

za stabilizaciju uvoja. Odvijanjem iza vretena uvoji se pretvaraju u kovrće. Susjedna vretena vrte se u suprotnim smjerovima tako da se na jednoj od dviju susjednih niti što se teksturiraju stvaraju desni, a na drugoj lijevi uvoji na istim stranama vretena. Nakon kovrčanja te se niti udružuju i namataju na križni namotak.

Teksturirane prede dobivenе prividnim uvijanjem voluminozne su i elastične. Ako njihova velika elastičnost nije poželjna, može se smanjiti dopunskim termofiksiranjem. Pri tome predra zadržava svoju voluminoznost. Tada se strojevi za teksturiranje prividnim uvijanjem sprežu s još jednom komorom za termofiksiranje. Tako dobivena preda, tzv. set, upotrebljava se za proizvodnju pletene robe.

Tlačni postupak teksturiranja (teksturiranje zbijanjem) u osnovi je kovrčanje termoplastičnih filamenata zbijanjem i djelovanjem topline u tlačnoj komori. Predra dobivena tim postupkom grublja je i vrlo voluminozna, ali joj je rastezljivost malena. Najviše se upotrebljava za izradbu podnih obloga.

Teksturiranje vučenjem preko brida u osnovi je snažno deformiranje zategnute ugrijane niti filamenta prelaskom preko oštrog brida. Tada se u deformiranom području pojavljuju naprezanja koja kovrčaju niti. Tim postupkom proizvedena preda također je vrlo elastična i rastezljiva, a njeni se velika rastezljivost može smanjiti daljom obradom. Najviše se upotrebljava za proizvodnju čarapa.

Teksturiranje puhanjem zasniva se na djelovanju vrtloga hladnog ili vrućeg medija (obično stlačenog zraka ili pare) na nit filamenta u nekoj komori. Pritom nastaju petlje koje povećavaju voluminoznost filamenta.

Teksturiranje puhanjem hladnoga stlačenog zraka prikladno je za preradbu vlakana koja nisu plastomerna (termoplastična), npr. vlakana od celuloznog acetata, te viskoznih i staklenih vlakana. U teksturiranju plastomernih, osobito poliamidnih filamenata, puhanjem vrućeg zraka nastaje i termofiksiranje koje pojačava djelovanje procesa.

Kombinacija teksturiranja, prednja i istezanja. Iako strojevi za teksturiranje rade velikim brzinama, ekonomičnost teksturiranja nastojala se povećati kombinacijama prednja i istezanja. Osobito su važne kombinacije istezanja i teksturiranja, koje se obavljaju u dvofaznom (sekventnom) ili u jednofaznom (simultanom) postupku.

Za razliku od sekventnog postupka, u kojem se isteže i tekstiraju u dvije odvojene zone, u simultanom su postupku te dvije operacije potpuno integrirane. I sekventni i simultani postupak istezanja i teksturiranja upotrebljivi su za preradbu prethodno neistegnutih i predorientiranih niti. Ipak se, zbog ekonomskih i drugih razloga, sekventnim postupkom preraduju samo neistegnute, pretežno poliamidne, a simultanim predorientirane, pretežno poliesterske filamentne prede.

LIT.: A. Blümcke, Textilindustrie, I. Band, Spinnerei und Zirnerei. Walter de Gruyter, Berlin 1954. – R. Fahrbach, Getriebe-Berechnungen in der Baumwoll-Spinnerei an in- und ausländischen Maschinen. Poetschel Verlag, Stuttgart 1956. – R. Fahrbach, Die Kammgarnspinnerei. Konradin-Verlag, Stuttgart 1958. – W. Oeser, Streichgarnspinnerei. Konradin-Verlag, Stuttgart 1961. – O. Johannsen, F. Walz, Handbuch der Baumwollspinnerci. Verlag Handwerk und Technik, Berlin-Hamburg 1962 (I. dio), 1963 (II. dio), 1964 (III. dio). – W. Wegener, Die Streckwerke der Spinnmaschinen. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1965. – Spinnereitechnische Grundlagen. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1969. – H. Perner, Technologie und Maschinen der Garnherstellung. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1969. – W. Oeser, Mechanische Spinnerei. Schiele & Schön, Berlin 1971. – V. Rahlenova, Bezvreteno predeni. SNTL, Praha 1974. – A. Gregorić, Prednje bombaža in kemičnih vlakan bombažnega tipa. Univerza v Ljubljani, Ljubljana 1979. – M. Nikolić, A. Gregorić, Teorija predelave vlakan. Univerza v Ljubljani, Ljubljana 1979. – R. J. Kohel, C. F. Lewis, Cotton. American Society of Agronomy, Madison-Wisconsin 1984.

A. Prus

PREDNAPETI (PREDNAPREGNUTI) BETON, armirani beton u kojemu je umjetno stvoreno, prije nanošenja opterećenja ili istodobno s njim, trajno naprezanje

što zajedno s naprezanjem od vanjskog opterećenja daje naprezanje koje u svakoj točki i za sva predvidiva vanjska opterećenja ne premašuje naprezanje koje gradivo može trajno podnosići.

Beton se upotrebljava već više od dvije tisuće godina, a tek se u prošlom stoljeću pojavio armiran beton (v. *Armirani beton*, TE1, str. 403). Nedostaci armiranog betona, od kojih su najvažniji: pojave pukotina, velik udio vlastite mase u ukupnom opterećenju i nemogućnost premoštenja većih raspona, naveli su konstruktore, potkraj prošlog stoljeća, da eliminiraju te nedostatke ugradnjom prednapetih armature. Ta je zamisao vrlo stara. Duge drvene bačve i dijelove drvenog kotača, npr., drže prednepeti željezni obruči. Prvi prijedlozi za primjenu prednepetog betona pojavljuju se u SAD (P. H. Jackson, 1886) i u Njemačkoj (W. Döhring, 1888) kojima se namjeravalo sprječiti raspucavanje betona. Austrijanac J. Mandl (1896) iznio je ideju da se prednapinjanjem armature može djelovati suprotno vlačnim naprezanjima koja nastaju djelovanjem vanjskih opterećenja. M. Koenen počeo je u Berlinu (1906) pokuse s gredama u koje je bila ubetonirana prednepeta armatura. Armatura je, međutim, bila prevelika (60 N/mm^2), pa je prednaprezanje u njoj postupno sasvim isčezeno zbog skupljanja i puzanja betona o čemu se u ono doba nije ništa znalo. Do sredine dvadesetih godina bilo je nekoliko sličnih neuspjelih pokušaja.

Francuski inženjer E. Freyssinet proučavao je od 1911. godine pojavu puzanja betona mjerjenjem na velikim betonskim lukovima, pa je utvrdio bit puzanja i bitne pretpostavke za uspješnu primjenu prednapinjanja. Takvim istraživanjima ne samo da je točno utvrdio djelovanje unutrašnjih sila, kojima se može prilagoditi oblik, dimenzije i armature prednepete konstrukcije, nego je i razvio postupak pomoću kojeg se može utjecati na djelovanje tih sila i na izobiljevanje konstrukcije. Freyssinet je 1928. god. ostvario prvu prednepetu konstrukciju s naprezanjem u celiku od 400 N/mm^2 . To je bio preokret u tehniči građenja betonom. Od 1930. godine Freyssinet primjenjuje prednapinjanje sve smješte u nizu konstrukcija i građevina, pa je 1941. godine projektirao izvanredno vitak dvozglobni okvirni most preko Marne kod Luzancyja s rasponom od 55 m (v. *Mostovi, masivni*, TE 8, str. 706, sl. 193). Most je, međutim, izgrađen tek nakon rata, kad je izgrađeno još pet sličnih mostova preko Marne. U gradnji tih mostova primijenjeno je nekoliko postupaka koji će tek poslije ući u graditeljsku praksu (prednapinjanje hrpta, kompenzacija pomaka od skupljanja i puzanja betona, montiranje po segmentima).

