

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.1 Uvod

O osnovnim vlastitostima **betona** bitnima za njegovu primjenu u **graditeljstvu** uči se u predmetu o **gradivima**, a o onima što ih mora imati želimo li ga rabiti za **betonske nosive sklopove** uči se predmetu **Betonske konstrukcije**.

Beton za **prednapete** sklopove mora imati vlastitosti još za jedan stupanj **zahtjevnije**.

Poznavanje osnova **tehnologije betona nezaobilazno je** za sve koji se žele baviti **PB sklopovima**, bilo to na polju projektiranja, građenja ili uzdržavanja.

To je vrlo **složena** disciplina, koja se uz to stalno **razvija**, pa **dobar stručnjak** za PB sklopove mora **držati korak** s tim razvitkom.

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.1 Uvod

Najbitnija je vlastitost betona njegova tlačna čvrstoća.

Vlačna je čvrstoća također važna, a osobito se javlja pri dokazu **graničnoga stanja uporabljivosti**.

Pri proračunu **nosivih sklopova** nužno je **poznavati zakon zavisnosti razmjernih skraćivanja/produljenja** (relativnih deformacija) od **naprezanja**, što se obično naziva **dijagramom σ/ϵ** .

Osim spomenutoga nužno je uzimati u obzir **dugotrajne utjecaje** (skupljanje i puzanje), te mjeru **toplinskog istezanja** (termičke dilatacije) betona.

Betoni se obično **svrstavaju po prostornoj težini**, te po **razredima tlačne čvrstoće**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.1 Uvod

Po **prostornoj težini** beton se svrstava u **tri skupine**:

- beton **obične** prostorne težine, $\gamma = 2\ 000 \text{ -- } 2\ 800 \text{ kg/m}^3$;
- **lagani** beton, $\gamma < 2\ 000 \text{ kg/m}^3$;
- **teški** beton, $\gamma > 2\ 800 \text{ kg/m}^3$.

Prva je skupina nesrazmjerno **najčešće u uporabi**, pa ćemo se u ovom tečaju baviti samo njome.

Valja spomenuti da se za prostornu težinu **armiranoga** betona obično uzima da je 25 kN/m^3 , pri čemu se uzima da je tu uračunana i **armatura**.

Međutim, ima okolnosti kada se ona mora **točnije utvrditi** (primjerice, pri građenju AB luka postupnim prepuštanjem).

Često se dobije da je osjetno veća (i do 27 kN/m^3).

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.1 Uvod

Po **tlačnoj čvrstoći** beton se također svrstava u **tri skupine**:

- beton **obične** čvrstoće, $f_c = 30 \text{ -- } 60 \text{ N/mm}^2$;
- beton **male** čvrstoće, $f_c < 30 \text{ N/mm}^2$;
- beton **visoke** čvrstoće, $f_c > 60 \text{ N/mm}^2$.

Valja pripomenuti da se ovdje radi o tlačnoj čvrstoći dobivenoj ispitivanjem **kocke** sa stranicom 20 cm, o čemu će kasnije biti više govora.

Kao i u predhodnom slučaju, i opet ćemo se, iz istih razloga, u ovom tečaju baviti samo betonima iz **prve** skupine.

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.2 Tlačna čvrstoća

Tlačna se čvrstoća betona ispituje **lomljenjem uzoraka** propisana oblika.

Uvriježena su **tri** oblika uzorka: kocka, valjak ($h/\varnothing = 2$) i prizma ($h/a = 3$).

U **srednjoeuropskim** se zemljama tlačna čvrstoća utvrđuje lomljenjem **kocke**, a u Francuskoj i anglosaskim zemljama – lomljenjem **valjka**.

Prizma pak služi za određivanje **modula elastičnosti** betona.

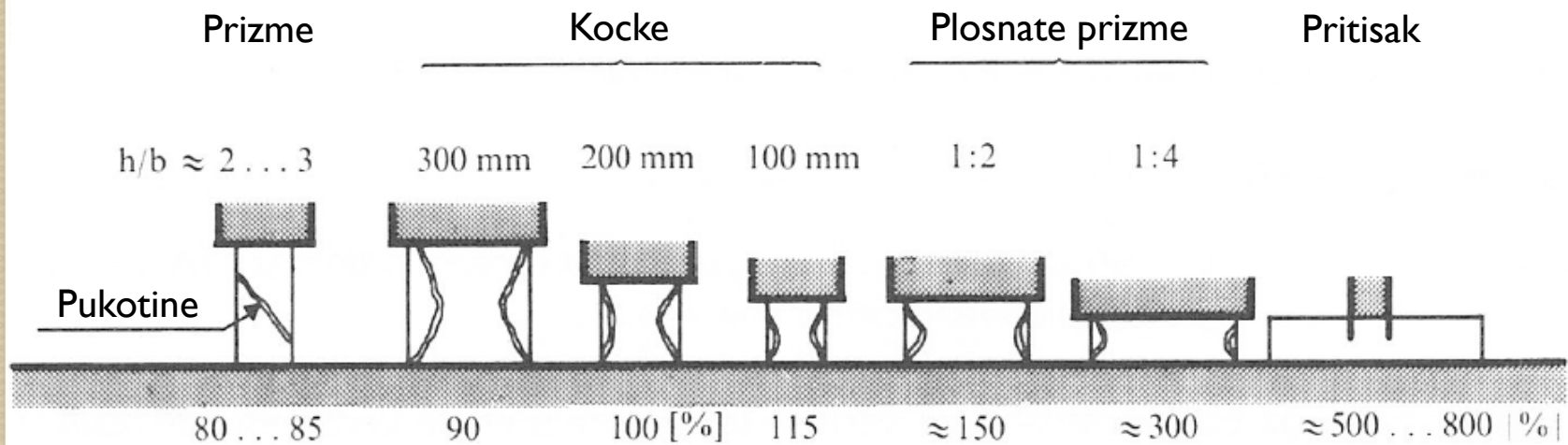
Valja reći da je **stanje naprezanja** u **prizmi bliže** onomu u dijelovima **nosivoga sklopa** napregnutima **tlakom**, dok na rezultat ispitivanja na **kocki** i **valjku** utječe **trenje** na plohama preko kojih se prenosi **tlačna sila**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.2 Tlačna čvrstoća

Na slici 5.1 predočen je utjecaj oblika uzorka na tlačnu čvrstoću po G. Franzu.



Slika 5.1: Utjecaj oblika uzorka na tlačnu čvrstoću betona po G. Franzu

Čvrstoća se ispituje pri starosti uzoraka **28 dana**, a uzorci se do tada čuvaju **u uvjetima** po mogućnosti **što bližima** onima u kojima je **ugrađeni** beton što ga uzorak predstavlja.

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.2 Tlačna čvrstoća

Budući da **čvrstoća** zavisi i od **brzine nanošenja sile**, te od **trajanja opterećenja**, **ispitivanje** se mora odvijati na **strogo propisan način**.

Osim toga, kako se **prednapinjanje** često izvodi pri **starosti** betona **manjoj od 28 dana**, mora se prirediti određen broj uzoraka i ispitati pri toj starosti.

Za određivanje **granične nosivosti presjeka** uvodi se pojam **proračunske tlačne čvrstoće** betona.

Njezina je vrijednost **osjetno manja** od čvrstoće **kocke**, dotično od čvrstoće što određuje dotični **razred** (klasu) betona, jer se time uzimaju u obzir svi **čimbenici** što utječu na **razliku** između čvrstoće **uzorka** i čvrstoće betona u **nosivomu sklopu**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.2 Tlačna čvrstoća

Evo tih čimbenika.

- **Stvarnom stanju** u sklopu **bliže** bi bilo stanje u **prizmi** kao uzorku, dok se **čvrstoća** ispituje na **kocki**.
- Uzorak se lomi u **kratkotrajnom** pokusu, dok **opterećenja** u stvarnom sklopu većinom traju **dugo**.
- **Najveća tlačna naprezanja** često djeluju u **sloju betona uza samu površinu** gdje je beton **najniže kakvoće** i gdje mu se **kakvoća** još **pogoršava** brzim **sušenjem**.

Zbog toga se **proračunska čvrstoća** računa množenjem **mjerodavne čvrstoće kocke faktorom** što je to **manji** što je **čvrstoća kocke viša**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.3 Vlačna čvrstoća

Vlačna se čvrstoća može ispitivati ili izravno, razvlačenjem prizama ili posredno, što se čini na dva načina.

Po prvomu, valjkasti se uzorak podvrgava tlaku duž nasuprotnih izvodnica, zbog čega se on rascjepljuje pri dosegnuću vlačne čvrstoće (*brazilski* postupak), a po drugom, prizmasti se uzorak podvrgava savijanju.

Po brazilskom se postupku vlačna čvrstoća precjenjuje za **15÷20 %**, a pri savijanju prizme i **dvostruko** u odnosu na izravno ispitivanje (čisti vlak).

Postoji i izraz za dobivanje čiste vlačne čvrstoće iz tlačne (čvrstoće kocke):

$$f_{ct} = 0,22(f_{cc})^{2/3} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.3 Čvrstoća pri dvoosnim i troosnim stanjima naprezanja

U pločama, ljuskama i sl. beton biva napregnut **dvoosno**.

Čvrstoća betona pri **ravninskom** (dvoosnomu) stanju naprezanja određena je **graničnom krivuljom** predočenom na slici 5.2.

Jasno se uočava **povoljan učinak bočnoga tlaka** (područje tlak-tlak), ali i izrazito **nepovoljan učinak bočnoga vlaka** (područje tlak-vlak).

