. **Deformacija pod obremenitvijo** je pogosta, kadar so plastični deli izpostavljeni stalnim obremenitvam, kar lahko vodi do trajnih deformacij.