Tridesetih godina F. Dischinger predlaže postavljanje poligonalnih kabela izvan presjeka nosača, no unutar visine konstrukcije, što bi omogućilo naknadno dodavanje sila, a U. Finsterwalder razmatra utjecaj povlačenja kabela pod gredu sa središnjim zglobovom oko kojeg se zakreću dijelovi grede uz istodobno razmicanje krajeva djelovanjem gredne mase. E. Hoyer (1938) razvio je postupak prednapinjanja celičnim strunama veoma velike čvrstoće ($1,6\cdots2,8 \text{ kN/mm}^2$) koje betonu predaju silu prianjanjem. Z. Franjetić otkupio je licencu (1941) od Hoyera i izgradio pogon u Remetincu kraj Zagreba, koji je poslije rata pripadao poduzeću Jugobeton što je do 1976. godine proizvodilo prednepete gredice.

Razvoj prednepetih konstrukcija ostvaren je, međutim, tek u poratnim godinama. Godine 1953. osnovano je međunarodno udruženje za prednepeti beton (*Fédération Internationale de la Précontrainte, FIP*). Osobito je zaslužan za razvoj upotrebe prednepetog betona Belgijanac G. Magnel, koji je razvio vlastiti postupak prednapinjanja, i projektirao prvi most s kontinuiranim nosačem od prednepetog betona (preko Maasa kod Sclayna, raspon $2 \times 62 \text{ m}$), te je napisao i prvu knjigu o prednepetom betonu.

Na razvoj tehnike prednapinjanja u nas utjecala je djelatnost poduzeća Jugobeton, koje je projektiralo tvorničke hale i mostove i koje je ostvarilo izvorne i uspjele konstrukcije (npr. krovne rešetke raspona do 36 m). B. Žeželj (1952) razvija vlastiti postupak prednapinjanja nazvan sustavom IMS (Institut za materijale SR Srbije). Primjena tog postupka znači provat primjene prednepetog betona u Jugoslaviji, pa je izgrađen niz mostova (Šibenik, Beška, Krk-kopno, v. *Mostovi, masivni*, TE 8, str. 669). Prednepeti beton, osim toga, primjenjuje se u stanogradnji i gradnji industrijskih hala, pa se prednapetim betonskim konstrukcijama sve više zamjenjuju čelične konstrukcije.

Napredak prednepetih betonskih konstrukcija može se najbolje pratiti porastom raspona grednih mostova. Tako se, nakon prvog već spomenutog mosta da prednepetog betona raspona 55 m, uznapredovalo toliko da je u 1983. godini izgrađen most raspona 260 m (Brisbane, Australija).

Gradnja visokih televizijskih tornjeva omogućila je upotrebu prednepetog betona, jer se samo takvimi konstrukcijama mogu svladati veoma veliki momenti savijanja koji nastaju djelovanjem vjetra i koji bi se mogli pojaviti pri zemljotresu. Tako su od prednepetog betona izgrađeni vrlo visoki televizijski tornjevi u Torontu (visina 553 m) i Moskvi (525 m). Takav je i televizijski toranj na Sljemenu kod Zagreba (170 m).

Dalji razvoj prednepetih konstrukcija ide u smjeru usavršavanja i racionalizacije, a osobito u smjeru poboljšanja zaštite armature od korozije. Tzv. djelomično prednapinjanje sve se više primjenjuje zbog nekih prednosti: manji progib prema gore, manji utrošak betona i skupog čelička za prednapinjanje.

Svrha prednapinjanja. Kako je spomenuto, prednapinjanje je već od davnine primjenjivano. Najbolje to pokazuju primjeri nabijanja željeznih obruča na drvene bačve i na drvene kotače zaprežnih kola. Djelovanjem hidrostatičkog tlaka tekućine u bačvi nastaju sile koje djeluju na obod bačve i koje nastoje razmaknuti duge. Nabijanjem obruča stješnjuju se reške među duggama, pa se one ponašaju kao klinovi. Sili koja djeluje na plohu dugačke suprotstavlju se sile na njezinim bokovima. Te sile na bokovima djeluju uzduž oboda bačve, dakle kao i sile od hidrostatičkog tlaka, ali u suprotnom

smjeru. Prema tome, nabijeni obruč ima suprotan učinak od djelovanja hidrostatičkog tlaka.

Željezni obruč na drvenom kotaču sprečava njegovo trošenje. Ako bi željezni obruč bio izrađen točno po mjeri kotača, klizio bi po obodu kotača, jer bi trenje između obruča i kotača bilo nedostatno da fiksira položaj obruča. Zbog toga se obruč izrađuje tako da ima nešto manji unutrašnji promjer od vanjskog promjera kotača, pa se zagrijani obruč natiče na kotač. Ovlašteni obruč steže drveni kotač, pa tako stvorene radialne sile osiguravaju dovoljno trenje između obruča i kotača, što sprečava klizanje obruča po drvenom kotaču.

Prednapinjanjem tankih čeličnih žbica na kotačima bicikla sprečava se njihovo izvijanje pod opterećenjem. Tako pretodno napete žbice poništavaju tlačnu silu koja se pojavljuje djelovanjem tereta pa zbog toga ne postoji opasnost od izvijanja.

Svrha je prednapinjanja, dakle, da se proizvede djelovanje koje se trajno suprotstavlja nepovoljnim pojavama tokom životnog vijeka konstrukcije ili naprave.

U armiranobetonkoj konstrukciji svrha je prednapinjanja da se ostvari takav armiranobetonski element u kojem beton može sam preuzeti sva ili većinu naprezanja koja nastaju djelovanjem vanjskih opterećenja, odnosno da se ostvari takav element da u preuzimanju naprezanja sudjeluje cijeli ili najveći dio betonskog presjeka. Treba, dakle, postići da se zbog djelovanja vlastite mase nosača i vanjskog opterećenja ne pojave vlačna naprezanja, ili da se pojave samo ograničeno. Tako se istodobno sprečava ili barem djelomično sprečava raspucavanje betona u vlačnom pojasu nosača. Neraspucani je nosač kruči i mnogo se manje izobiljeće pod opterećenjem.

To se postiže unošenjem tlačne sile u nosač, što se naziva napinjanjem. Budući da se to zbiva prije nego što je nosač u upotrebi, ubičajan je naziv prednapinjanje ili prednapreza-
nje. Napinjanjem se nosač dovodi u takvo stanje da su njegova naprezanja neovisna o vanjskom opterećenju. Intenzivnost i raspodjela tih naprezanja po presjeku ovisi o vrijednosti i položaju sila prednapinjanja, a na njih se utječe izborom vrijednosti i položaja sile prednapinjanja.

