

LASTNOSTI MATERIALOV

Predmet: Reaktorska tehnika

Avtor: Matic Pirc

Profesor: Iztok Tiselj

Brežice, 29.11.2012

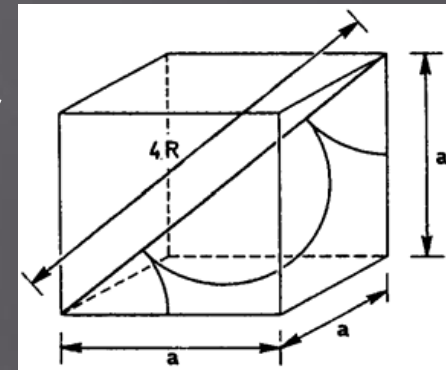
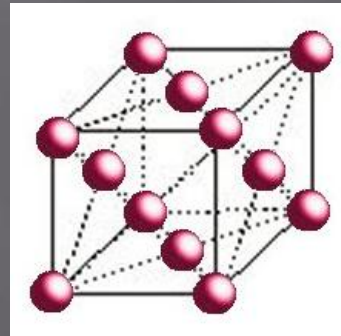
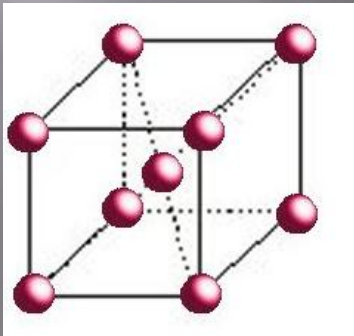
Uvod

- ▣ Lastnosti materialov določajo ter omejujejo njihovo uporabnost v jedrskih elektrarnah.
- ▣ Povdarek na kovinah, saj so le te najpomembnejši materiali v tehnologiji jedrskih elektrarn – struktura kovin (mikroskopska raven)
- ▣ Makroskopske lastnosti:
 - mehanske (trdnost, elastičnost, trdota, žilavost),
 - termične (specifična toplota, toplotna prevodnost, temperaturna razteznost),
 - električne in
 - kemijske.

1. Struktura kovin

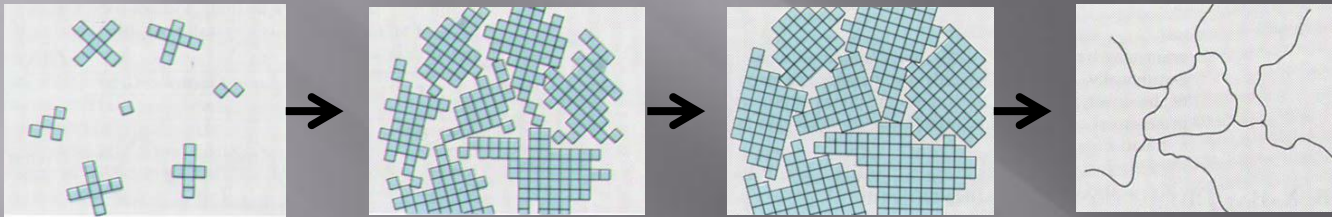
1.1. Kristalne strukture

- ▣ Atomi so razvrščeni v *prostorske mreže*, le-te pa so sestavljene iz *osnovnih celic* (geometrijska enota, s katero lahko s translacijo v treh smereh prostora ustvarimo dano prostorsko mrežo).
- ▣ Pri kovinah prevladujejo kristalizacije v kubičnem sistemu:
 - prostorsko centrirana kubična mreža ($a = 4R/\sqrt{3}$),
 - ploskovno centrirana kubična mreža ($a = 4R/\sqrt{2}$).(a je mrežna konstanta, R pa atomski polmer.)



1.2. Monokristal in polikristalni materiali

- ▣ *Monokristali* so v celoti v vseh smereh zloženi iz samih enakih osnovnih celic, ki imajo tudi enako orientacijo. Tehnološko so pomembni vendar jih ne uporabljamo kot strukturne (gradbene) materiale, ki bi prenašali mehanske obremenitve.
- ▣ *Polikristali* pa so sestavljeni iz mnogih manjših kristalov – kristalnih zrn (tipična velikost 10 in 100 μm)



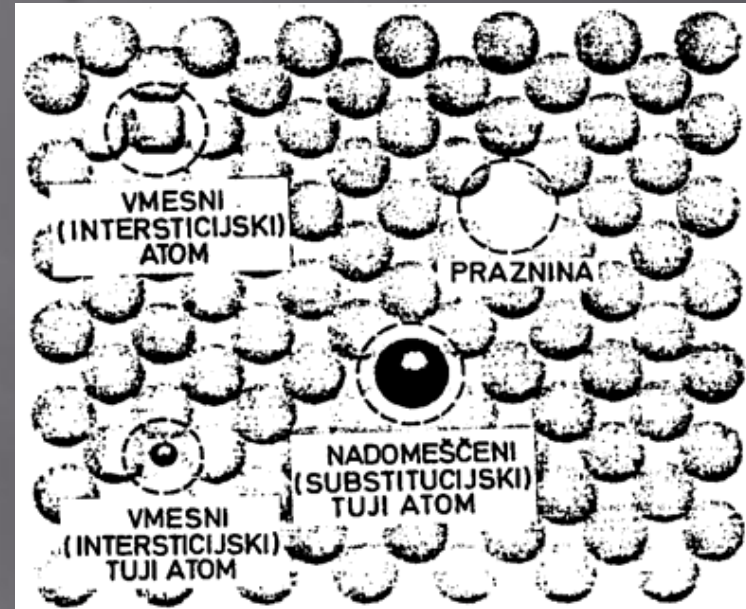
* Shematski prikaz poteka združitve kristalnih zrn. Na zadnji sliki je shematski prikaz *kristalnih mej* – meje med kristalnimi zrn, ki so nepravilne oblike in imajo različne usmeritve (orientacije) osnovnih celic (2-3 medatomske razdalje).