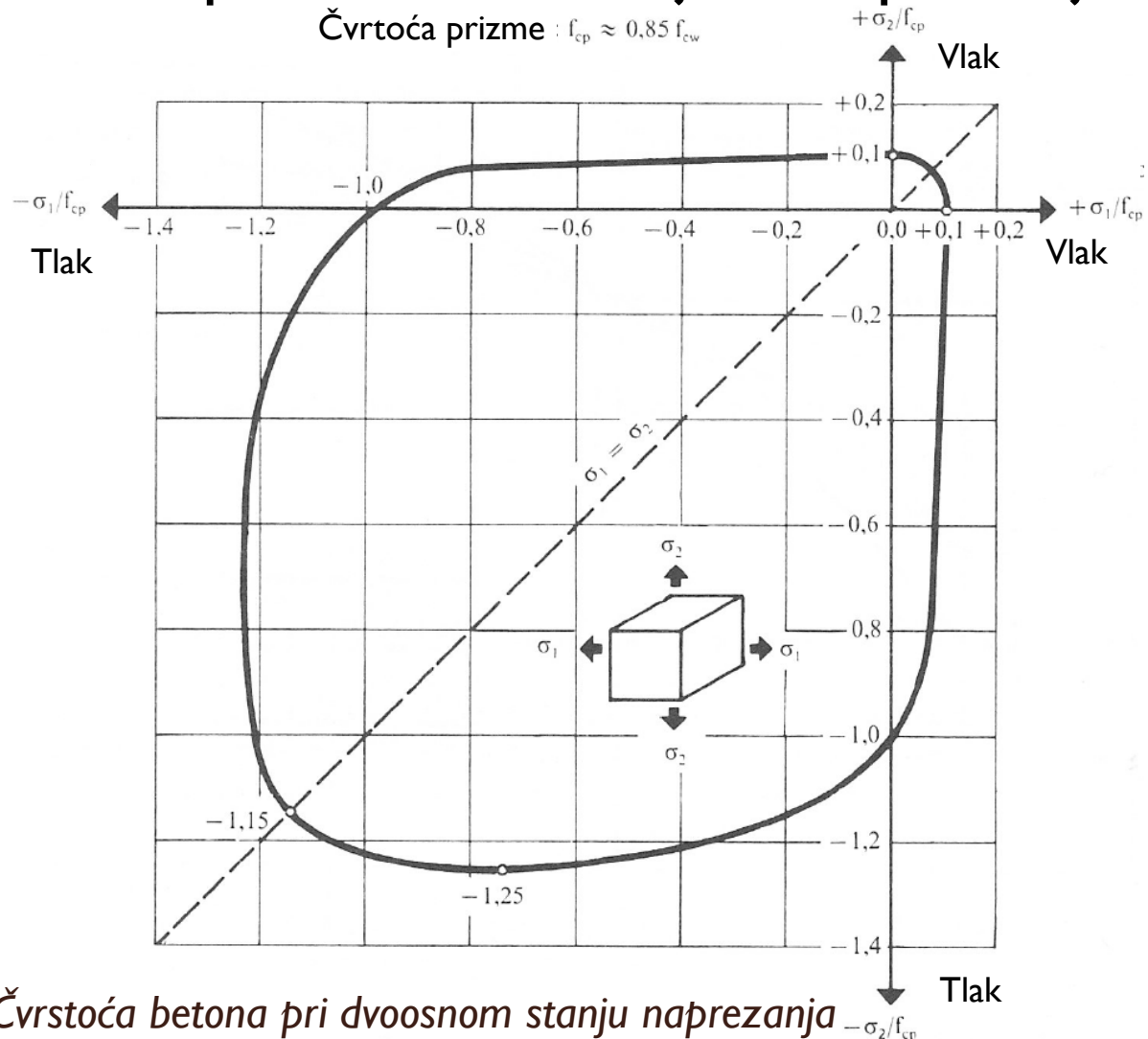
Čvrstoća pri bočnomu tlaku može biti **veća** i do **25 %** u odnosu na jednoosno stanje naprezanja.

Troosno stanje naprezanja javlja se, u **PB sklopova**, na mjestima **sidara nategā**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.3 Čvrstoća pri 2D i 3D stanjima naprežanja



Slika 5.2: Čvrstoća betona pri dvoosnom stanju naprežanja

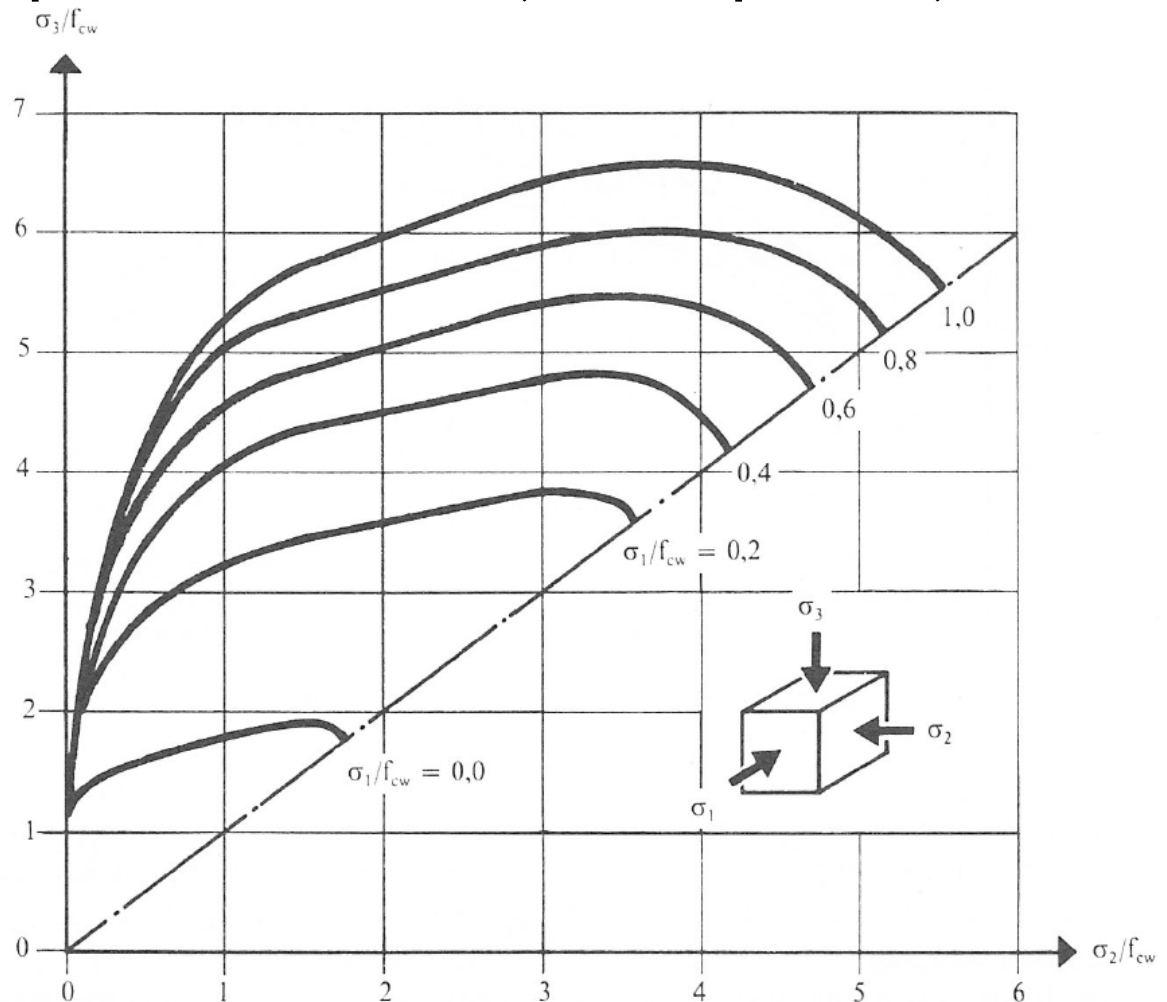
5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.3 Čvrstoća pri 2D i 3D stanjima naprezanja

Na slici 5.3 predložena je čvrstoća betona pri troosnom stanju naprezanja.

Ovoga je puta još izrazitiji priraštaj čvrstoće u odnosu na jednoosno stanje naprezanja.



Slika 5.3: Čvrstoća betona pri troosnom tlaku

5 Zahtjevi na gradiva

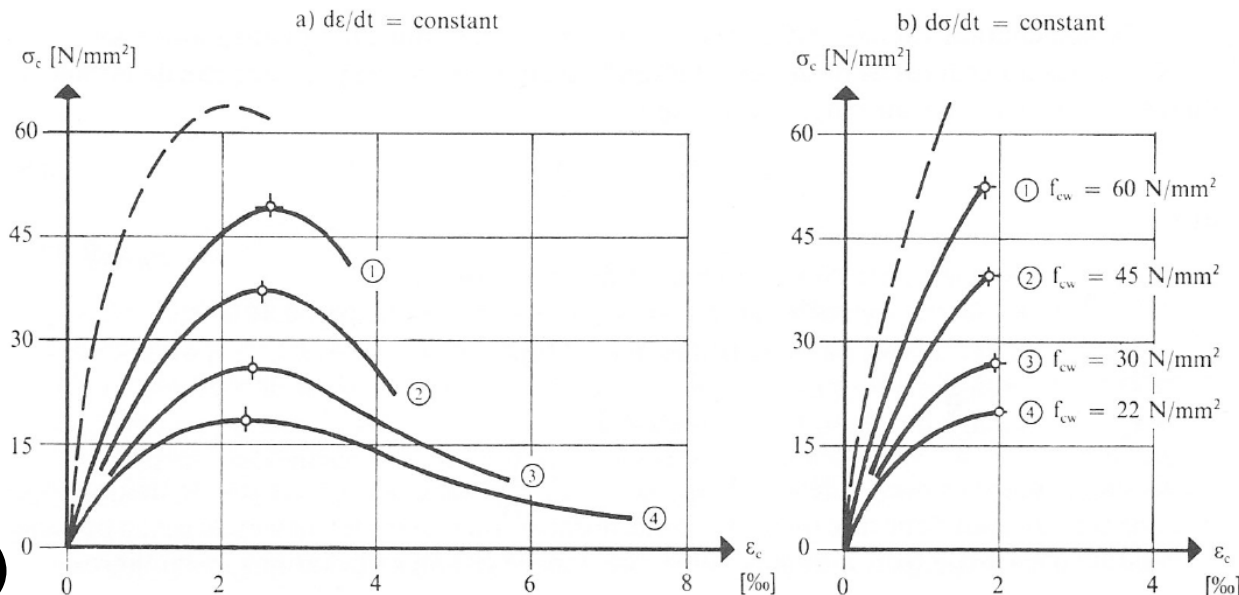
5.1 Beton

5.1.4 Skraćenja pri kratkotrajnom opterećivanju

Do razine naprezanja oko 40 % čvrstoće beton se ponaša po Hookeovu zakonu.

Nakon toga krivulja σ/ε postupno se sve jače zakrivljuje, do sloma.

Oblik gornjega dijela krivulje različit je zavisno od toga je li priraštaj naprezanja ili skraćenja pravilan (slika 5.4)



Slika 5.4: Odnos naprezanja i skraćenja izmerenih na prizmama

5 Zahtjevi na gradiva

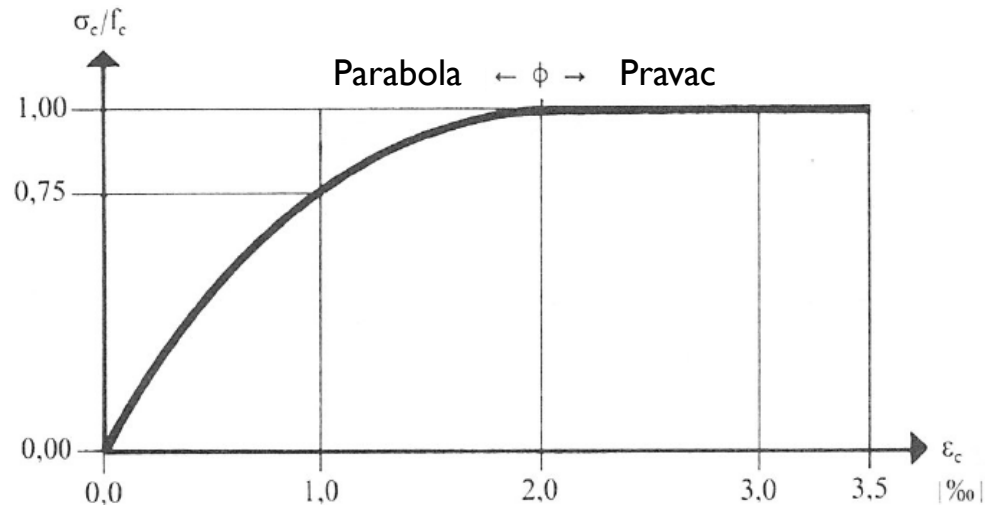
5.1 Beton

5.1.4 Skraćenja pri kratkotrajnom opterećivanju

U proračunima se rabi **pojednostavnjeni** odnos σ/ε , tzv. **radni dijagram betona**, kako smo vidjeli na prvomu predavanju (slika 5.5).