Prednapinjanjem se mogu ostvariti ekonomičnije i djelotvornije građevne konstrukcije. Tako se prednapinjanjem vlačnog pojasa rešetke izbjegava vlačno naprezanje u betonu, niz se slobodno položenih greda pretvara prednapinjanjem u kontinuirani nosač koji ima veću nosivost, a montažni se elementi spajaju u cjelinu. Prednapinjanjem se nadomješta djelovanje velikih vlastitih masa, pa se masivne betonske brane mogu izgraditi s mnogo manjim presjekom, ali se moraju prednapetim kabelima usidriti u tlo. Osim toga, prednapinjanjem se smanjuje utrošak betona i čelika, što omogućuje vitkije konstrukcije.

Ostvarivanje prednapinjanja. Prednapinjanje ovisi o vrsti konstrukcije, pa se može svrstati u dvije skupine: prednapinjanje greda i ploča, te prednapinjanje rotacijski simetričnih sklopova kao što su cijevi, spremnici za tekuća goriva i silosi.

Prednapinjanje greda i ploča ostvaruje se *a)* napinjanjem čeličnih struna ili spletova struna prije očvrsnuci betona i *b)* napinjanjem čeličnih kabela nakon očvrsnuci betona.

Celične strune, odnosno spletovi struna napinju se na dugim stazama, duljine do 100 m, i sidre se u nepomične armiranobetonske blokove ili se napinju u kraćim krutim oplatama, duljine do tridesetak metara, i sidre se u čela oplate. Na dugim stazama izrađuju se istodobno tri ili više greda, odnosno ploča, a na kraćim samo jedna. Nakon što je beton očvrsnuo, sidra se otpuštaju, pa se napete strune nastoje skratiti na duljinu koju su imale prije napinjanja. Ostvareno prianjanje između struna i očvrslog betona sprečava skraćivanje struna, pa se tako u betonu pojavljuje tlačna sila.

Na grede i ploče djeluju promjenljivi momenti savijanja. Zbog toga bi u ekonomično projektiranoj gredi ili ploči morao biti promjenljivi moment savijanja koji se pojavljuje djelovanjem prednapinjanja. To se može postići ili sprečavanjem dodira pojedinih struna i okolnog betona na dijelu grede, odnosno ploče, ili izvedbom izlomljene osi struna, što se može

ostvariti poprečnim sidrenjem struna ili djelomičnim otklanjanjem struna.

Napinjanje nakon očvrsnuci betona ostvaruje se pomoću kabela kojima se sidra odupiru o očvrsli beton i tako mu predaju tlačnu silu. Da bi se omogućilo produljenje kabela pri napinjanju, kabeli se ugrađuju ili naknadno uvlače u zaštitne cijevi od rebrasta lima. U slobodni prostor, nakon napinjanja, uštrcava se cementna kaša (smjesa za injektiranje), da bi se čelik zaštitio od korozije i da bi se osigurala veza između čelika i betona koja je bitna za osiguranje granične nosivosti građevnog elementa. Prednost je napinjanja kabelima u tome što se kabel može položiti tako da prati krivulju mjerodavnih momenata savijanja, a nekada se može i naknadno povećati sila prednapinjanja. Kabelima se, osim toga, mogu prednapinjati i prostorne nosive konstrukcije (roštilji i ljsuske).

Tlačne cijevi od prednapetog betona proizvode se i do promjera od 5 m. Mogu se prednapinjati hidraulički, termički, kemijski i mehanički.

U hidrauličkom postupku voda pod tlakom napinje čelične strune, koje su raspoređene i prstenasto i uzduž izvodnica, uz istodobno vibriranje betona. Kad očvrsne beton, voda se ispušta iz cijevi, a strune tlače beton nastojeći poprimiti duljinu koju su imale prije napinjanja.

Termičko se prednapinjanje ostvaruje namatanjem užarenih struna po oplošju cijevi. Strune se nakon ohlađenja napinju i tlače beton. Termičko se prednapinjanje rijetko primjenjuje.

Kemijsko napinjanje ili tzv. samonapinjanje nastaje zbog bujanja betona (v. *Beton*, TE 2, str. 1) pri hidrataciji cementa, koje se pojavljuje uz dodatak ~15% sadre. Beton se od takve mješavine prskanjem (torkretiranjem) nanosi na unutrašnju oplatu oko koje je smještena armaturna mreža. Nakon toga cijev se umatre u vrelu vodu kako bi se odvojila od oplate. Tako se postiže prosječno tlačno naprezanje u betonu od ~4 N/mm², a koje uz posebne postupke može dosegnuti i 15 N/mm². Taj je postupak veoma rasprostranjen u SSSR.

Mehaničko napinjanje ostvaruje se namatanjem napete strune pomoću posebnog uređaja na slabo armiranu betonsku cijev. Nakon namatanja nanosi se sloj prskanog betona za zaštitu struna od korozije.

Spremnici za tekuća goriva i silosi prednapinju se jednim od sljedećih postupaka: *a)* kontinuiranim napinjanjem struna po oplošju, *b)* napinjanjem kabela (ili žica s vijcima) po odsjećima, *c)* povećanjem opsegu stijenke spremnika i *d)* prisilnim skretanjem ravno položene žice.

Kontinuirano napinjanje struna po oplošju danas se najčešće primjenjuje. Postoji i nekoliko patentiranih postupaka. Prema američkom postupku *Preload*, kolica koja napinju žicu opisuju zavojitu putanju po oplošju spremnika. Takvim postupkom izrađeni su spremnici promjera 100 m i obujma 6000 m³. Prema švicarskom postupku *BBRV* kolica se kreću po vrhu stijenke, a žicu napinje kruti štap koji seže do mjesta gdje se napinje žica. U Mađarskoj je razvijen postupak *Mo-Ta-La* (autori L. Mokk, G. Tassi i J. Lányi). Žica se namata pomoću niza njihala raspoređenih uzduž žica po opsegu spremnika. Njihala su raspoređena tako da pravci koji spajaju dva susjedna njihala i središta spremnika zatvaraju kut od 5...10°. Tako se postiže da gubici zbog trenja iznose samo 1...1,5%. Postupkom *Mo-Ta-La* izgrađeni su mnogi spremnici u Mađarskoj, SSSR i Njemačkoj DR.

Napinjanje po odsjećima ostvaruje se ili pomoću kabelâ kojih se sidra ugrađuju u četiri, šest ili osam izbočenih rebara koja su jednoliko raspoređena po obodu spremnika, ili pomoću šipaka koje se napinju vijcima i koje su jednoliko raspoređene po opsegu spremnika. Kabeli se uvlače u cijevi ugrađene u stijenku, a šipke se postavljaju izvana na stijenku i naknadno zaštićuju prskanim betonom. Broj rebara ovisi o promjeru spremnika. Sidra se ugrađuju u svako drugo rebro, a sidra se susjednog kabela pomicu po opsegu za razmak rebara kako bi se dobila što jednoličnija raspodjela sila po opsegu spremnika. Isto vrijedi za šipke.

Promjena opsega stijenki spremnika postiže se punjenjem spremnika tekućinom i pomoću tanjurastih preša. U postupku punjenja spremnika tekućinom (Reimberov postupak) stijenka spremnika ima na unutrašnjoj strani niz uspravnih svodova koji predaju razupornu silu obodnoj stijenci i tako napinju čelične žice u stijenci. Tanjuraste preše postavljaju se u razreze u stijenci u smjeru izvodnica, koje su raspoređene u jednakim razmacima po obodu spremnika. Nakon što je postignuta željena sila u razreze se ugrađuje beton, a kad on očvrste, preše se otpuštaju i vade.

Žica položena po pravcu usporednom s okomitom osi spremnika, prisilno se u pojedinim točkama otklanja od tega pravca pomoću protusmjernih vijaka, koji tako razmiču dvije susjedne žice da se dobiju spljošteni likovi omeđeni žicama.