- ▣ Fizikalne lastnosti (npr. modul elastičnosti, električna prevodnost itd.) monokristalov se lahko razlikujejo glede na kristalografsko smer, v kateri jih izmerimo - *anizotropija*.

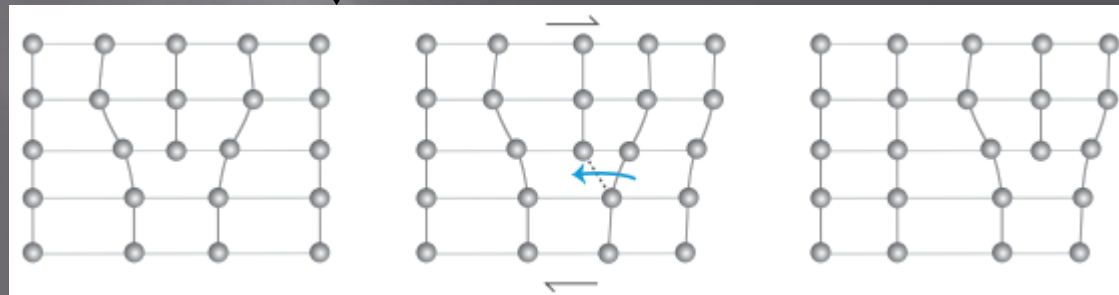
Zaradi velikega števila kristalnih zrn v polikristalih je le ta *izotropen* - ima v vseh smereh enake fizikalne lastnosti, ki so nekakšno povprečje usmerjenih vrednosti.

1.3. Kristalne napake

- ▣ Delimo jih na:
 - *točkaste napake*: praznine, vmesni atomi, tuji atomi,
 - *linijske napake*: dislokacije,
 - *ploskovne napake*: kristalne meje, dvojčične meje, antifazne meje, napake zloga.



▣ *Velikost kristalnih zrn* pomembno vpliva na trdnost in žilavost. Čim manjša so v povprečju zrna, tem trši, trdnejši in bolj žilav je material.



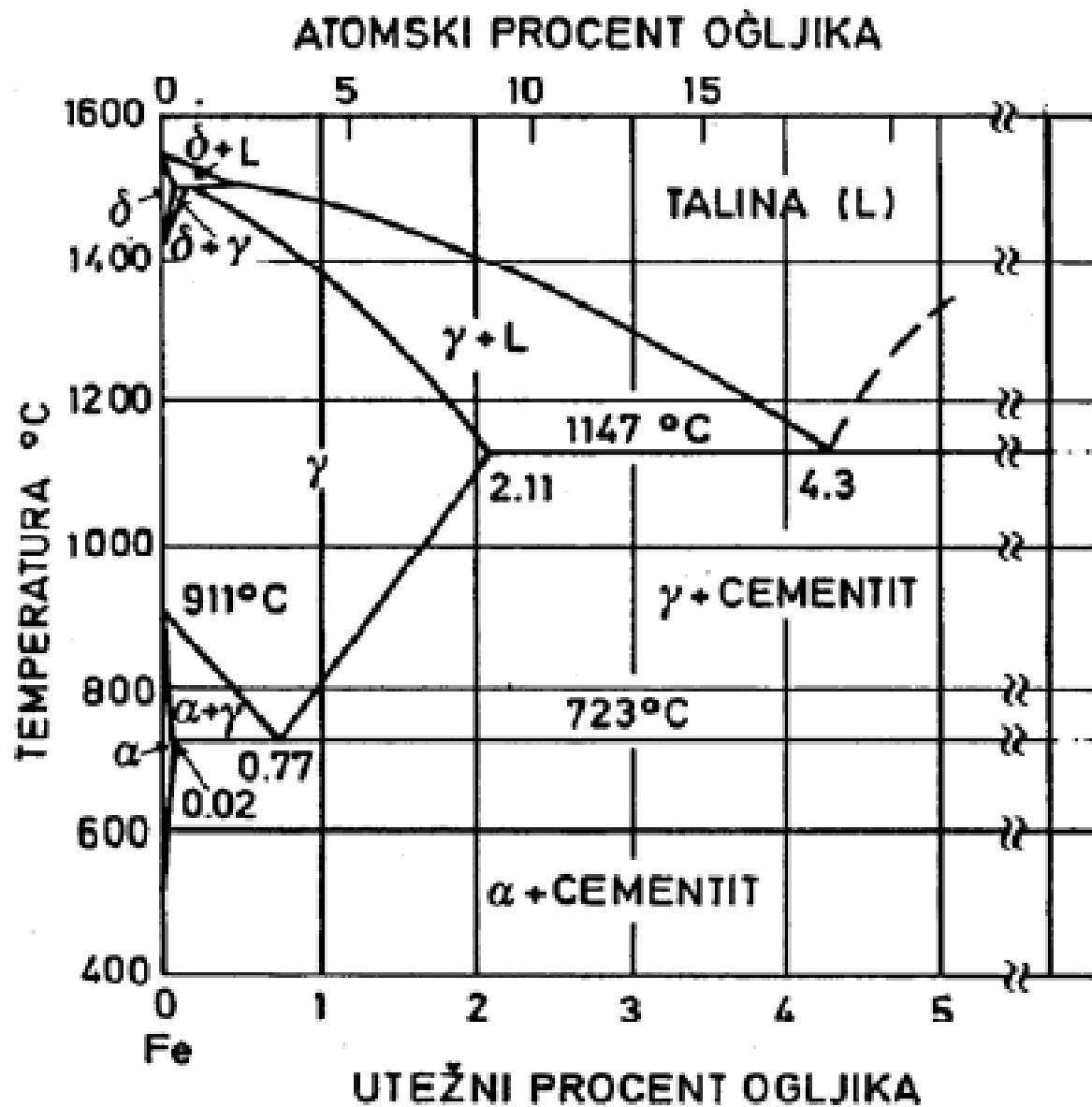
▣ Niso nujno negativne!