U gotovo pravčastom području odnos σ/ε određen je **modulom elastičnosti**.

Iz slike 5.4 jasno se vidi da on **raste s čvrstoćom**.



Slika 5.5: Proračunski radni dijagram betona

Postoji i izraz za dobivanje **modula elastičnosti iz tlačne čvrstoće** (čvrstoće valjka):

$$E_{cm} = 9500 \sqrt[3]{f_{ck} + 8}$$

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.4 Skraćenja pri kratkotrajnom opterećivanju

Poissonov koeficijent (omjer poprečnog i uzdužnoga skraćenja/produljenja) također zavisi od **čvrstoće**, s vrijednostima $0,15 \div 0,25$, ali budući da je njegov **utjecaj mali**, uzima se **srednja** vrijednost:

$$\nu_c = 0,20$$

Iz toga onda slijedi da je posmični modul betona:

$$G_c = E_c / [2(1 + \nu_c)] \approx 0,4E_c$$

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.4 Skupljanje betona

Skupljanje je vlastitost betona da mu se **smanjuje obujam i kada nije opterećen.**

Traje **nekoliko mjeseci**, pa i **godina**, od trenutka **vezanja cementa.**

Nastaje **hlapljenjem kemijski nevezane vode.**

Pri izradbi betona, naime, dodaje se uvijek mnogo **više vode** nego što je potrebno za **hidrataciju** kako bi se omogućila **ugradba** betona.

Skupljanje zavisi od **vlažnosti i temperature okolnoga zraka**, od **omjera ploštine** površine s koje je moguće hlapljenje i **obujma** betona, te od **udjela armature** u betonu.

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.4 Skupljanje betona

Dok je za AB sklopove dopušteno računati s **približnim vrijednostima skupljanja** betona, **skupljanje PB sklopova mora se odrediti pouzdanije.**

Po **europskim normama** (Eurokod I?) skupljanje betona određuje se prema izrazu:

$$\varepsilon_s(t, t_0) = \varepsilon_{s\infty} \cdot [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

gdje je $\varepsilon_{s\infty}$ **konačno** skupljanje što bi se teorijski ostvarilo nakon **neizmjereno duga vremena**, a β_s funkcija kojom je izražena **brzina skupljanja** u promatranom trenutku (t) i u trenutku unošenja sile prednapinjanja (t_0).

Konačno skupljanje određeno je izrazom:

$$\varepsilon_{s\infty} = \beta_{1s} \cdot \beta_{2s}$$

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.4 Skupljanje betona

Ovdje je β_{1s} funkcija što zavisi od **vlažnosti okoliša**, a β_{2s} o tzv. **srednjem polumjeru presjeka**, koji je određen izrazom:

$$d_m = \alpha \cdot (2A/O)$$

gdje je α **koeficijent** što zavisi od **vlažnosti okoliša**, A **ploština betonskoga presjeka**, a O **opseg** toga presjeka, tj. **zbroj duljina površina izloženih hlapljenju**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.5 Puzanje betona

Puzanjem se naziva vlastitost betona da mu **skraćenje pod trajnim opterećenjem polagano raste.**

Pokusi su pokazali da taj **priraštaj skraćenja traje i nekoliko desetljeća**, ali i da biva **sve sporiji i sporiji.**

Konačno skraćenje može biti i do **četiri puta veće od početnoga.**

Zavis od istih čimbenika kao i **skupljanje betona**, a osobito od **starosti betona pri nanošenju opterećenja** i od **trajanja** tog opterećenja.

Predloženo je više **teorija** što bi trebale rastumačiti pojavu puzanja, ali ni jedna **ne zadovoljava** potpuno.

5 Zahtjevi na gradiva

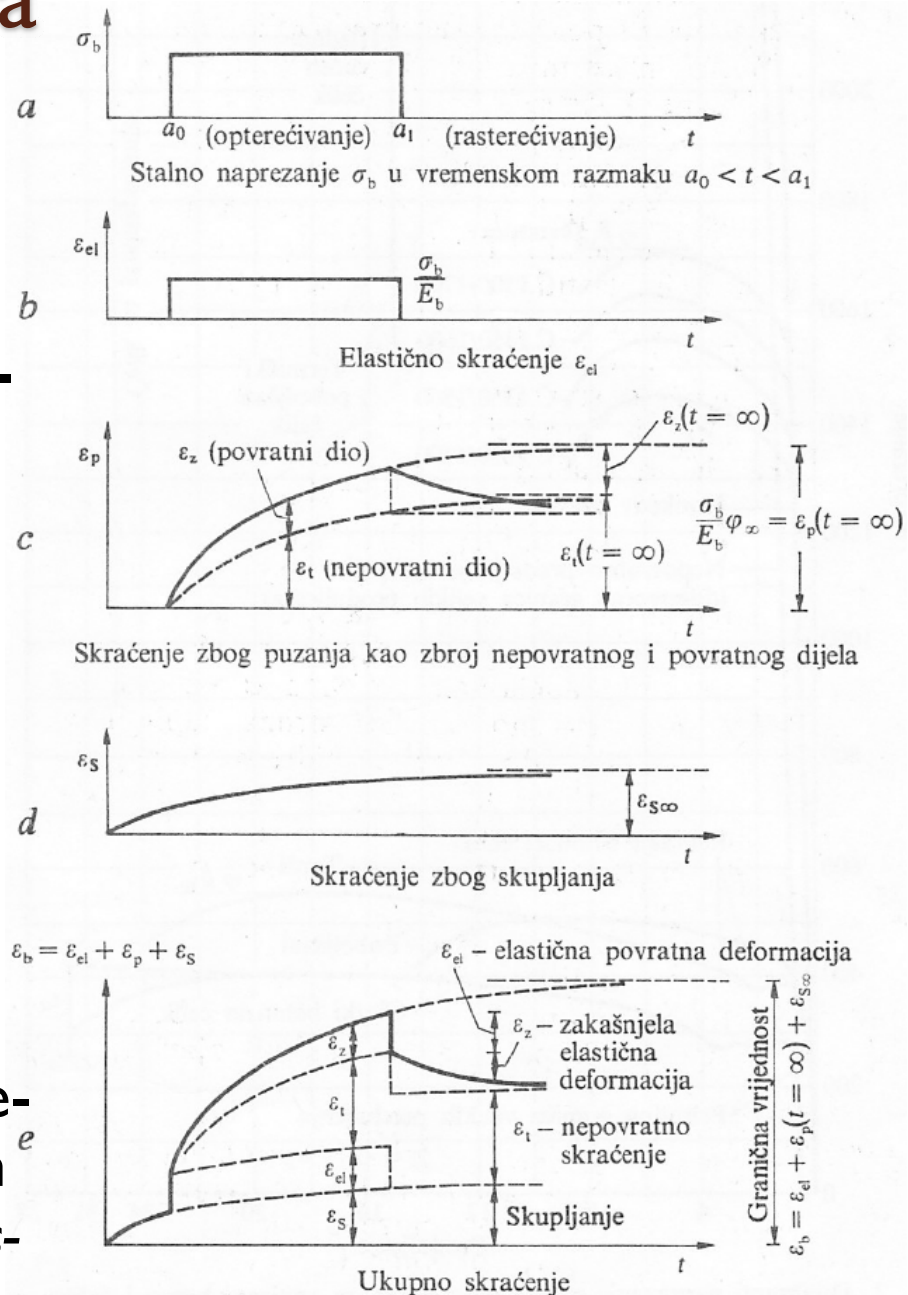
5.1 Beton

5.1.5 Puzanje betona

Prigodom razmatranja skraćenjā treba razlikovati **trenutačno** (elastično) od **priraštaja** skraćenja zbog **puzanja**.

Elastično skaraćenje **odmah iščezava** nakon prestanka djelovanja opterećenja, a s vremenom iščezava i **dio skraćenja od puzanja** (slika 5.6).

Djelomično smanjenje skraćenja naziva se **odgođenom elastičnošću** (*delayed elasticity*).



Slika 5.6: Vremenski tijek skraćenja betona zbog skupljanja i puzanja 20

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.5 Puzanje betona

Skraćenje od puzanja u trenutku t , što označuje starost betona, dobiva se iz izraza:

$$\varepsilon_k(t) = \varphi(t) \cdot \varepsilon_e$$

gdje je $\varphi(t)$ **koeficijent puzanja** u trenutku t , a ε_e **trenutačno elastično skraćenje**.

Koeficijent puzanja određuje se po europskim normama iz izraza:

$$\varphi(t) = \varphi_z \cdot \beta_z(t - t_0) + \varphi_t \cdot [\beta_t(t) - \beta_t(t_0)]$$

U ovom su izrazu:

- φ_z koeficijent **odgođene elastičnosti**: iznosi $\sim 0,4$;
- φ_t koeficijent **vremenske plastičnosti** što zavisi od istih čimbenika kao i konačna mjera skupljanja, $\varepsilon_{s\infty}$;

5 Zahtjevi na gradiva

5.1 Beton

5.1.5 Puzanje betona

- t_0 **starost** betona u trenutku nanošenja opterećenja;
- β_i koeficijenti kojima se uzima u obzir **vremensko napredovanje skraćenjā**.

U europskim normama određene su vrijednosti svih ovih veličina.

Već je rečeno da skraćenje od puzanja može biti i do četiri puta veće od početnoga.

To onda znači da modul elastičnosti pod **trajnim** opterećenjem može pasti i na **petinu** vrijednosti onoga pri **kratkotrajnomu**:

$$E_{c\infty} = E_{c0}/(1 + \varphi)$$

5 Zahtjevi na gradiva

5.2 Čelik za prednapinjanje

Po načinu **proizvodnje**, šipke pripadaju u **prirodno tvrde čelike** (njem. *naturharte Stabstähle*, engl. *hot rolled steel bars*).

Tražena **visoka čvrstoća** ovih čelika postiže se **legiranjem**, tj. dodavanjem **mangana, silicija i vanadija** u osnovnu masu što sadrži razmjerno **visok postotak ugljika**.

Proizvodi se u dvama **razredima čvrstoće**, što se donekle razlikuju i po **kemijskom sastavu**:

- St 835/1030; 0,7 % C; 1,5 % Mn i 0,7 % Si
- St 1080/1230 – ima uz gornje sastojke još 0,3 % V.

Oba razreda imaju **perlitni** ustroj (strukturu), a isporučuju se kao **glatke** ili **orebrene** šipke.