Osim toga, razvijeni su i drugi postupci, od kojih treba spomenuti postupak bujanja betona (takvim je postupkom izgrađen krov tržnice u Minsku), ugradnja u beton izobličenih čeličnih valjanih nosača. Postupak termičkog prednapinjanja Preflex je razvijen u Njemačkoj DR.

Prednosti i nedostaci prednapetih betonskih konstrukcija. U usporedbi s armiranobetonskim konstrukcijama prednapete betonske konstrukcije imaju niz prednosti, ali i nedostatka.

Glavni su nedostaci armiranog betona: sklonost betona raspucavanju i nemogućnost iskorištenja betona u vlačnom pojasu, što je potaklo da se potraže postupci koji bi uklonili te nedostatke. To je postignuto pomoću prednapetog betona.

Prednosti su prednapetog betona višestruke, a mogu se svrstati u sljedeće: *a)* upotrebo prednapetog betona može se raspucavanje potpuno sprječiti ili svesti na mjeru pri kojoj se pukotine zatvaraju nakon prestanka preopterećenja, pa su zbog toga prednapete konstrukcije trajnije; *b)* manji je utrošak čelika za 40...50%, a kopiput i do 80%; *c)* masa je konstrukcije manja i do 35%, jer se iskorištava čitav ili skoro čitav presjek betona; *d)* greda od prednapetog betona ima i do 70% manji progib nego armiranobetonska greda iste visine; *e)* raspon prednapete konstrukcije može biti nekoliko puta veći nego armiranobetonske; *f)* glavna vlačna naprezanja u dijelu grede u blizini ležaja mnogo su manja, pa je i debljina hrpta mnogo manja; *g)* čvrstoća pri zamoru konstrukcija od prednapetog betona osjetno je veća nego konstrukcija od drugih materijala zbog male promjene naprezanja u čeliku, pa je zbog toga prednapeti beton vrlo prikladan za dinamički opterećene konstrukcije (željeznički mostovi, kranske staze); *h)* prednapinjanje je omogućilo slobodnu montažu i suho spajanje prethodno izrađenih elemenata.

Prednapeti beton ima i nedostatka. Da bi se postiglo prednapinjanje, potrebna je složena i skupa oprema, te kvalificirani radnici. Osim toga, potreban je kvalitetniji materijal i veća točnost proračuna i izvedbe. Sidra kabela razmjerne su skupa, a visoko vrijedni čelik mnogo je neotporniji na koroziju nego obični čelik. Sve to djelomično poništava već navedene prednosti prednapetog betona.

Područje primjene prednapetog betona. Prednapinjanje se primjenjuje gotovo u svim područjima graditeljstva. Prednapinju se one konstrukcije ili njihovi dijelovi koji su napregnuti na tlak ili savijanje i na koje djeluju tlačne sile koje su znatno ekscentrične. Osim toga, prednapinjanje se primjenjuje kad se želi postići nepropusnost stijenki i kad je potrebno sidrenje.

Beton za prednapete konstrukcije. Osim osnovnih značajki betona (v. Beton, TE 2, str. 1), beton za prednapete konstrukcije mora imati takva svojstva koja su bitna da se postigne željena kvalitetna takve konstrukcije.

Marka betona (čvrstoća kocke stare 28 dana) ne smije biti niža od 30, a čvrstoća betona na dan napinjanja ne smije biti manja od 70% marke. Osim udjela u nosivosti, beton mora štititi čelik od korozije, pa zbog toga mora biti dobro zbijen i homogen. Skupljanje i puzanje betona izravno utječe na učinak prednapinjanja.

Skupljanje betona svojstvo je betona da mu se smanjuje obujam i kad nije opterećen. Skupljanje traje nekoliko mjeseci, pa i godina, od trenutka vezanja cementa. Ono nastaje isparivanjem kemijski nevezane vode. Pri izradbi betona, naime, dodaje se uvijek mnogo više vode nego što

je potrebno za hidrataciju da bi se omogućilo ugradivanje betona. Skupljanje ovisi o vlažnosti i temperaturi zraka, o omjeru površine s koje je moguće isparivanje i obujma betona, te o udjelu armature u betonu. Dok je za armirani beton dopušteno računati s približnim skupljanjem betona (od 0,1...0,4 mm/m), skupljanje se prednapetog betona mora pouzdano odrediti. Prema preporukama Međunarodnog komiteta za beton (Comité Euro-international du béton, CEB) skupljanje betona određuje se prema izrazu

$$\epsilon_s(t, t_0) = \epsilon_{\infty} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad (1)$$

gdje je ϵ_{∞} konačno skupljanje koje bi se teorijski ostvarilo nakon neizmjerne dugog 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

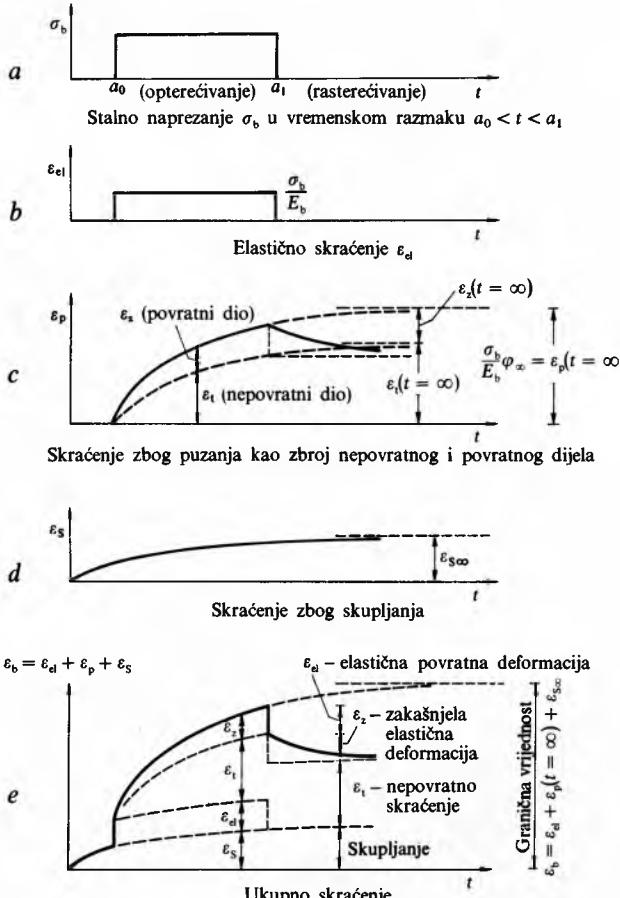
$$\epsilon_{\infty} = \beta_{ls} \beta_{2s}, \quad (2)$$

gdje je β_{ls} funkcija koja ovisi o vlažnosti okoliša, a β_{2s} o srednjem poljumuštu presjeka koji je određen izrazom

$$d_m = \alpha \frac{2A}{O} \quad (3)$$

gdje je α koeficijent koji ovisi o vlažnosti okoliša, A površina presjeka betona, a O opseg betonskog presjeka, tj. zbroj duljina površina izloženih isparivanju.