Pri zlitinah izkoriščamo vmesne tuje atome, le-ti ob prisotnosti v kristalni rešetki osnovne kovine povečujejo odpornost proti zdrsu in otežujejo plastične deformacije. To dejstvo naredi zlitine bolj trdne z višjo trdnostjo od čistih kovin.

1.4. Kovinske faze

- **Zlitina** nastane s taljenjem in mešanjem različnih kemijskih elementov. Sestavine zlitine imenujemo komponente. Pri ohlajanju oziroma strjevanju zlitine nastopajo naslednji primeri:
 - i) komponenti se ne mešata,
 - ii) komponenti se delno mešata,
 - iii) komponenti se popolnoma mešata.
- *Faza* - področje z istimi fizikalnimi in kemičnimi lastnostmi in isto komponentno sestavo.
- Stanje zlitine je definirano, če so v njeni mikrostrukturi faze kvalitativno in kvantitativno določene.
- Zlitina je v ravnotežnem stanju, če se le-to pri konstantni temperaturi in tlaku tudi po dolgem času ne spremeni.
- Odvisnost ravnotežnega stanja zlitine od spremenljivk stanja (temperatura, tlak, koncentracija) prikazujemo z ravnotežnimi diagrami stanja.

Fe - Fe₃C fazni diagram



*DODATEK: sestava kovin

*Jekla:

AISI tip	Vsebnost utežni %									
	Fe	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	V	C	S	drugo
Ogljična (feritna) jekla										
A 501	ostalo	4-6	-	1,0	0,40-0,65	1,0	-	0,10	0,03	0,40(P)
A 5082	ostalo	0,35	0,7	0,7	0,6	-	0,05	0,27	-	
Nizko legirana (bainitna) jekla										
1Cr 1Mo-0,25V	96,07	1,0	-	0,85	1,25	0,25	0,25	0,33	-	
Ni-Cr-MoV (A469 class 8)	ostalo	1,25-2,00	3,25-4,00	0,60	0,30-0,60	0,15-0,3	0,05-0,15	0,28	0,018	0,015(P)
Feritna (martenzitna) nerjavna jekla										
403 (S40300)	ostalo	11,5-13,0	-	-	1,0	0,5	-	0,15	0,03	0,040(P)
410 (S41000)	ostalo	11,5-13,5	-	-	1,0	1,0	-	0,15	0,03	0,040(P)
Austenitna nerjavna jekla										
304 (S30400)	ostalo	18-20	8-10,5	-	2,0	1,0	-	0,08	0,03	0,045(P)
316 (S31600)	ostalo	16-18	10-14	2,0-3,0	2,0	1,0	-	0,08	0,03	0,045(P)

*Cirkonijeve zlitine:

Tip	Vsebnost (uteži %)				
	Zr	Sn	Fe	Cr	Ni
Zirlo 2	ostalo	1,5	0,12	0,1	0,05
Zirlo 4	ostalo	1,5	0,2	0,1	-
Zirlo™	ostalo	1,0	0,1	-	-

*Nikljeve zlitine:

Tip	Vsebnost (ut. %)							
	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Ti	drugo
Inconel 600	60,5	23,0	14,1	0,08	0,5	0,2	1,4	
Inconel 600	60,0	30,0	9,5	0,03	-	-	-	
Inconel (Alloy) 800H	32,5	21,0	46,0	0,05	0,8	0,5	0,4	0,4 Cu
Inconel (Alloy) 800	34,0	21,0	43,0	0,02	0,64	0,3	-	-