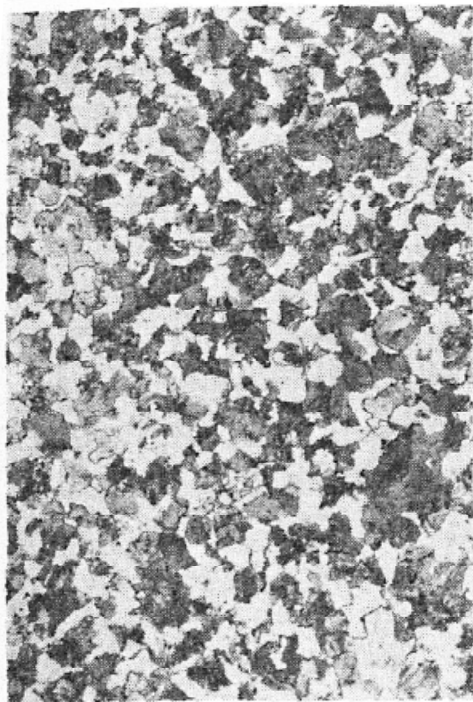
Orebrenje se postiže **valjanjem u vrućem stanju**.

Nakon vrućeg valjanja ove se šipke **razvlače** i **opuštaju** pri oko 300° C kako bi im se **podigla granica popuštanja i čvrstoća** u odnosu na one u stanju nakon valjanja (slika 5.7).

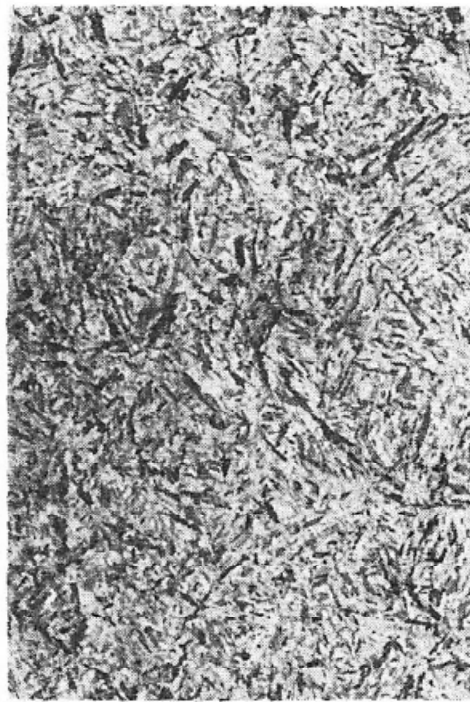
5 Zahtjevi na gradiva

5.2 Čelik za prednapinjanje

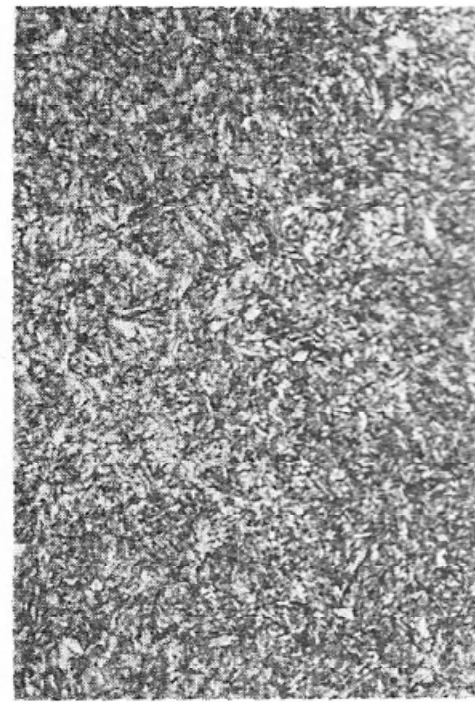
Na slici 5.7 predočen je (višestruko povećano) učinak otvrdnjivanja i opuštanja na ustroj ovog čelika.



Stanje nakon valjanja



Nakon kaljenja



Nakon opuštanja

Slika 5.7: Promjena unutarnjeg ustroja (strukture) čelika nakon postupka očvršnjivanja

5 Zahtjevi na gradiva

5.2 Čelik za prednapinjanje

U uvodnom smo izlaganju vidjeli kako je za **PB sklopove nuždan čelik visoke čvrstoće.**

Ovdje ćemo se baviti samo njime, a o čeliku za **nenapetu armaturu** bilo je dosta riječi u predmetu **Betonske konstrukcije.**

Prema vrsti čelika za prednapinjanje razlikuju se:

- strune ($\varnothing < 5$ mm);
- žice ($\varnothing 5 - 12$ mm);
- šipke ($\varnothing 26 - 36$ mm) i
- užeta ($\varnothing 12,7$ ili $15,2$ mm).

Strune i žice **okrugla** su presjeka, a površina im je **glatka** ili **orebrena.**

Orebrene strune rabe najčešće za **predhodno** napinjanje.

5 Zahtjevi na gradiva

5.2 Čelik za prednapinjanje

I jedne i druge isporučuju se u **kolutima**.

Šipke se isporučuju **pràve**, duljine oko 18 m.

Od triju struna \varnothing 2,4 mm pletu se **spletovi**, a od njih sedam, \varnothing 4,2 i 4,3 mm, dotično \varnothing 5,0 i 5,2 mm – **užeta**.

Upletanjem struna znatno se poboljšava **prianjanje** između čelika i betona, čime se ostvaruje **sidrenje** takvih natega.

U jednom **užetu** šest je struna \varnothing 4,2 (5,0) mm, a sedma \varnothing 4,3 (5,2) mm.

Ima i užeta od **19** struna: tada se oko užeta sa **sedam** struna 4,2 i 4,3 mm oplete **12** struna 4,2 mm.

I **užeta** se isporučuju na gradilište u **kolutima**, što moraju biti besprijeckorno **uskladišteni** do dana ugradbe kako bi se **spriječilo hrđanje** na koje je **čelik za prednapinjanje mnogo osjetljiviji od betonskog čelika**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.2 Čelik za prednap.

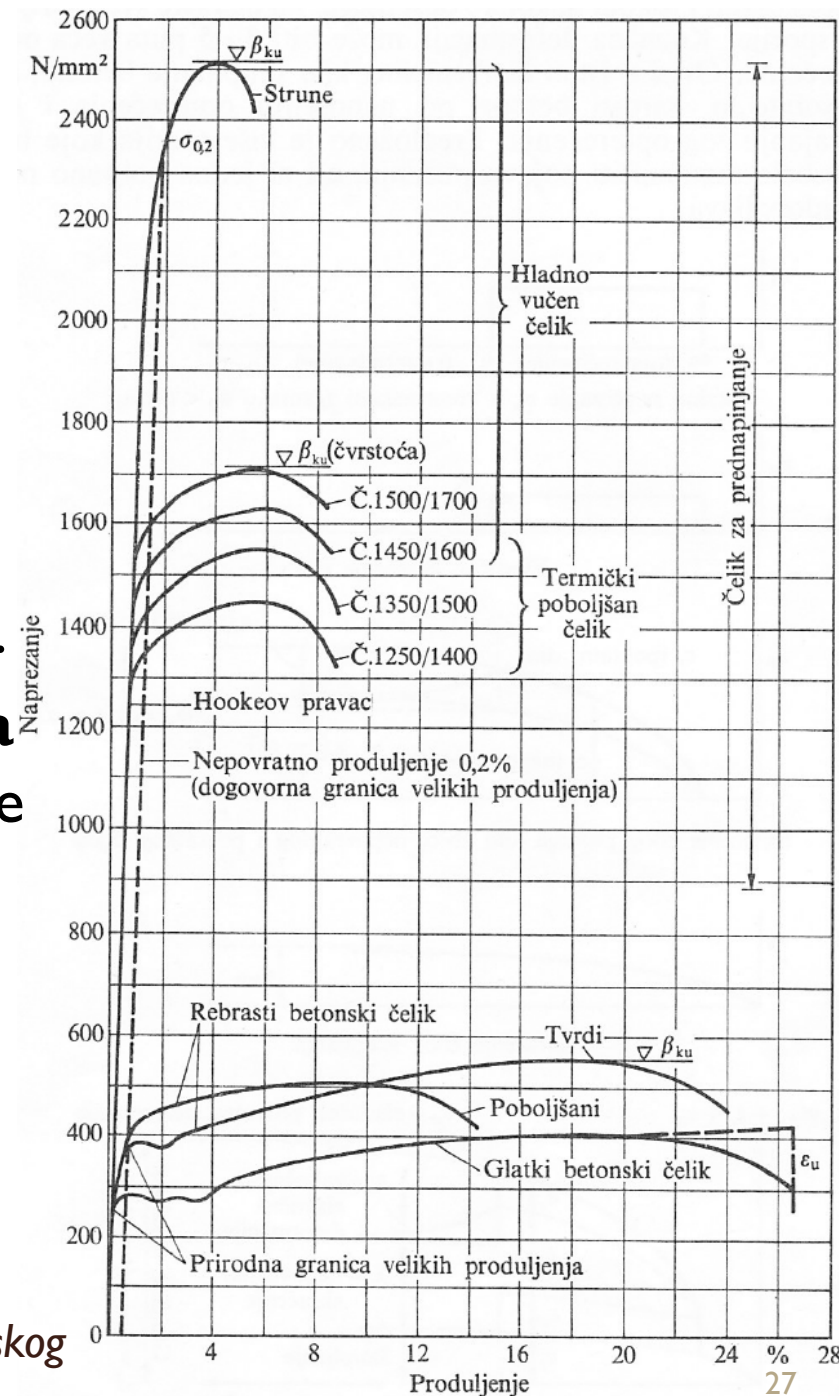
Od mehaničkih vlastitosti najvažnije su:

- prekidna čvrstoća,
- granica velikih produljenja i
- najveće produljenje (slika 5.8).

U pravilu je **prekidna čvrstoća** to veća što je **promjer strune manji**.

Granica velikih produljenja određena je naprezanjem pri kojem nakon rasterećenja ostaje trajno produljenje 0,2 % (naprezanje $\sigma_{0,2}$).

Slika 5.8: Odnos naprezanje/produljenje betonskog čelika i čelika za prednapinjanje



5 Zahtjevi na gradiva

5.2 Čelik za prednapinjanje

Najveće produljenje (produljenje pri najvećem naprezanju) iznosi 3 – 7 %.

Produljenje nakon **granice velikih produljenja** omogućuje **prilagodbu** (adaptaciju) napregnutog dijela nosivoga sklopa **preopterećenju**, što povećava **sigurnost** sklopa.

Opuštanje (relaksacija) vlastitost je napregnutoga gradiva da mu se **pri nepromijenjenoj duljini** dijela nosivoga sklopa **s vremenom smanjuje naprezanje**.

To **smanjenje naprezanja** u čeliku za prednapinjanje (ρ) može dosegnuti i **više od 10 % početnog naprezanja** (σ_{k0}).

Smanjenje naprezanja zbog **opuštanja** zavisi od **početnog naprezanja**.