Puzanje je svojstvo betona. Puzanjem se naziva deformacija betona koja uz trajno opterećenje nije konstantna nego polagano raste. Pokusi su pokazali da se deformacija može povećavati i tokom nekoliko desetljeća, ali da raste sve sporije i sporije. Konačna deformacija može biti 3...5 puta veća od početne. Ovisi o istim čimbenicima kao skupljanje betona, a osobito o starosti betona pri nanošenju opterećenja i o trajanju tog opterećenja. Predloženo je više teorija koje bi trebale rastumačiti pojavu puzanja, ali ni jedna potpuno ne zadovoljava.



Sl. 1. Vremenski tok skraćenja betona zbog skupljanja i puzanja

PREDNAPETI (PREDNAPREGNUTI) BETON

Prilikom razmatranja deformacija treba razlikovati trenutnu (elastičnu) deformaciju od deformacije zbog puzanja. Elastična deformacija odmah iščezava nakon prestanka djelovanja opterećenja, a s vremenom iščezava i dio deformacije od puzanja (sl. 1). Djelomično smanjenje deformacije od puzanja naziva se zakašnjelom elastičnošću.

Deformacija od puzanja u trenutku t koje označuje starost betona dobiva se iz izraza

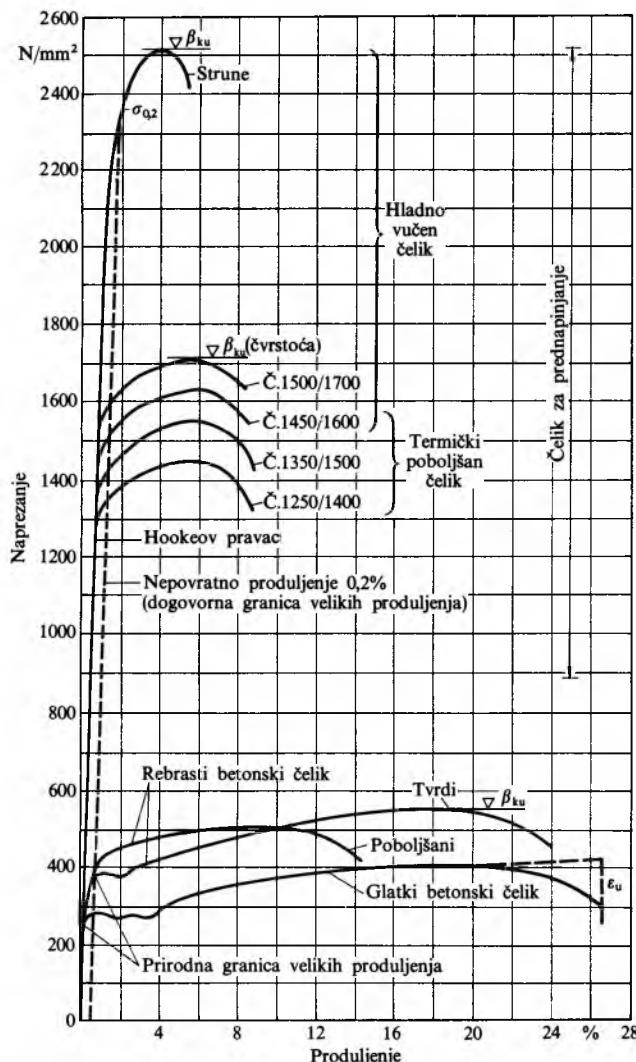
$$\varepsilon_t(t) = \varphi(t) \varepsilon_e, \quad (4)$$

gdje je $\varphi(t)$ koeficijent puzanja u trenutku t , a ε_e trenutna elastična deformacija. Koeficijent puzanja prema preporukama CEB određuje se iz izraza

$$\varphi(t) = \varphi_z \beta_z(t - t_0) + \varphi_i [\beta_i(t) - \beta_i(t_0)], \quad (5)$$

gdje je φ_z koeficijent zakašnjele elastičnosti koji iznosi $\sim 0,4$, φ_i koeficijent vremenske plastičnosti koji ovisi o istim čimbenicima kao konačna mjeru skupljanja ε_{∞} , t_0 starost betona u trenutku nanošenja opterećenja, dok su β koeficijenti kojima se uzima u obzir vremensko napredovanje deformacija. Preporukama CEB definirane su vrijednosti svih navedenih veličina.

Čelik za prednapeti beton. Skupljanjem i puzanjem skraćuje se beton, i to skraćenje iznosi obično $0,8 \dots 1,0 \text{ mm/m}$. Ako se to skraćenje pomnoži s modulom elastičnosti čelika, koji je približno jednak za sve vrste čelika, $\sim 200 \text{ N/mm}^2$, dobiva se smanjenje naprezanja čelika koje najmanje iznosi $\Delta \sigma_k = 0,8 \cdot 200 = 160 \text{ N/mm}^2$. To je više od dopustivog naprezanja

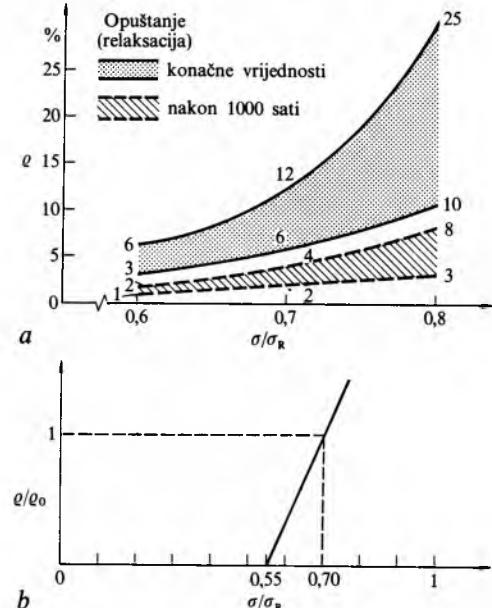


Sl. 2. Dijagrami naprezanje-produljenje čelika za armirani beton i čelika za prednapinjanje

nja betonskog čelika. Zbog toga se za prednapinjanje mora upotrijebiti čelik velike čvrstoće.

Prema vrsti armature za prednapinjanje razlikuju se žice (promjer manji od 12 mm), šipke (promjer veći od 12 mm) i užad, odnosno kabeli. Žice su okrugle (promjera 5, 7, 8 i, iznimno, 12 mm) ili profilirane (za prednapinjanje na stazi), a isporučuju se u kolutima. Šipke najčešće imaju promjer od 26 mm, a isporučuju se do duljine od 18 m. Užad se plete od struna ili žica. Užad spletenu od najviše 7 struna zovu se spletovi ili vrpce. Obično se pletu tri strune promjera 2,4 mm, ili sedam struna, od kojih su šest promjera 4,2 mm, a sedma promjera 4,3 mm (splet ima promjer 12,7 mm). Užad se najčešće plete od 19 struna, pa se oko spleta od 7 struna promjera 4,2 mm dodaje još 12 struna istog promjera.

Od mehaničkih svojstava najvažnija su prekidna čvrstoća, granica velikih produljenja i produljenje pri najvećem naprezanju (sl. 2). Obično je prekidna čvrstoća to veća što je promjer žice manji. Granica velikih produljenja određena je naprezanjem uz koje nakon rasterećenja ostaje trajno produljenje od 0,2% (naprezanje $\sigma_{0,2}$). Produljenje pri najvećem naprezanju iznosi 3...7%. Produljenje nakon granice velikih produljenja omogućuje prilagodbu građevnog elementa preopterećenju, što povećava sigurnost konstrukcije.