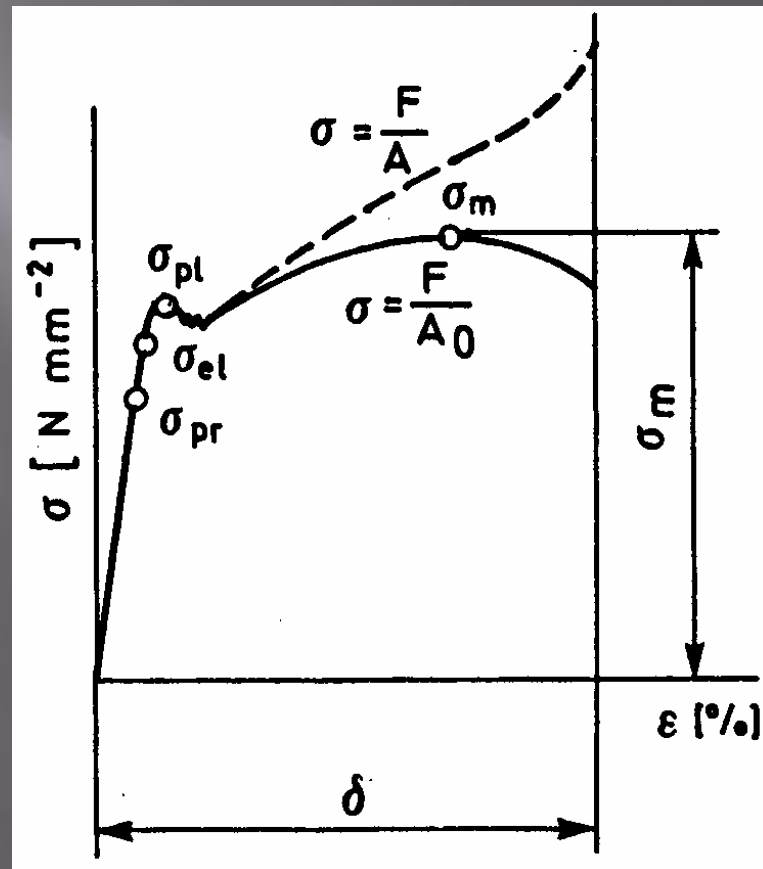
2. Mehanske lastnosti materialov

- ▣ Povedo odziv materiala na različne mehanske sile.
- ▣ Te lastnosti se ugotavljajo oz. določajo z uveljavljenimi metoda ter mehanskimi preizkusi.
- ▣ Med te lastnosti spadajo: trdnost (nateza, tlačna, upogibna, strižna, ...), elastičnost, trdota ter žilavost.
- ▣ V znatni meri so odvisne od mikroskopske strukture ter tehnoloških postopkov. (Pri jeklih sta pomembna zlasti dva mehanizma utrjanja: *hladno mehansko utrjanje* in *termične obdelave*.)

Lastnost	Oznaka	Definicija ali pojasnilo	Enota
Napetost	σ	Sila na enoto prereza (F/A_0)	N/mm^2
Raztezek	ε	Relativni razteg glede na prvotno dolžino $\varepsilon = l/l_0$	-
Modul elastičnosti	E	Napetost pri raztezkju 1 oziroma napetost/raztezek	N/mm^2
Natezna trdnost	σ_m	Najvišja napetost, ki jo material vzdrži glede na prvoten prerez	N/mm^2
Meja plastičnosti	σ_{pe}	Napetost ob pojavu plastičnih deformacij	N/mm^2
Udarne žilavost	ρ_u	Udarne delo na enoto prereza $\rho_u = W/A_0$	J/mm^2
Trdota		Odpor proti plastičnemu prodoru tujka v površino	empirična

2.1. Trdnost in elastičnost

- Najlažje razumemo z opisom *nateznega preizkusa* na preizkušancu iz mehkega jekla.
- *Natezna napetost*, $\sigma = F/A_0$ ter *relativni raztezek*, $\varepsilon = \Delta l/l_0$.
- σ_{pr} ponazarja mejo proporcionalnosti. Tu velja Hookov zakon:
$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma, E\text{-modul elast.}$$
- σ_{el} - meja elastičnosti.
- σ_{pl} - meja plastičnosti.
- σ_m - natezna trdnost.
- Zlomna trdnost je napetost ob zlomu.



*Vedenje mehkega jekla pri nateznih obremenitvah.

Primeri diagramov $\sigma - \varepsilon$:

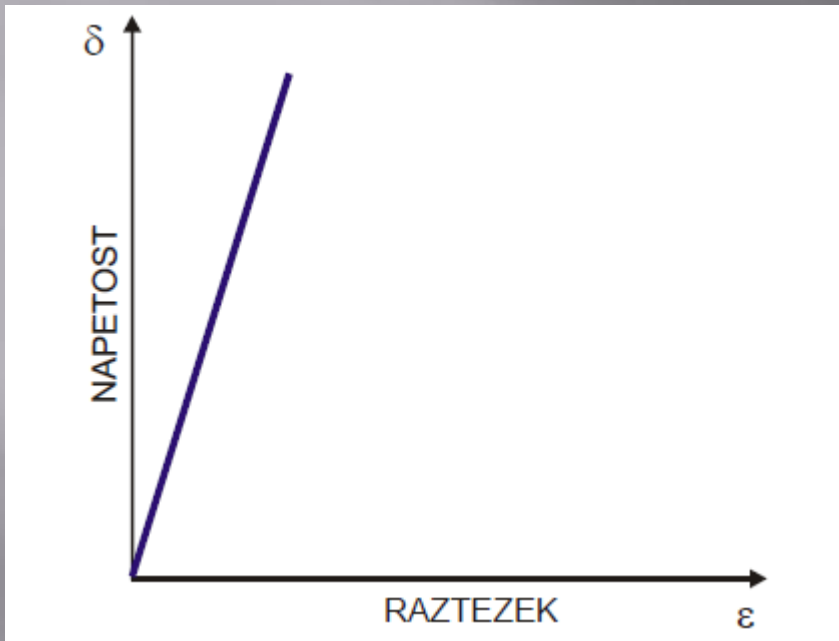


Diagram $\sigma - \varepsilon$ za krhek material (npr. lito železo).