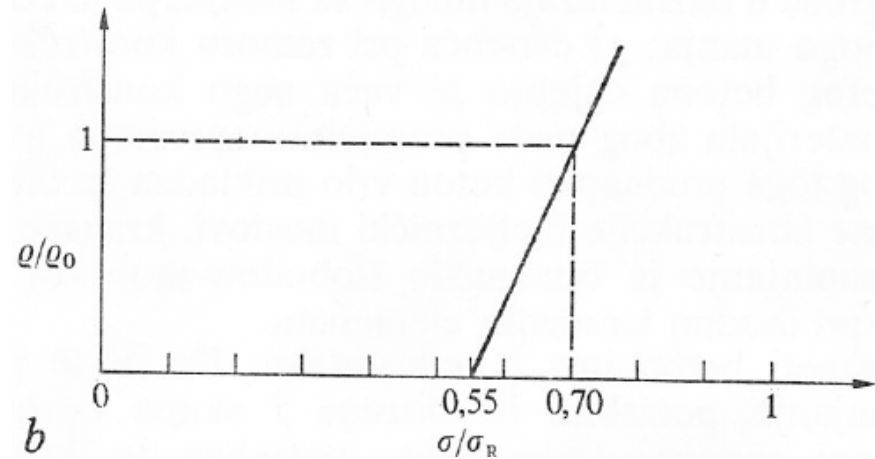
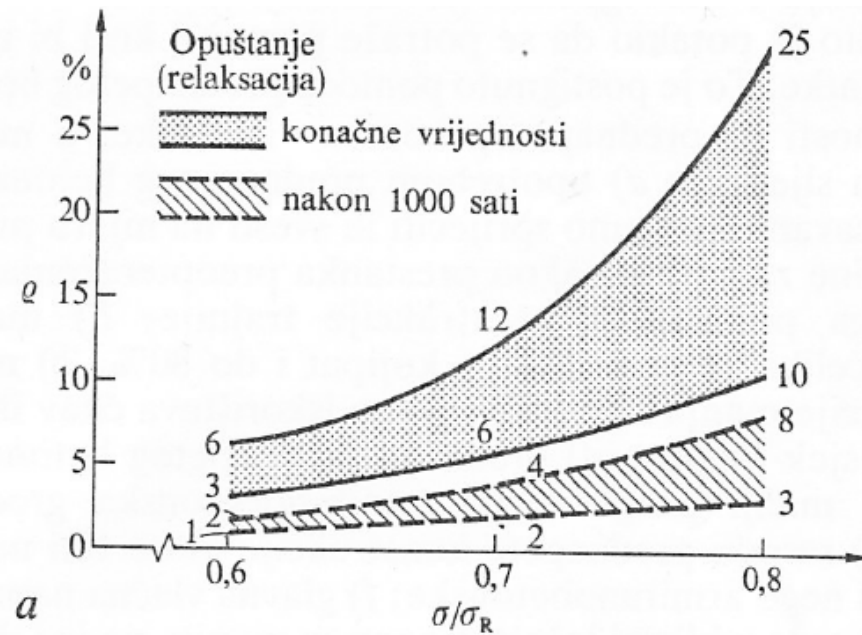
5 Zahtjevi na gradiva

5.2 Čelik za prednap.

Ako početno naprezanje **ne premašuje 55 %** prekidne čvrstoće, smanjenje naprezanja može se **zanemariti**.

Međutim, ono **naglo raste s povećanjem početnog naprezanja** (slika 5.9).

Pokus za određivanje smanjenja naprezanja traje **1 000 sati** (~ 42 dana), pa se takvim pokusom dobiva **mjera opuštanja** označena s ρ_{1000} , koja je jedna od vlastitosti čelika za prednapinjanje.



Slika 5.9: Opuštanje čelika.

- a) prosječne vrijednosti opuštanja
- b) zavisnost omjera stvarnog i nazivnog opuštanja od omjera početnog naprezanja i čvrstoće čelika

5 Zahtjevi na gradiva

5.2 Čelik za prednapinjanje

U spomenutom pokusu odigra se **u prva 24 sata oko 2/3 mjere** ρ_{1000} , a konačna mjera opuštanja, ρ_{∞} , iznosi oko $3\rho_{1000}$.

Visoko kvalitetni čelici za prednapinjanje imaju mjeru opuštanja što iznosi svega oko 3 %.

Duljina se čelične žice u PB sklopu s vremenom mijenja (smanjuje), zbog skupljanja i puzanja betona, pa je zahvaljujući tomu **stvarna konačna mjera opuštanja čelika za oko 25 % manja od one određene u laboratorijskim uvjetima.**

5 Zahtjevi na gradiva

5.3 Zaštitne cijevi

Strogo uzev, **zaštitne cijevi** (engl. *ducts*; njem. *Hülrohre*) **nisu gradivo**, nego dio **opreme**. Ipak, o njima se obično govori u sklopu poglavlja o gradivima.

Njihova je uloga trojaka:

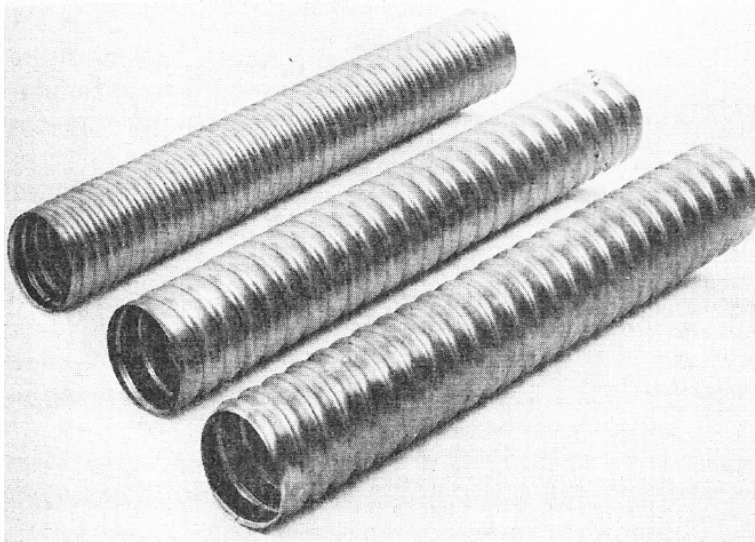
- ostvariti **slobodan prostor** za naknadnu ugradbu **vlačnih članaka** nategā,
- omogućiti **klizanje** vlačnoga članka pri **napinjanju** uz što manji otpor trenja,
- omogućiti **prianjanje** natege i okolnog betona posredovanjem **morta** (injekcijske smjese) što se ubrizgava u zaštitne cijevi **nakon** napinjanja.

Zaštitne se cijevi izrađuju od hladno valjanih **limenih vrpca** deb. $0,20 \div 0,35$ mm s pomoću priručnih **strojeva** – nerijetko i na samomu gradilištu.

5 Zahtjevi na gradiva

5.3 Zaštitne cijevi

Taj stroj prvo **nabire** lim dajući mu **rebrast** obris i stvarajući **kolčake** na rubovima, a zatim ga **namata** po **zavojitaj** (spiralnoj) **putanji**.



Slika 5.10: Uvriježene limene zaštitne cijevi

Tako se dobije **vodotijesan** među sobni spoj, a nabori daju cijevi potrebnu **krutost**.

Ti nabori u isti mah služe poboljšanju **prianjanja** između betona i uštrcanog morta.

Na slici 5.10 predočeni su uvriježeni oblici zaštitnih cijevi.

Gotove cijevi mogu se namatati u **kolute** razmjerno malih polumjera i tako se dopremaju na gradilište.

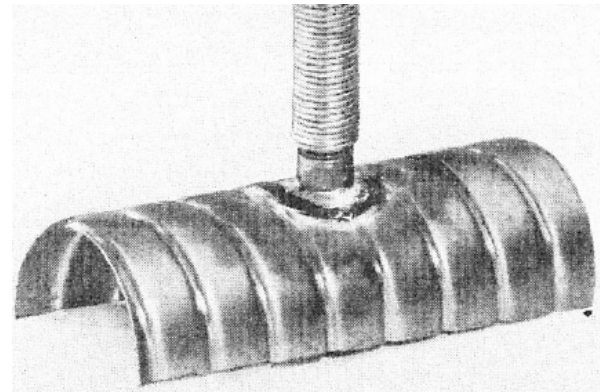
5 Zahtjevi na gradiva

5.3 Zaštitne cijevi

Ove cijevi moraju ispuniti stanovite zahtjeve na kakvoću:

- Moraju biti **krute** usprkos **savitljivosti**: moraju izdržati **nagaznu silu od 1 kN bez** znatnijeg **izobličivanja**.
- Moraju **brtviti** po šavovima (zato je najbolje da ti šavovi budu **zavareni**) kako ne bi **cementno mlijeko** iz betona prodiralo u cijev.
- Trebaju se izrađivati u što većim duljinama kakao bi nastavaka bilo što manje.
- Moraju imati **pouzdana** pričvršćene **priključke** za uštrcavanje morta i odzračnike. Ti su priključci danas najčešće od PE nabranih cjevčica (slika 5.11).

Za **slobodne** natege (u kojih se ne ostvaruje prijanjanje) zaštitne su cijevi **glatke**.



Slika 5.11: Priključak oduška ili cijevi za uštrcavanje morta na zaštitnu cijev

5 Zahtjevi na gradiva

5.3 Zaštitne cijevi

I ove se cijevi izrađuju od **plastike**.

Valja spomenuti da se u zadnje vrijeme sve češće **natege** izrađuju tako da su **zaštitne cijevi** već **navučene**.

U tom slučaju **promjer** zaštitne cijevi treba biti samo **malo veći** od promjera **šipke** (*Dywidagov* sustav), dotično od promjera **svežnja** žicā ili užetā.

Uvlače li se pak šipke ili svežnjevi **naknadno** u već ubetonirane cijevi, njihov **promjer** mora biti **osjetno veći**.

Pojedini **sustavi prednapinjanja** (o čemu će biti riječi kasnije) imaju već određene promjere za pojedinačne jačine nategā i to je navedeno u njihovim prospektima.

5 Zahtjevi na gradiva

5.4 Uštrcni mort

Ovaj se mort još naziva **mortom za injektiranje** ili **injekcijskom masom** ili **kašom za injektiranje**.

U svakom slučaju on ima **dvije glavne svrhe**:

- služi za uspostavljanje naknadnoga **prianjanja** između natege i okolnog betona i
- **štiti** vlačni članak natege od **hrđanja** (koroziije).

On je bitan sastavni dio **naknadno** prednapetih AB sklopova.

Na osnovi višegodišnjeg **iskustva**, ali i opsežnih **istraživanja** sastavljene su **smjernice** za **izradbu** i **ugradbu** ovog **morta**, a one sadrže i **zahtjeve na kakvoću** što ih on mora ispuniti.

Najiscrpnije su i najpotpunije **njemačke** smjernice, što su izdane kao dio **norme** za PB sklopove (DIN 4227).