Sl. 3. Opusťanje čelika. a) Prosječne vrijednosti opusťanja ρ , b) ovisnost omjera stvarnog i nazivnog opusťanja (ρ/ρ_0) o omjeru početnog naprezanja (σ) i čvrstoće čelika (σ_r)

Opusťanje (relaksacija) je svojstvo napregnutog materijala da mu se uz njegovu nepromijenjenu duljinu s vremenom smanjuje naprezanje. To smanjenje naprezanja (ρ) u čeliku za prednapinjanje može dostići i 10% od početnog naprezanja σ_0 . Smanjenje naprezanja zbog opusťanja ovisi o početnom naprezanju. Ako početno naprezanje iznosi 55% ili manje od prekidne čvrstoće, smanjenje naprezanja može se zanemariti, ali ono naglo raste s daljim povećanjem početnog naprezanja (sl. 3). Pokus za određivanje smanjenja naprezanja traje 1000 sati (~42 dana), pa se takvim pokusom dobiva mjeru opusťanja označena sa ρ_{1000} , koja je jedna od karakteristika čelika. Spomenutim pokusom tokom prva 24 sata dobiva se 2/3 mjere ρ_{1000} , a konačna mjeru opusťanja ρ_∞ iznosi $(2 \dots 2,4) \rho_{1000}$. Kvalitetni čelici za prednapinjanje imaju mjeru opusťanja ρ_{1000} koja iznosi svega 2%. Duljina se čelične žice u prednapetom betonu s vremenom mijenja, zbog skupljanja i puzanja betona, pa je zbog toga stvarna konačna mjeru opusťanja čelika za ~25% manja od one određene u laboratorijskim uvjetima.

Sustavi prednapinjanja. Tehničko rješenje, postupak prednapinjanja, te potrebni uređaji i pribor čine sustav prednapinjanja. Danas postoji u svijetu više stotina takvih sustava.

Razlikuju se po oblikovanju i smještaju armature, izvedbi šupljina (prolaza) za armaturu i uređajima za sidrenje, načinu napinjanja i injektiranja te drugim karakteristikama. Primjena sustava prednapinjanja ovisi o vrsti armature (žice, šipke, užad, spletovi struna), vrsti prednapinjanja (s trajnom vezom između čelika i betona ili bez trajne veze) i karakteristikama građevine.

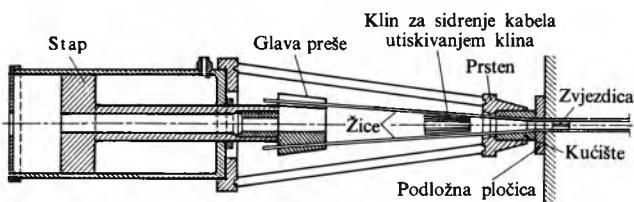
Svaki sustav mora ispunjavati sljedeće uvjete: a) sila prednapinjanja mora se pouzdano ostvarivati i mora se moći kontrolirati; b) veza između kabela i uređaja za napinjanje mora biti jednostavna i razrješiva; c) sidrenje mora biti sigurno i neovisno o vremenu; d) utrošak materijala treba biti u prihvativljivim granicama. Poželjno je da se sila prednapinjanja može naknadno povećavati ili smanjivati i da sustav prednapinjanja bude prikladan za građenje s pretfabriciranim elementima.

Opisat će se samo tri sustava prednapinjanja kabelima, jer se takvi sustavi u nas najčešće primjenjuju. Od ta tri sustava prvi je već spomenuti sustav B. Žežela, razvijen u Institutu za materijale SR Srbije (sustav IMS), a prema drugim dvama sustavima grade naše radne organizacije na osnovi kupljenih licencijskih prava.

Sustav IMS. Sila prednapinjanja ostvaruje se razvlačenjem snopa čeličnih žica (kabela) pomoću hidrauličke preše koja se opire o očvrsli beton. Trajno djelovanje sila postiže se sidrenjem; sidro se također opire o beton. Sve su žice u snopu jednakog promjera, koji može biti 5, 7, 10 ili 12 mm, pa sila iznosi 150...3200 kN, što ovisi o broju žica u snopu. Sidro se sastoji od kućišta i klina, a može imati i čeličnu podložnu pločicu. Razlikuju se sidra koja se postavljaju na mjesto gdje se napinje kabel (sl. 4) od onih koji se ugrađuju u beton (sl. 5). Često se umjesto njih ugrađuju sidra kao i na strani gdje se napinje kabel, samo se tada zakline prije napinjanja. Snopovi žice postavljaju se u savitljive čelične ili plastične cijevi u koje se nakon napinjanja uštrcava cementna kaša (ako se želi osigurati trajna veza između čelika i betona) ili zaštitno ulje, odnosno mast. Sila u žicama predaje se sidru trenjem između žica i kućišta, odnosno snažno utisnuta klinu.

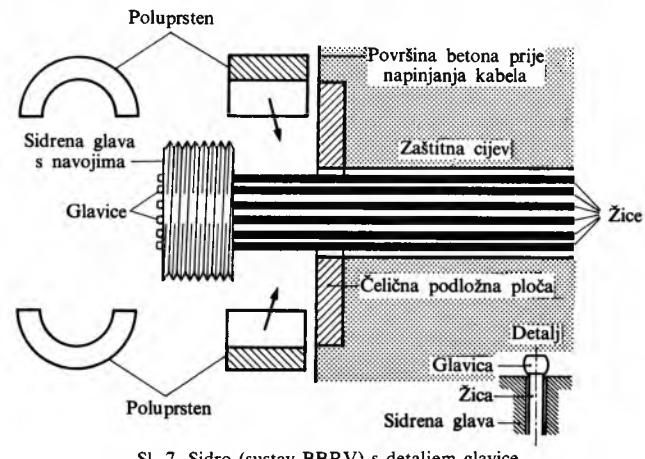
Ako su kabeli veoma dugi (dulji od 40 m), pa je njihovo elastično produljenje veće od hoda stapa preše, oni se

privremeno sidre, dok se rezanjem ne skrate žice, pa se ponovno napinju. To se može ponavljati, pa se tako smanjuje utjecaj opuštanja čelika, a djelomice i skupljanja i puzanja betona. Za prednapinjanje potrebne su preše, pumpe i mutilice za cementnu kašu. Preša se sastoji od glave, tijela, stapa i uređaja za utiskivanje klina (sl. 6). Glava služi za sidrenje žica. Ulje pod tlakom dovodi se iz pumpe u prešu gdje potiskuje stup koji povlači glavu i tako razvlači žice. Sila koja tako nastaje prenosi se preko čunjasto raspoređenih stupaca na prsten koji se opire o kućište kabela, odnosno podložnu pločicu. Tlak ulja mjeri se manometrom, a iz umnoška tlaka i ploštine stapa određuje se vrijednost sile. Ta se vrijednost provjerava mjerjenjem produljenja žice.