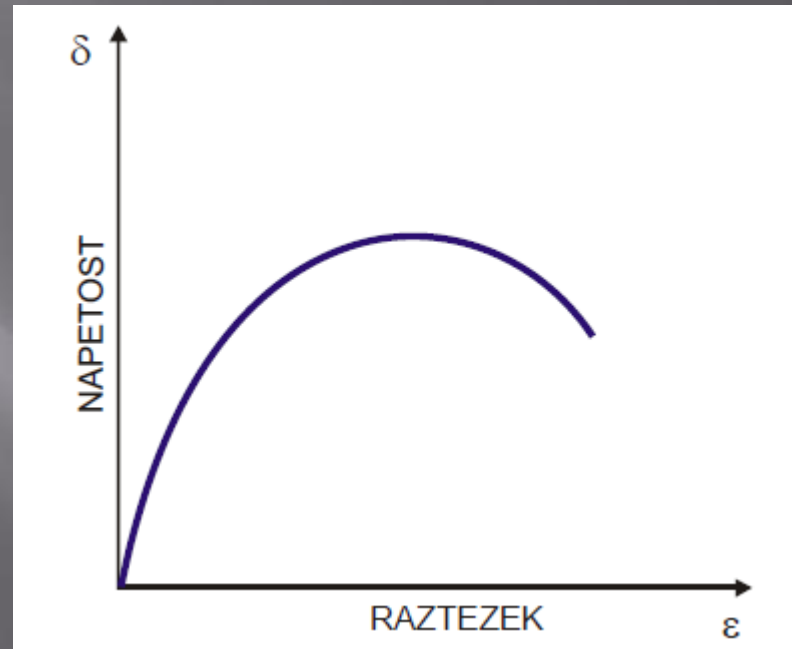
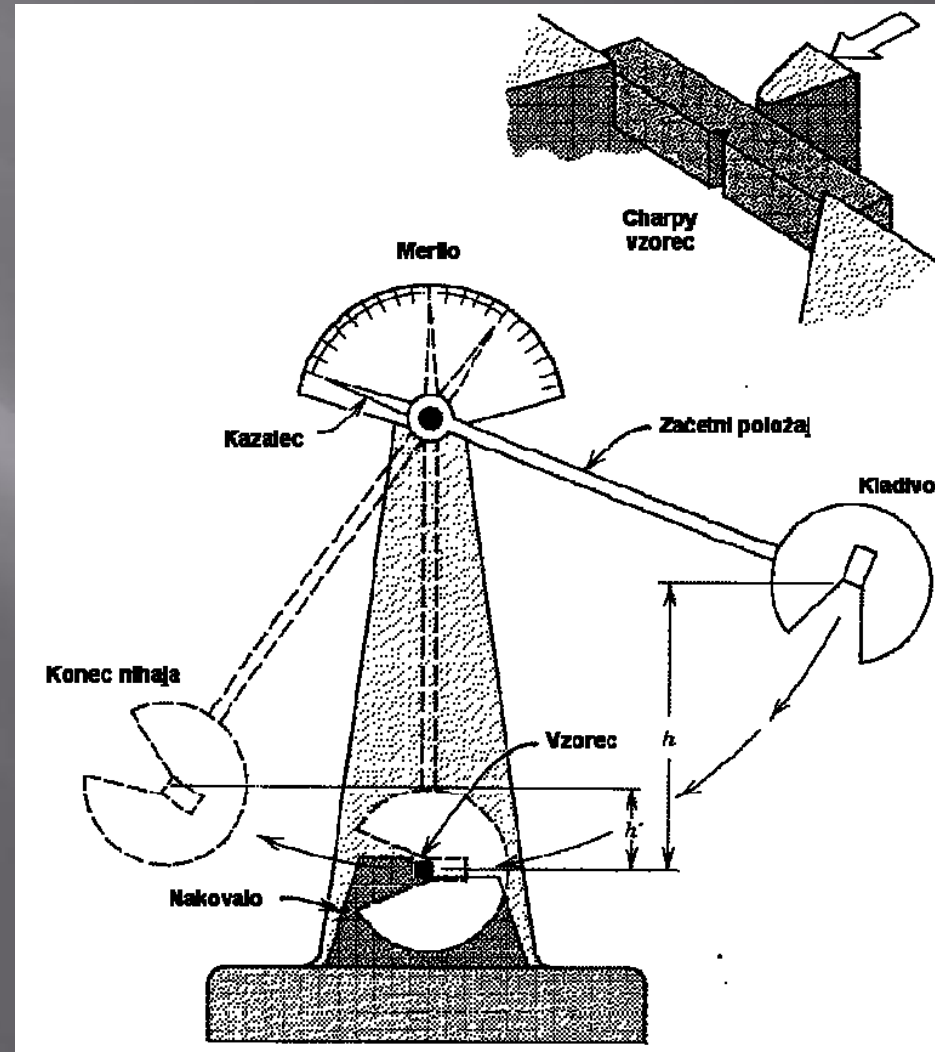


Diagram $\sigma - \varepsilon$ za žilav material (npr. aluminij, baker, mehko železo, jeklo pri visoki temp.).