5 Zahtjevi na gradiva

5.4 Uštrcni mort

Evo glavnih zahtjeva na uštrcni mort:

- što manje **slijeganje** od **taloženja** i **sasušivanja** – **gubitak obujma ne smije premašiti 2 %**;
- dobra **tecivost** (sposobnost tečenja) mora se **zadržati** sve do **kraja uštrcavanja morta**;
- **tlačna čvrstoća** ispitivana na **valjcima** (\varnothing 10 cm; h = 12 cm) mora biti najmanje **20 N/mm²** nakon **7 dana**, a **30 N/mm²** nakon **28 dana**;
- **otpornost na smrzavicu**: pri **jednokratnu zamrzavanju** do **-20 °C** u roku od **tri dana** uzoraka umetnutih u hladnjak pri temperaturi **+5 °C ne smije biti povećanja obujma**.

Sve ove zahtjeve općenito zadovoljava uštrcni mort zamiješan od **portlandskog cementa**.

Ipak, preporučuje se uporaba **dodataka** za poboljšanje **tecivosti**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.4 Uštrcni mort

Međutim, mora se znati da zbog pogibelji **naprezne korozije** (*stress corrosion; Spannungskorrosion*) **ni cement ni dodatci ne smiju sadržati klorida.**

Općenito treba biti **oprezan s novim dodatcima** i svakako ih treba podvrgnuti **ispitivanju kemijskog sastava** kako bi se izbjeglo **unošenje škodljivih tvari** u uštrcni mort.

Omjer vode i cementa (“vodocementni faktor”) treba biti **primjeren** zahtijevanoj **tecvosti** (što zavisi u prvom redu od duljine pojedine natege); uvriježene su mu vrijednosti između 0,35 i 0,44.

Prvotno je bilo uvriježeno (uglavnom radi štednje) dodavanje **kamenoga brašna** u uštrcni mort, ali se to danas čini samo **iznimno**; u svakom slučaju taj dodatak ne smije premašiti 20 % ukupne smjese.

5 Zahtjevi na gradiva

5.4 Uštrcni mort

U natega čiji se vlačni članci uvlače **naknadno**, pa je veći slobodan prostor između vlačnih članaka i zaštitne cijevi, dopušta se uporaba **pijeska** veličine zrna do 1 mm.

Velike šupljine u tuljcima sidara ili kućištima spojka ili međusidara zapunjavaju se **suhim šljunkom** veličine zrna 2÷4 mm (ili pače 4÷8 mm), pa se naknadno u njih **uštrcava mort**.

Mort se miješa u trajanju 4 min. u **osobitim mješalicama**.

Uzimanje i ispitivanje uzoraka mora se odvijati sukladno odgovarajućim **propisima**.

Ako iznenada nastupi **velika hladnoća**, a bliži se **istjecanje roka** za uštrcavanje morta, on se mora nadomjestiti **umjetnom smolom**, koja je oko **10 puta skuplja**, a osim toga to mora izvesti **specijalizirana tvrtka**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.5 Prianjanje

O **prianjanju** između betona i armature govori se u dotičnom poglavlju AB sklopova.

Tamo smo mogli vidjeti kako **čvrstoća prianjanja** (*bond strength; Verbundfestigkeit*) zavisi u najvećoj mjeri od triju čimbenika:

- od razvedenosti površine (profiliranosti) čelične šipke,
- od položaja šipke pri betoniranju i
- od čvrstoće betona.

Pri tomu se radi o tzv. **odreznom prianjanju** (*shear bond; Scherverbund*).

U slučaju **predhodnoga** prednapinjanja (“na stazi”) nužno je ovo odrezno prianjanje – zbog toga se već odavna rade ili **orebrene** strune ili **spletovi** struna, dotično **užeta**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.5 Prianjanje

Spletovi i užeta zahvaljuju svoje prianjanje tzv. **učinku vadičepa**, pod uvjetom da **hod zavojnice nije prevelik** – obično se preporučuje da ne bude veći od $12 \varnothing$ strune.

Švicarski učenjak *M. Birkenmeier* uveo je izraz za proračun **čvrstoće prianjanja spletova i užeta** sličan onomu za **rebraste šipke**, ali je uveo pojam “**svedene ploštine rebara**”, a_R .

Tako je:

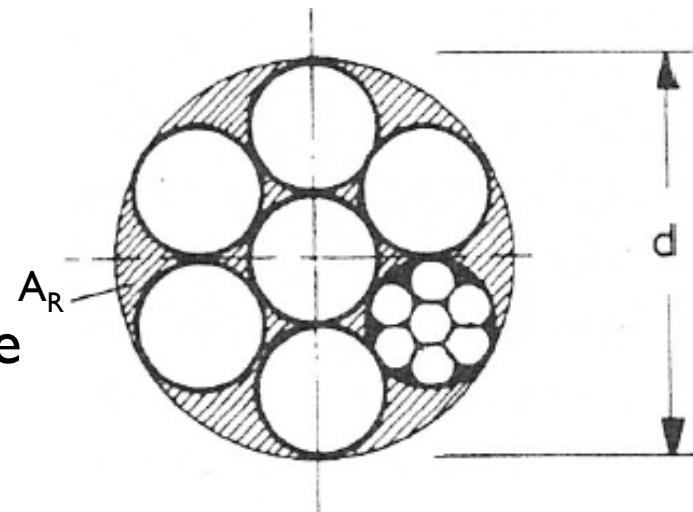
$$a_R = \frac{A_R}{\pi \cdot d \cdot v}$$

pri čemu je:

A_R – ploština plohe između opisane kružnice i žica (procrtano);

d – promjer kružnice;

v – hod zavojnice.



5 Zahtjevi na gradiva

5.5 Prianjanje

U **naknadnoga** prednapinjanja **čvrstoća prianjanja** zavisi isključivo od vlastitostî **uštrcnog morta**.

U natega što se sastojе od više **glatkih žica** moramo se osloniti na **čisto prianjanje** (bez odreza), a takva čvrstoća može biti i **10 × manja** od odrezne.

S druge strane u natega od **rebrastih šipaka** ili od **užetà** postoji odrez i na **rebrima** (ili zavojnicama) i na **orebrenjima zaštitnih cijevi**.

Međutim, ova je odrezna čvrstoća **znatno manja** (zapravo, približno dvostruko manja) nego u **ubetoniranih rebrastih šipaka**.

To se objašnjava činjenicom da se **čvrstoća prianjanja** u **rebrastih šipaka** temelji na **zazubljenju kamenih zrnaca** u **betonskomu mortu**, a u **uštrcnomu mortu** njih nema.

5 Zahtjevi na gradiva

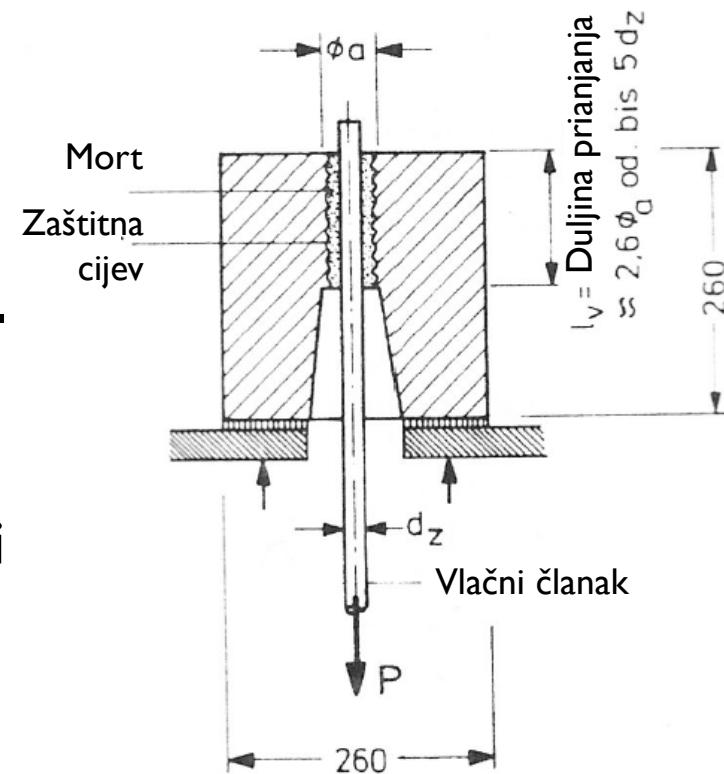
5.5 Prianjanje

Opsežni **pokusi** radi istraživanja **učinkovitosti prianjanja** različitih vrsta vlačnih članaka provedeni su na *Tehničkoj visokoj školi u Aachenu* pod vodstvom prof. *H. Trosta*.

Shema **pokusa čupanja** predočena je na slici 5.13.

Ispitivano je **devet** različitih vlačnih članaka u različitim **uvjetima prianjanja** što se očituju u **stupnju ispunjenosti** šupljine unutar zaštitne cijevi, a mi ćemo se ograničiti na prikaz njih **šest** kao najzanimljivijih.

U tablici 5.1 predočeni su podatci o ispitanim uzorcima.



Slika 5.13: Trostov uzorak za pokus čupanja

5 Zahtjevi na gradiva

5.5 Prianjanje

Br.	Vlačni članak	Čvrstoća	Zašt. cijev \varnothing_i mm \varnothing_o		Stupanj ispinj. [%]
1	\varnothing 26,5 rebrast	835/1050	39	43	49
2	\varnothing 26,5 rebrast	835/1050	60	66	20
5	\varnothing 26 gladak	835/1050	30	35	75
3	3 užeta 7 \varnothing 5	1570/1770	40	45	33
4	8 rebr. plosn. ž. 40	1420/1570	40	45	25
6	7 okr. glatkih žica	1470/1670	35	42	28

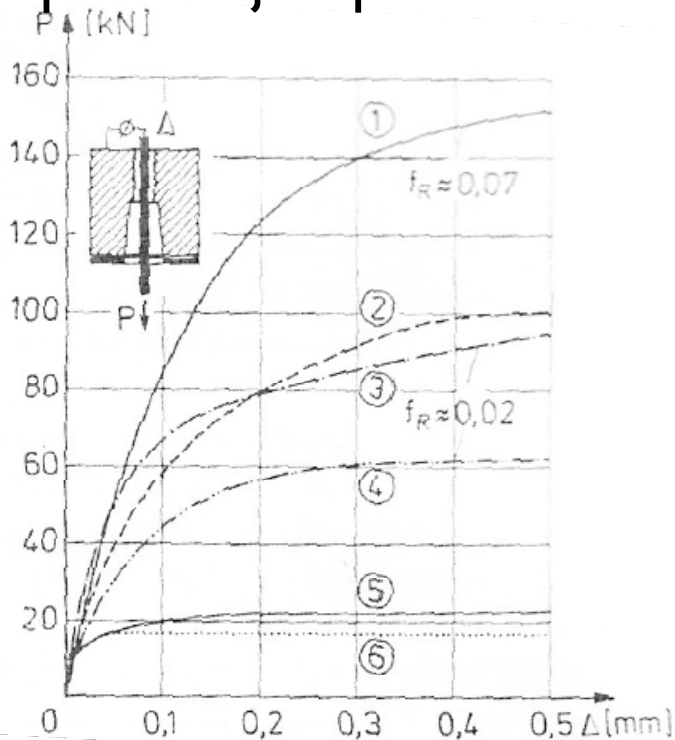
Tablica 5.1: Podatci o uzorcima iz Trostovih pokusa

U zaglavlju četvrtoga stupca \varnothing_i označuje unutarnji, a \varnothing_o vanjski promjer zaštitne cijevi.