Sl. 6. Preša za napinjanje kabela (sustav IMS)

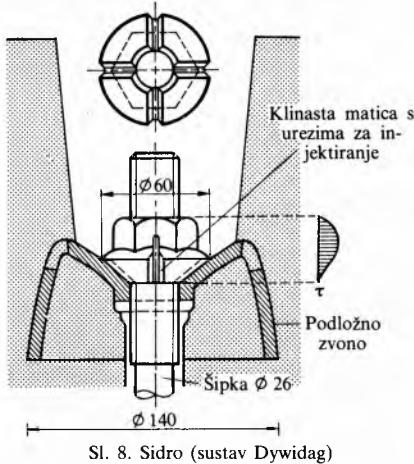
Sustav BBRV (Švicarska). U nazivu sustava nalaze se početna slova prezimena autora sustava (Birkenmeier, Brandestini, Roš, Vogt). U primjeni je od 1949. godine, a rasprostranjen je gotovo po čitavu svijetu. Standardni kabeli sastoje se od glatkih žica promjera 7 mm. O broju žica ovisi sila napinjanja koja može iznositi 500 do 3010 kN. Kabeli se ugrađuju prije betoniranja u cijevi od rebrasta lima. Sidro je od jakog čeličnog prstena (glava sidra) kroz koji prolaze žice koje imaju glavice oblikovane u hladnom stanju (sl. 7). Žice se razvlače pomoću preše, a sila se održava umetanjem čeličnih poluprstenova. Žice kabela moraju biti jednakog duge, što se postiže pomoću posebnog uređaja. Glava sidra ima, osim rupa za žice, vanjski narez na koji se spaja stup preše. Preša se opire o beton preko podložne pločice. Prije su se upotrebljavala posebna sidra ugrađena u beton, a danas se upotrebljavaju jednakana sidra i na mjestu napinjanja i na kraju kabela. Postoje i sidra za nastavljanje koja su veoma jednostavna i kojima se mogu produljivati napeti i nenapeti kabeli. Osim toga, moguće je napinjanje do bilo kojeg dijela punе sile, što može biti potrebno kad se gradi od pretfabričiranih elemenata. Povećanjem dimenzija podložne pločice može se postići da se smije napinjati s oslonom na beton manje čvrstoće. To su prednosti sustava BBRV kojima taj sustav nadmašuje ostale sustave. Osnovni je, međutim, nedostatak tog sustava skupoća sidara, pa to treba uzeti u obzir kad se projektiraju kraći elementi od prednapetog betona.



Sl. 7. Sidro (sustav BBRV) s detaljem glavice

Sustav Dywidag (SR Njemačka). Naziv potječe od prvih slogova osnivača tvrtke Dyckerhof i Widmann. Kabeli se sastoje od šipaka, najčešće promjera 26 mm. Šipke imaju na

oplošju navoje izrađene hladnim valjanjem. Tako se dobiva čvršći čelik i postiže se manji gubitak presjeka nego narezivanjem. Kabeli se ugrađuju prije betoniranja u cijevi od rebrasta lima. Sidro na strani napinjanja sastoji se od podložnog zvona na koje se priljubljuje klinasta matica sa četiri ureza (sl. 8). Klinasti oblik matice služi za postupan prijenos sile sa šipke na sidro. Sidro na suprotnom kraju šipke (tzv. nepomično) ima oblik četvrtaste pločice koja se neposredno navija na šipku. Površina pločice koja se oslanja na beton primjerena je dopustivom tlačnom naprezanju pa nije potrebna zavojnica za obuhvaćanje betona. Navojna su sidra osjetljiva na dodatna naprezanja zbog mjestimičnog savijanja.



Sl. 8. Sidro (sustav Dywidag)

Zbog toga mora sila na šipku biti centrirana, odnosno mora sidreno zvono biti okomito na os šipke. Taj je sustav osobito pogodan za okomite ili jako nagnute kabele, jer nisu potrebna posebna ukrućenja za osiguranje točnog položaja kabelâ. Također je taj sustav pogodan za izvedbu privremenih gradevina od prethodno izrađenih elemenata koji se nakon demontiranja mogu ponovno upotrijebiti.

PRORAČUN I DIMENZIONIRANJE PREDNAPETIH BETONSKIH NOSAČA

Prednapinjanje prije očvrsnuća betona i naknadno napinjanje. Najizrazitija razlika između prethodnog i naknadnog napinjanja armature pojavljuje se u obliku osi kabela i spletova struna. Zbog izvedbe spletova struna moraju biti ravni (ili ravni po odsjećima), dok se os kabela može prilagoditi momentnom dijagramu od vanjskog opterećenja. Pri napinjanju spletova struna (prethodno napinjanje) nema gubitaka zbog trenja osim neposredno uz sidro, a takvi se gubici mogu zanemariti s obzirom na veliku duljinu (najčešće ~100 m) staze za napinjanje.

Budući da se većina opuštanja čelika zbiva u prvim satima nakon napinjanja, smanjenje je naprezanja zbog opuštanja mnogo manje kad se primjenjuje prethodno napinjanje. Zbog toga se pri napinjanju spletova struna mogu dopustiti veća početna naprezanja čelika. S druge strane, tokom prethodnog napinjanja nastaju veći gubici zbog elastičnog skraćenja betona, jer se napinjanjem nakon očvrsnuća betona (naknadno napinjanje) može nadoknaditi dio elastičnog skraćenja.

U naknadno napetih elemenata kabeli se skupljaju što dalje od težišta presjeka, dok se prethodno napeta armatura mora raspodijeliti, doduše nejednoliko, gotovo po čitavom presjeku. U prethodno napetim nosačima postiže se najčešće jednolik raspored armature uzduž čitava raspona, što treba uzeti u obzir da ne bi naprezanja na krajevima nosača prekoračila dopustivu granicu.

U nosačima presjeka u obliku slova I i T pojavila bi se na krajevima nosača velika posmična naprezanja kad bi se spletovi struna razmjestili samo u donjem pojasu nosača. Zbog takvih posmičnih naprezanja mogu nastati pukotine koje bi se proširele uzduž cijelog nosača, pa spletove žica treba tako raspoređiti da se naprezanje na krajevima nosača

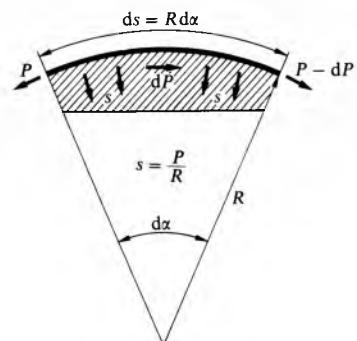
jednoliko raspodijeli. Kako bi se izbjeglo prekoračenje dopustivih naprezanja uz krajeve nosača uz istodobno dobro iskorištenje presjeka u polovištu raspona, mora se dio spletova struna tako postaviti da nema dodira između struna i betona. To se postiže opkoljavanjem spletova plastičnim cijevima na dijelu nosača uz njegove krajeve.

Naknadno napeti nosači mogu nositi veću poprečnu silu jer nagnuti kabeli preuzimaju dio poprečne sile. Kad je armatura prethodno napeta, nema toga djelovanja, pa posmična naprezanja mogu biti i dvostruko veća u inače jednakim uvjetima, dok glavna vlačna naprezanja mogu biti i četverostruka. Zbog toga se prethodno napeti nosači izvode samo kad je potrebno mnogo takvih nosača, pa se povećani izdaci za gradivo nadoknađuju manjim izdacima za radnu snagu.

Gubici i smanjenje sile prednapinjanja pojavljuju se zbog trenja između žica i zaštitnih cijevi, klizanja kline u sidru i trenutnog elastičnog skraćenja betona. Ako se od sile koja se javlja na mjestu djelovanja preše odbiju gubici, dobiva se početna sila prednapinjanja. Ta se sila s vremenom postupno smanjuje, i to sve sporije. To je posljedica opuštanja čelika, te smanjenja duljine napete žice zbog skupljanja i puzanja betona. Postupno smanjivanje sile može potrajati mjesecima, pa i godinama, dok napokon sila ne dostigne konačnu vrijednost, P_∞ . Točan proračun promjene sile s vremenom veoma je složen. Ta promjena malo utječe na nosivost konstrukcije, ali je važna za predviđanje izobličenja, osobito za konzolnu gradnju mostova.