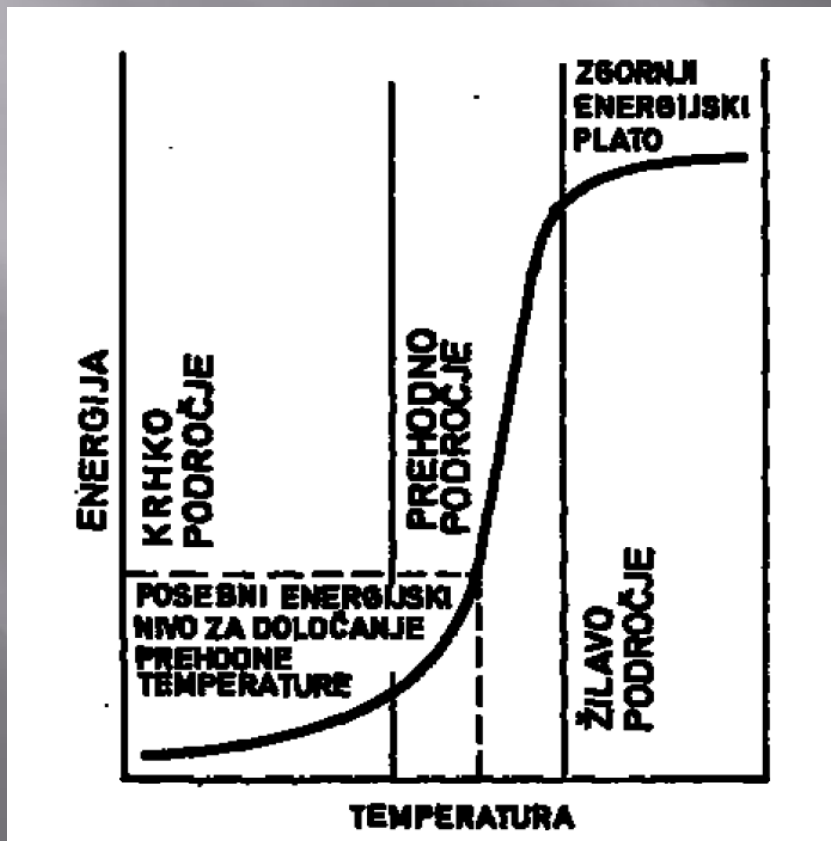


2.2. Udarna žilavost

- ▣ Je energija, ki je potrebna za zlom kosa materiala.
- ▣ Kaže odpornost proti krhkemu lomu.
- ▣ Merimo jo po standardiziranih postopkih s katerimi je določena oblika preizkušanca. V Evropi in ZDA je uveljavljen Charpyjev preizkus.



- Udarno žilavost ρ_u izrazimo kot udarno delo W na enoto prereza preizkušanca A_0 : $\rho_u = W/A_0$
- Udarna žilavost jekla je močno odvisna od temperature
 - pri nizkih temperaturah imamo *krhki lom*, pri visokih pa *žilav zlom*.

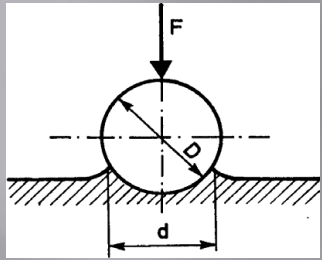


*Diagram lomna energija - temperatura, ki kaže prehod iz krhkega v žilav zlom.



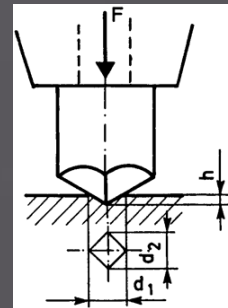
2.3. Trdota

- Trdota je odpornost materiala proti prodiranju tujka v njegovo vrhno plast.
- Trdoto merimo s posebnimi, popolnoma standardiziranimi preizkusi:

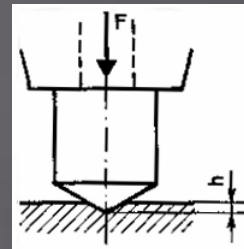
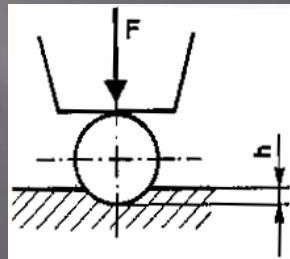


- Trdota po **Brinellu**: mera za trdoto je razmerje med vtisno silo kroglice in površino vdrtine (kalote). Omejitev je trdnost kroglice.

- Vickersov** postopek: mera za trdoto je razmerje med vtisno silo in površino vtiska, ki ima obliko kvadrata. Vtisek izmerimo pod mikroskopom. Omogoča merjenje vseh trdot.

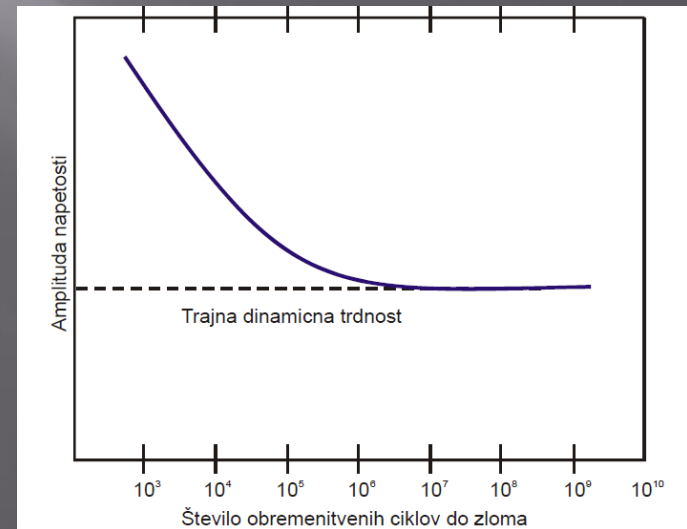


- Rockwellov** postopek: mera za trdoto je globina vtiska (kroglica za male trdote, stožec za velike).