5 Zahtjevi na gradiva

5.5 Prianjanje.

Na sljedećim dvjema slikama (slike 5.14 i 5.15) predočeno je ponašanje ispitivanih uzoraka pod opterećenjem.



Slika 5.13: Odnos sila/prokliznuće

gava **pod tlakom**, što ne prestaje djelovati ni za vrijeme **vezanja** cementa.

Pri tomu je na slici 5.13 prikazana zavisnost pomaka (prokliznuća) od sile što djeluje na vlačni članak.

Jasno se uočava da u **glatkih** šipaka djeluje samo **čisto prianjanje** (bez odreza), koje je samo malo pojačano **trenjem** što se javlja zbog laganog **bočnoga tlaka**.

Naime, **uštrcni se mort** ubriz-

5 Zahtjevi na gradiva

5.5 Prianjanje.

Valja dodati kako je u ovih uzoraka djelovao tlak koji je oko **2,5 puta veći** od onoga kakav se obično ostvaruje **na gradilištima**.

S druge strane, u **rebrastih** se šipaka javlja **odrežno prianjanje**, pri kojemu se javljaju **tlačni članci** u uštrcnomu mortu između **rebara** na šipci i **orebrenja** zaštitne cijevi.

Također se vidi kako se vlačni članak sastavljen od triju **užeta** (br. 3) ponaša slično **rebrastoj šipki**, s tim što mu ipak čvrstoća prianjanja **zaostaje** za njezinom zbog **uzdužnih rascjepnih pukotina**.

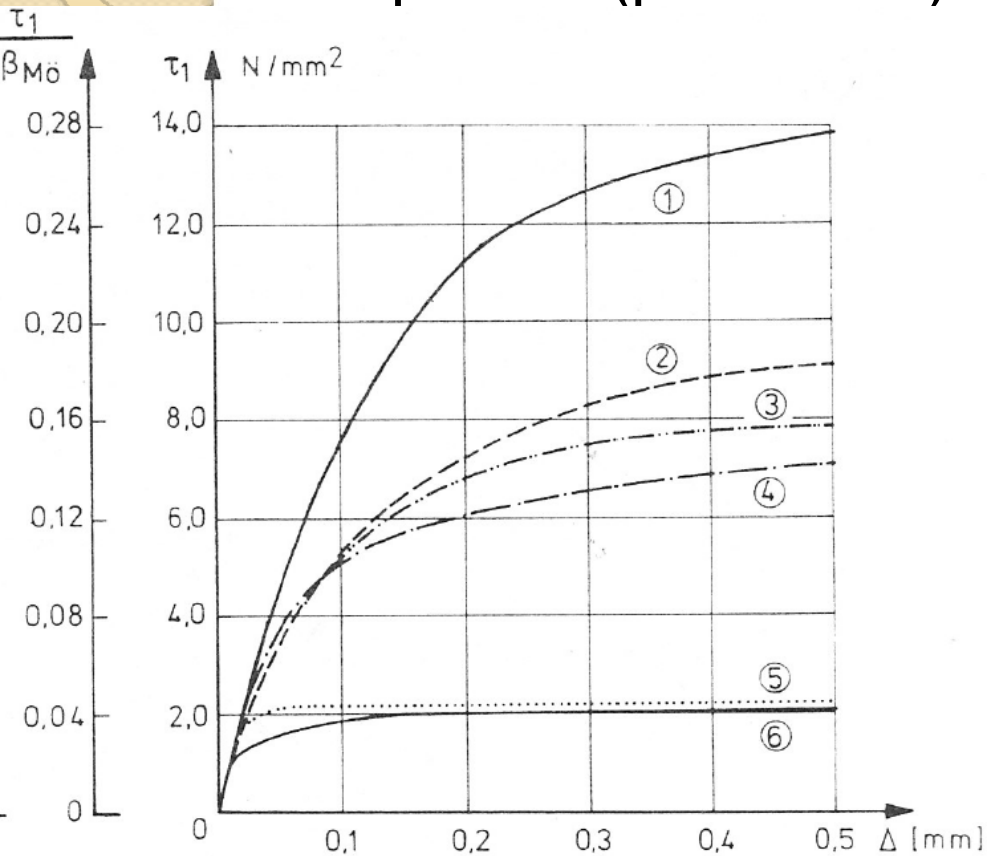
Još valja uočiti zavisnost promatranog ponašanja od **svedene ploštine rebara** (predočene na slici 5.12, a na ovoj slici označene s f_R).

To je **drugi uzrok** zaostajanja čvrstoće prianjanja užeta za onim rebraste šipke.

5 Zahtjevi na gradiva

5.5 Prianjanje.

Na slici 5.15 predočena je zavisnost **naprezanja prianjanja** od pomaka (prokliznuća) vlačnoga članka istih šest uzoraka.



Slika 5.15: Odnos prianjanje/prokliznuće

prianjanja u mortu u svim slučajevima.

Pri tomu je to naprezanje podijeljeno s **čvrstoćom uštrcnog morta** $\beta_{m\ddot{o}}$, a izračunano je na osnovi tzv. **djelotvornog opsega**, što ćemo ga definirati kasnije.

Valja spomenuti da je u ovim pokusima čvrstoća betona bila namjerno niska (C 25/30), a čvrstoća uštrcnog morta vrlo visoka (oko 50 N/mm²).

Usprkos tomu nastupio je **sлом**

5 Zahtjevi na gradiva

5.5 Prianjanje.

Zbog toga se u praksi mogu dopustiti razmjerno mala naprezanja prianjanja, τ_1 , po tablici 5.2.

Vlačni članak	τ_1 [N/mm ²]
glatke šipke; svežnjevi žica	1,0
užeta	2,0
rebraste šipke	3,0

Tablica 5.2: Preporučljiva naprezanja prianjanja njeva žica ili užta računa se s povećanom vrijednosti:

Još preostaje definirati **djelotvorni opseg** pri prianjanju.

U izravno ubetoniranih armaturnih šipaka ili prednapetih vlačnih članaka naprezanje prianjanja računa se na osnovi stvarnog opsega:

$$c_{ip} = \pi \cdot 1,6 \sqrt{A_p}$$

Međutim, u natega od svež-

$$\tau_1 = \frac{\Delta T_p^{II}}{c_{ip} \cdot \Delta l}$$

5 Zahtjevi na gradiva

5.6 Otpornost čelika za prednapinjanje na koroziju

Odmah treba reći: **čelik za prednapinjanje višestruko je osjetljiviji na koroziju od betonskog čelika.**

Osim toga, u njega se osim **obične korozije** (hrđanja) javlja i tzv. **naprezna korozija** (*stress corrosion; Spannungskorrosion*).

Naprezna je korozija **nesrazmjerno opasnija**, jer **vlačni članak** (struna, žica, šipka) zahvaćen njome **puca bez najave**, kao da je od **stakla**.

Sjetimo se: u šipke od **običnoga** (betonskog) čelika pri naprezanjima što se približuju **prekidnoj čvrstoći** pojavljuje se znakovito **suženje** (vrat) kao upozorenje, dok **u čelika za prednapinjanje toga nema**.

Razmotrimo odvojeno obje vrste korozije.

5 Zahtjevi na gradiva

5.6 Otpornost čelika na koroziju

Obična je korozija **elektrokemijski proces** što nastupa kada **električni potencijal** dolazi do izražaja pri nazočnosti **vlage** i **kemijskih agensā**, poput **kiselina**.

Pri tomu se na **površini** čeličnog tijela javljaju **sićušni ožiljci** što djeluju poput **zareza**, zbog čega u napetom čeličnom tijelu nastaju opasni **šiljci naprezanja**.

Bitno je naglasiti kako se ovdje javlja **učinak izmjerā** (*dimension effect*): dok su u **običnog** čelika ovi sićušni ožiljci (pa i šiljci naprezanja) **zanemarivi** u odnosu na presjek šipke, u čelika za **prednapinjanje**, čiji su presjeci znatno manji, ovo može imati **znatan učinak**.

Poznat je primjer mosta u kojeg su **užeta pukla** (pretrpjela slom) samo **6÷7 mjeseci nakon napinjanja!**

5 Zahtjevi na gradiva

5.6 Otpornost čelika na koroziju

Ipak, valja reći kako su ta užeta već **prije ugradbe** bila zahvaćena hrđanjem (bila su nezaštićena 3÷4 mjeseca), a zatim su **ugrađena u čelične cijevi bet zaštite od hrđanja** i tako **napeta**.

Ona mnogo opasnija, **naprezna** korozija, ima dva vida:

- međukristalna napetost i
- prskanje vodika (katodna naprezna korozija).

Javlja se pri **istodobnoj** nazočnosti **vlage, vlačnog naprezanja** i stanovitih **kemikalija** (klorida, nitrata, sulfida, sulfata i pojedinih kiselina).

Valja naglasiti da se **izvana ne mogu vidjeti nikakvi znakovi nastupa ove vrsti korozije**, a ona izaziva **fine napukline**, što nakon stanovita vremena izazivaju **krhki slom**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.6 Otpornost čelika na koroziju

Za utjehu valja reći kako je do ove vrsti korozije došlo u samo **malomu broju slučajeva**, ali je s druge strane dolazilo do **sloma cijelih natega!**

Ako se **strogo pridržavamo** proizvođačevih uputa o **uskladištenju i čuvanju**, te **zaštiti nakon ugradbe čelika za prednapinjanje**, ne bismo se trebali bojati nastupa **naprezne korozije**.

* * * * *

Zbog **iznimne osjetljivosti** ovoga čelika na **koroziju**, on se mora **zaštiti u radionici** (u pogonu za izradbu natega), pri **prijevozu** i na **gradilištu**.

U prvom redu mora se **uskladištiti u natkrivenu prostoru**, pri čemu **zrak** mora biti **topao i suh**, ali i mora **stalno strujati** kako ne bi došlo do **orošavanja**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.6 Otpornost čelika na koroziju

Svakako se mora **izbjeći izvlačenje žica ili užetā po goloj zemlji** (humusna kiselina!) i **doticaj sa spomenutim kemikalijama**.

Zaštitne cijevi moraju biti **besprijekorno zabrtvljene** kako kroz njih ne bi prodrlo ništa **škodljivo**.

Vremenski razmak između **ugradbe natega i ubrizgavanja uštrcnog morta** mora **biti strogo ograničen**, što se obično **propisuje** ili je dio **preporukā za dobru izvedbu**.

U gotovu sklopu ne postoji **pogibelj od korozije** ako se **uštrcni mort ugradi u skladu s dotičnim smjernicama**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.7 Umorna otpornost čelika za prednapinjanje

Općenito se **otpornost čelika** pod učestalo nastupajućim **dinamičkim opterećenjima** očituje u tzv. **trajnoj izmjeničnoj čvrstoći**.

Radi se o **graničnoj** vrijednosti **dodatnog naprezanja $\pm\sigma_A$** u odnosu na zadano **srednje naprezanje** što ga uzorak može izdržati **neizmjereno mnogo puta bez sloma ili nedopustivih izobličenja**.

To vrijedi i za **čelik za prednapinjanje**.

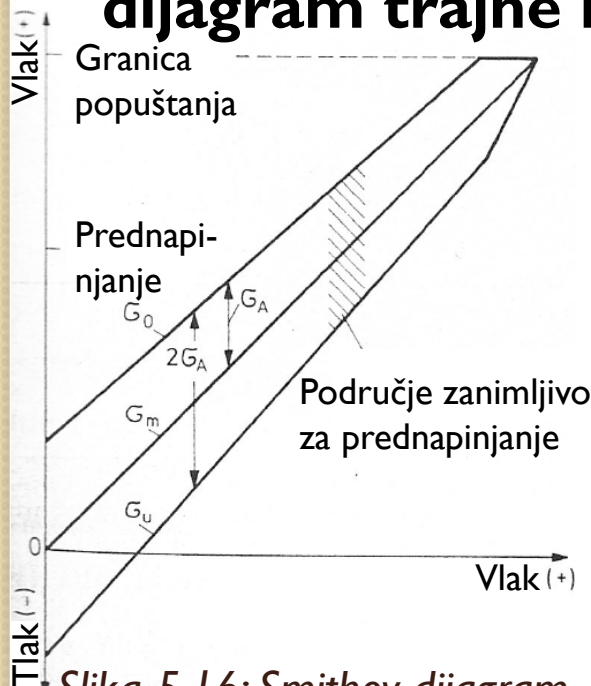
Za nj, kao i za sklopovni (konstrukcijski) čelik, uzima se da je **dostatno velik broj opetovanja opterećenja za trajnu izmjeničnu čvrstoću 2×10^6** .

Dvostruka vrijednost ovoga dodatnog naprezanja naziva se **rasponom titranja trajne izmjenične čvrstoće**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.7 Umorna otpornost čelika za prednapinjanje

Nanesu li se rasponi titranja **trajne izmjenične čvrstoće** dobiveni na ovakav način za stanovitu vrst čelika na os što predstavlja **srednje naprezanje**, dobit će se **Smithov dijagram trajne izmjenične čvrstoće** (slika 5.16).



Slika 5.16: Smithov dijagram trajne izmjenične čvrstoće

Pri tomu je predočeno i područje **izmjeničnih naprezanja** (vlak i tlak naizmjenice) i područje tzv. **bujanja vlaka**.

Dok se u **AB** sklopova može dogoditi da i područje **izmjeničnih** naprezanja može biti zanimljivo, za PB sklopove zanimljivo je samo područje **bujanja vlaka** i to opet samo onaj dio što pada **iznad** naprezanja izazvana silom prednapinjanja.

S porastom **donje** granice naprezanja lagano **opada** podnošljivi raspon titranja **trajne izmjenične čvrstoće**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.7 Umorna otpornost čelika za prednapinjanje

Najveća **gornja** granica naprezanja omeđena je **granicom popuštanja**.

U čelika za prednapinjanje uvriježene su **dvije granične razine** raspona titranja trajne izmjenične čvrstoće:

- **nazivno naprezanje pri prednapinjanju** i
- **90 % granice popuštanja kao gornja granica naprezanja**.

Između ovih dviju granica *Smithov* je dijagram zapravo **pravocrtan**.

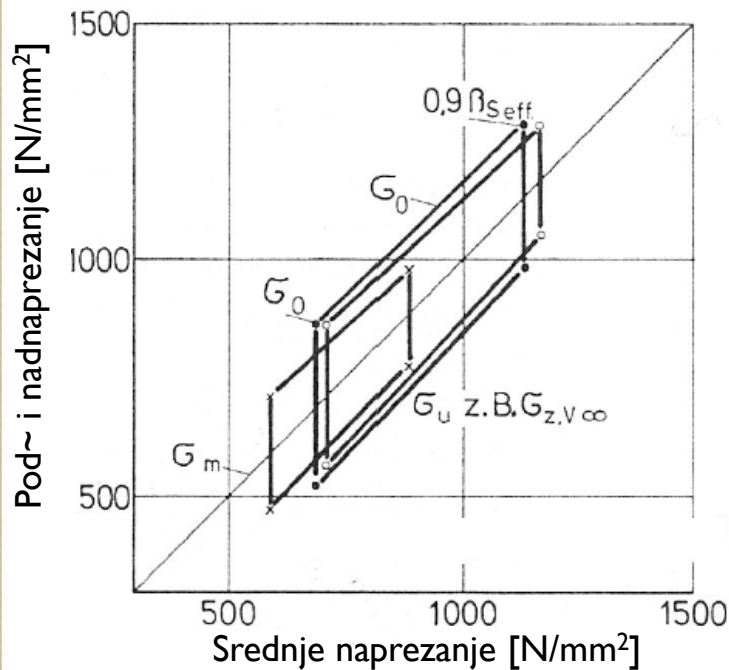
Njemački su istraživači utvrdili kako **trajna izmjenična čvrstoća** zapravo **isključivo** zavisi od **kakvoće površine** čelične šipke (žice), a **ne od čvrstoće čelika**.

To se dobro vidi na slici 5.17.

5 Zahtjevi na gradiva

5.7 Umorna otpornost čelika za prednapinjanje

- Poboljšana žica – St. I420/I570, glatka
- Poboljšana žica – St. I420/I570, rebrasta
- Šipka – St. I080/I230, rebrasta



Slika 5.17: Utjecaj kakvoće površine
zajamčene vrijednosti trajne izmjenične čvrstoće.

One su predočene u tablici 5.3.

Na njoj su predočeni Smithovi dijagrami važnijih vrsti čelika za prednapinjanje.

Prigodom ispitivanja čelika za pojedini **sustav prednapinjanja** u sklopu davanja **dopusnice za uporabu** (njem. *Zulassungsbescheid*) obično se daju **ogledne** (orijentacijske) vrijednosti **trajne izmjenične čvrstoće**.

Međutim, za **uvriježene** čelike za prednapinjanje mogu se dati i tzv.

5 Zahtjevi na gradiva

5.7 Umorna otpornost čelika za prednapinjanje

Vrst čelika za prednapinjanje	Raspon trajne izmjenične čvrstoće $2\sigma_A$
Žica glatka Šipka glatka	240 N/mm ²
Žica rebrasta Žica profilirana Uže	200 N/mm ²
Rebrasta žica Rebrasta šipka	190 N/mm ²

Tablica 5.3: Raspon trajne izmjenične čvrstoće uvriježenih vrsti čelika za prednapinjanje; gornja granica naprezanja: $0,9 f_y$ dotično $0,8 f_{tk}$

5 Zahtjevi na gradiva

5.8 Ostale vlastitosti čelika za prednapinjanje

Od **ostalih vlastitosti** čelika za prednapinjanje o kojima valja voditi računa treba spomenuti:

- puzanje,
- ponašanje pri visokim i niskim temperaturama,
- utjecaj poprečnoga pritiska na čvrstoću i
- ponašanje vlačnih članaka pri vlastitom savijanju.

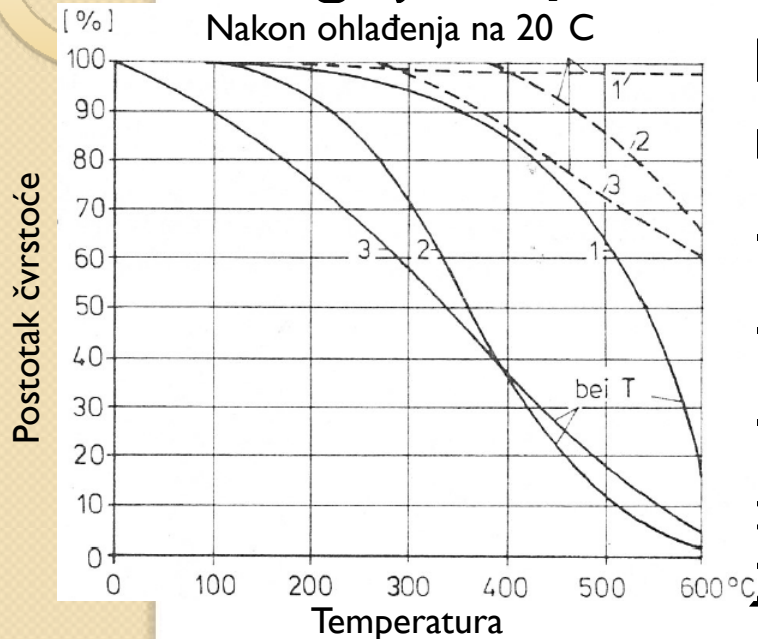
Prisjetimo se: puzanje je vlastitost gradiva da mu pri **stalnom** naprezanju **rastu** skraćanja/produljenja.

Međutim, iako je istina da i **čelik puže** (a ne samo beton), to nema **praktičnoga** značenja, jer su **pri uvriježenim razinama naprezanja priraštaji produljenja zanemarivi**, a osim toga sve je još i **ublaženo djelovanjem skupljanja i puzanja betona**.

5 Zahtjevi na gradiva

5.8 Ostale vlastitosti čelika za prednapinjanje

Prirodno tvrdi i hladno oblikovani čelici ponašaju se **pri zagrijavanju i nakon njega znatno drukčije.**



Na slici 5.18 prikazano je **smanjenje granice popuštanja** triju vrsti čelika:

- prirodno tvrdog (šipke),
- poboljšanog (žice) i
- vučenog, te opuštenoga (žice)

pri zagrijavanju te nakon ohlađenja na 20 °C.

Slika 5.18: Utjecaj temperature na smanjenje granice popuštanja

Vidi se da do oko 250 °C zagrijavanje ne utječe trajno na čvrstoću, ali zato znatno porastu gubitci od opuštanja čelika.

Međutim, pri zagrijavanju osjetno pada granica popuštanja, navlastito u čelika 3. vrsti.

5 Zahtjevi na gradiva

5.8 Ostale vlastitosti čelika za prednapinjanje

Poprečni pritisak može **smanjiti čvrstoću** čelika za prednapinjanje i za više od 10 %.

Međutim, valja znati da je **poprečni pritisak** na čelik za prednapinjanje **neizbježiv** (npr. **mjesta sidrenja**), pa treba o tomu voditi računa i proučiti dotično strukovno štivo.

Naprezanje pri savijanju u čeličnoj šipci dobije se iz izraza:

$$\sigma = (d \cdot E)/2r$$

Pri $r = 5 \text{ m}$ nastalo bi u žici $\varnothing 5 \text{ mm}$ naprezanje od 105 N/mm^2 , a u šipci $\varnothing 25 \text{ mm}$ čak 525 N/mm^2 .

Međutim, ovo se naprezanje **zbraja** s onim od **čistoga vlaka**, pa se pri dosegnuću **granice popuštanja** ono gotovo **izjednačuje po presjeku**.

Zbog toga se u čeliku za prednapinjanje mogu **zanemariti naprezanja od savijanja**.