2.4. Utrujenost materiala

- ▣ Je pojav, kjer se nek del zlomi ali odpove zaradi velikega števila ponavljajočih se obremenitev.
- ▣ Skrajna posledica - *utrujenostni zlom ali okvara* (v splošnem manjša od meje plastičnosti).
- ▣ Utrujenostne lastnosti kovin preizkušamo s *trajnostnim preizkusom*, s katerim ugotavljamo *trajno dinamično trdnost* (vrednost pri kateri bi za zlom potrebovali neskončno obremenitvenih ciklov).
- ▣ Najpogosteje pride do tovrstnih okvar na ceveh toplotnih izmenjevalnikov, vibrijajoči deli, ... (uparjalnik, gorivne srajčke, ...)



*Primer dinamične in trajne dinamične trdnosti kovine.

2.5. Lezenje materiala

- ▣ je počasno, časovno odvisno deformiranje materiala pri daljših statičnih obremenitvah, ki povzročajo napetosti, manjše od meje plastičnosti.
- ▣ Pojav je odvisen od temperature. Problematičen postane pri strojih in strojnih napravah, ki delajo pri višjih temperaturah (npr. pri parnih kotlih, plinskih in parnih turbinah in drugih toplotnih strojih).
- ▣ *Hitrost lezenja*: pod temperaturo rekristalizacije se pri manjšanju statične obremenitve lezenje lahko ustavi, ker se material utrdi. Napetost, pri kateri se lezenje materiala ravno še ustavi, imenujemo *trajna statična trdnost*. Nad temperaturo rekristalizacije se lezenje ne ustavlja več.
- ▣ Zlitine, odporne proti lezenju, imajo visoko tališče.

2.6. Kompatibilnost materialov

- ▣ Kompatibilni so materiali, ki nimajo škodljivih medsebojnih vplivov v napravi, v kateri sodelujejo. Mehanizmi, ki lahko znatno vplivajo na uporabnost materialov (predvsem jekel) v jedrski tehnologiji:
 - *Koroziivnost* - v primarnem in drugih sistemih jedrske elektrarne, kjer pridejo v stik s hladili in jedkimi snovmi pri visokih temperaturah.
 - *Galvanska koroziija* - pomeni, da ne smemo uporabljati v istem tekočinskem sistemu kovin, ki bi imele preveč različne elektrokemijske potenciale.
 - *Različne temperaturne razteznosti* - kovine, ki so medsebojno kakorkoli povezane, povzročajo nezaželene temperaturne napetosti ali lahko celo poškodujejo naprave.

3. Toplotne lastnosti materialov

3.1. Specifična toplota

- ▣ $Q = c m \Delta T$; c – specifična toplota [J/kg K]
- ▣ V splošnem je $c(T)$ ter od načina dovajanja toplote (slednje ne drži za trdne snovi). V praksi pa ponavadi računamo s srednjimi vrednostmi, ki veljajo na nekem temp. intervalu (velja za vse količine povezane s toplotnimi lastnostmi).

3.2. Toplotna prevodnost

- ▣ $\Phi = \frac{\lambda}{\delta} \Delta T A$; λ - toplotna prevodnost [W/mK]
- ▣ V splošnem $\lambda(T)$ in pada z naraščajočo temp.

3.3. Temperaturna razteznost

- ▣ Večina teles se pri segrevanju razteza, pri ohlajanju pa krči. Velja: $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$ oz. $\Delta V = \beta V_0 \Delta T$

4. Električne lastnosti materialov

4.1. Prevodnost

- ▣ Ohmov zakon: $I = U/R;$
- ▣ $R = \rho_s L/A;$ ρ_s je specifična upornost [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]
- ▣ Obratno vrednost specifične upornosti pa imenujemo prevodnost: $\gamma = 1/\rho_s.$

5. Kemijske lastnosti materialov

- ▣ *Seminarja od Bora in Klare.*

5. Materiali jedrskih elektrarn

5.1. Komponente in materiali jedrskih elektrarn

- ▣ Materiali *reaktorske sredice*
 - gorivo
 - gorivni elementi
 - regulacijski elementi
- ▣ Materiali za *toplotne izmenjevalnike*
 - uparjalniki
 - kondenzator
- ▣ Materiali sistemov *tlačne meje*
 - reaktorska posoda
 - cevovodi
- ▣ Materiali za *turbogeneratorje*

Komponenta	Material
Jedrsko gorivo	uran, plutonij (dioksida le-teh)
Reaktorski strukturni deli	cirkonijeve zlitine, jekla, nikljeve zlitine
Moderator in reflektor	grafit, voda, berilij
Regulacijski elementi	borovi karbidi, kadmij, hafnij, borova kislina, gorljivi absorberji (Gd_2O_3)
Hladila	He, CO_2 , voda, tekoče kovine (Na)
Ščiti	lažji, srednji in težki elementi ali spojine
Varnostni sistem	vrsta materialov (plastike, kovine, keramike) za sisteme za zasilno hlajenje sredice, nadzorno instrumentacijo itd.

6.2. Materiali za tlačnovodne jedrske elektrarne – PWR

*Glavni materiali, problemi in vzroki njihove degradacije v jedrskih elektrarnah s tlačnovodnimi reaktorji :

Komponente	Ključni material	Glavni problem	Primarni vzrok
1. Sredica			
gorivna palica	UO ₂ /Zirlo	predrtje srajčke	razpokanje zaradi napetostne korozije
gorivni element	316 SS/Zirlo	raztezanje in upogibanje	lezenje/nabrekanje in lezenje/korozija
regulacijska palica	B ₄ C/304 SS	predrtje srajčke	razpokanje zaradi napetostne korozije
2. Tlačne meje			
tlačna posoda	nizko legirana jekla	celovitost v prisotnosti malih razpok	radiacijske poškodbe in utrujanje materiala
cegovodi	ogljična jekla	razpokanje	korozija
3. Toplotni menjalniki			
uparjalnik	ogljična jekla, Ni-zlitine	razpokanje cevi	splošna in napetostna korozija
kondenzator	Cu-Ni zlitine	razpokanje cevi	napetostna korozija in erozija
4. Turbina	Ni-Cr-Mo-V jekla	razpokanje	utrujenost materiala, splošna in napetostna korozija

6.3. Reaktorski strukturni deli

- ▣ Reaktorski strukturni materiali so materiali komponent, ki omogočajo fizično zaščito jedrskega goriva in mehansko trdnost in strukturno integriteto reaktorja. To so materiali za:
 - srajčke gorivnih palic,
 - konstrukcijske dele gorivnih elementov,
 - reaktorske posode,
 - nosilne plošče sredice,
 - cevovode,
 - kanale gorivnih elementov,
 - nosilce kontrolnih elementov.

*Glavne zahteve in osnovni materiali za reaktorske strukturne dele:

Osnovne zahteve	Osnovni materiali
Nizka absorpcija nevtronov	Zr, Al, Mg, Be
Visoka trdnost in žilavost	ogljična jekla, nerjavna jekla
Visoka termalna stabilnost	Mo, Ti, Ta, W
Nizka inducirana radioaktivnost	keramike: BeO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂
Dobre lastnosti toplotne prevodnosti	cementi: ZrSi ₂ , SiC-Al
Korozijska odpornost pri visokih temperaturah	grafit

6.4. Moderatorji in reflektorji

- ▣ Moderatorji so materiali, ki dobro zavirajo nevtrone. V večini energijskih reaktorjev je moderator kar hladilo, ki obliva gorivne elemente.
- ▣ Reflektorji so komponente, ki nevtrone, uhajajoče iz sredice, reflektirajo nazaj v sredico.

*(*Pri termičnih reaktorjih so zahteve za moderatorje in reflektorje enake.)*

*Jedrske zahteve in glavni materiali za moderatorje in reflektorje:

Jedrske zahteve	Glavni material
Visok sipalni pesek za nevtrone	D ₂ O, H ₂ O
Velika izguba energije nevtronov po trku z jedrom	H ₂ , C (grafit)
Majhen absorpcijski presek za nevtrone	Be, BeO

(berilij je bil uporabljen predvsem v eksperimentalnih reaktorjih)

6.5. Regulacijski elementi

- ▣ Varnost jedrskih reaktorjev dosežemo z regulacijo:
 - hitrosti nastajanja nevtronov,
 - hitrosti izgube nevtronov zaradi uhajanja,
 - hitrosti izgube nevtronov zaradi parazitske absorpcije v reaktorski sredici.
- ▣ Zgoraj naštetu dosežemo z regulacijskimi elementi.

*Osnovne zahteve in možni materiali za regulacijske elemente:

Osnovna zahteva	Možni materiali
Visoka absorpcija nevtronov	B, Cd, $^{10}\text{B}_4\text{C}$, Ag
Primerna mehanska trdnost	Hf, Ir
Visoka termična stabilnost in stabilnost na obsevanje	Eu, Dy
Dobre lastnosti prenosa toplote	Gd, Er
Visoka odpornost na obrabo in korozijo	Sm, Lu, Gd_2O_3 , Eu_2O_3 , Er_2O_3

6.6. Hladila

- ▣ Osnovne zahteve za izbiro reaktorskega hladila, ki zagotavljajo dober prenos toplote, so: *visoka toplotna prevodnost, nizka gostota in velika specifična toplota.*

*Osnovne zahteve in nekateri materiali za reaktorska hladila:

- ▣ He, CO₂ - nizko tališče; H₂O, D₂O – majhna absorpcija nevtronov; Na, K, Bi, Pb – visoka termična stabilnost in stabilnost na obsevanje.

6.7. Radiološki ščiti

- ▣ Razdelimo jih v tri glavne skupine:
 - materiali iz *težkih elementov* za atenuacijo sevanja gama in upočasnjevanje hitrih nevtronov (do ~ 1 MeV) z neelastičnim sipanjem,
 - materiali iz *srednje težkih elementov* in njihovih spojin za upočasnjevanje nevtronov (pod ~ 1 MeV) z elastičnim sipanjem,
 - materiali iz *lahkih elementov* (vodik, bor) in njihove spojine za upočasnjevanje hitrih in zajetje termičnih nevtronov brez produkcije sevanja gama.

*Glavne zahteve in materiali za radiološko zaščito:

Glavna zahteva	Material
Upočasnitev hitrih nevtronov	lahki elementi in njihove spojine (H ₂ O)
Absorpcija termičnih nevtronov	B, B ₂ O ₃ , srednje težki materiali (Fe, beton)
Atenuacija sevanja gama	težki elementi, Pb, Bi, W