Gubici zbog trenja. Kad se čelična žica napne, ona se nastoji ispraviti, ako se zanemari progib zbog težine žice. Žica se, osim toga, produljuje, pa nastaje trenje između žice i zaštitne cijevi. Gubitak zbog trenja bit će to veći što je veći dodirni tlak, odnosno što je žica više zakriviljena. Trenje smanjuje silu u žici idući od preše prema učvršćenom kraju.

Os kabela sastoji se od prividno ravnih i zakriviljenih dijelova. Trenje se pojavljuje i na prividno ravnim dijelovima, jer se ne može napraviti savršeno izravnati kabel. Kabel se, naime, podupire na stanovitim razmacima, a između njih on se progiba djelovanjem vlastite težine, a poslije i djelovanjem težine svježeg betona. To se naziva nepredviđenom zakriviljenosti kabela.



Sl. 9. Uz proračun smanjenja sile u kabelu prebačenu preko zakriviljene podloge

Ako se zakriviljena žica duljine ds napinje silom P , na dodirnu će zakriviljenu plohu djelovati tlak Pds/R usmjeren prema središtu zakriviljenosti (sl. 9), gdje je R polumjer zakriviljenosti. Sila trenja koja se opire pomicanju žice iznosi

$$dP = -\mu \frac{Pds}{R}, \quad (6)$$

gdje je μ koeficijent trenja. Budući da je $ds = R d\alpha$, dobiva se diferencijalna jednadžba

$$\frac{dP}{P} = -\mu d\alpha \quad (7)$$

kojoj je rješenje

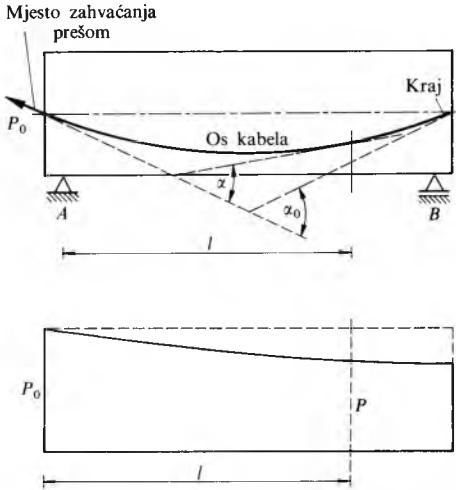
$$P = P_0 \exp(-\mu \alpha), \quad (8)$$

gdje je P_0 sila na početku zakriviljenja, a α kut skretanja od početka do točke u kojoj djeluje sila P .

Utjecaj nepredvidene zakriviljenosti izračunava se pomoću koeficijenta linijskih gubitaka λ koji je jednak umnošku zbroja kutova skretanja na 1 m duljine prividno ravnog kabela i koeficijenta trenja, pa sila u presjeku kabela udaljenu 1 metar od mjesta na kojem djeluje preša (sl. 10) iznosi

$$P = P_0 \exp(-\mu\alpha - \lambda l). \quad (9)$$

Koeficijenti μ i λ određuju se pokusom, a njihove vrijednosti mogu se naći u priručnicima.

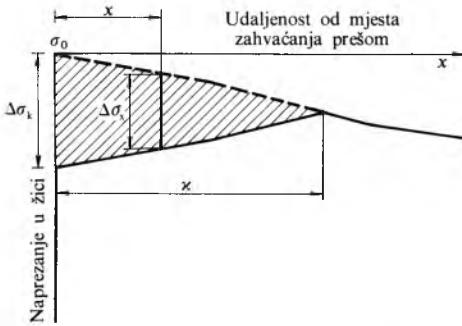


Sl. 10. Smanjenje sile prednapinjanja djelovanjem trenja

Gubici zbog povlačenja žica pri zaklinjavanju. U sustavu prednapinjanja, u kojem se sidrenje ostvaruje utiskivanjem klina (npr. sustav IMS), pojavljuje se dodatni gubitak zbog toga što klin tokom utiskivanja povlači za sobom žice pa se one skraćuju, a skraćivanjem se smanjuje sila u žicama. Uvlačenju žice opire se trenje za koje se pretpostavlja da je jednako onome pri napinjanju. Udaljenost do koje seže utjecaj povlačenja žice dobiva se, u skladu s Hookeovim zakonom, iz izraza

$$\kappa = \frac{1}{E_k} \int_0^x \Delta\sigma_x dx, \quad (10)$$

gdje je E_k modul elastičnosti čelika kabela, a $\Delta\sigma_x$ smanjenje naprezanja zbog povlačenja (sl. 11).



Sl. 11. Djelovanje povlačenja žica u toku zaklinjavanja

Smanjenje sile zbog skupljanja i puzanja betona. Prilikom određivanja utjecaja skupljanja i puzanja betona na smanjenje sile u čeliku kabela polazi se od veze između naprezanja i skraćenja betona. Ukupno skraćenje betona do trenutka t zbog skupljanja i puzanja pod dugotrajnim promjenljivim opterećenjem iznosi

$$\varepsilon_{bt} = \frac{\sigma_{b0}}{E_b} (1 + \varphi_t) + \frac{1}{E_b} \int_0^t \frac{d\sigma_{bt}}{dt} (1 + \varphi_t - \varphi_r) d\tau + \varepsilon_{sr}, \quad (11)$$

gdje je σ_{b0} naprezanje u betonu u trenutku napinjanja ($t = 0$),

E_b modul elastičnosti betona, $d\sigma_{bt}$ negativni prirast naprezanja u vremenu $d\tau$ ($0 \leq \tau \leq t$), φ_t i φ_r koeficijenti puzanja u trenutku t , odnosno r , a ε_{sr} skupljanje betona (mm/m) u trenutku t .

Naprezanje u betonu u razini težišta kabela djelovanjem sile prednapinjanja u trenutku t , koja iznosi $P_t = A_k \sigma_{kt}$, uz pretpostavku savijanja uzdužnom silom određuje se iz izraza

$$\sigma_{bt} = \sigma_{kt} \left(1 + \frac{e_k^2}{i_b^2} \right) = \sigma_{kt} \omega_k Q_{bk}, \quad (12)$$

gdje je σ_{kt} naprezanje u čeliku kabela u trenutku t , A_k i A_b površine presjeka kabela i betona, e_k udaljenost između težišta presjeka kabela i težišta ukupnog presjeka, a i_b polumjer tromosti ukupnog presjeka. U pojednostavljenom izrazu ω_k je omjer između površina A_k i A_b , a Q_{bk} je jednak izrazu među zagradama.

Kad se jednadžbe (11) i (12) deriviraju po vremenu, kad se pretpostavi afinost vremenskog toka skupljanja i puzanja betona, te kad se uzme u obzir jednakost skraćenja betona i čelika (tzv. uvjet kompatibilnosti), dobiva se diferencijalna jednadžba

$$\frac{d\sigma_{bt}}{dt} + \sigma_{bt} \frac{d\sigma_{bt}}{dt} + \frac{\varepsilon_{sr}}{\varphi_s} E_b \xi \frac{d\varphi_t}{dt} = 0, \quad (13)$$

gdje je

$$\xi = \frac{n_k \omega_k Q_{bk}}{1 + n_k \omega_k Q_{bk}}, \quad (14)$$

a n_k omjer modula elastičnosti betona i čelika. Rješenje jednadžbe (13) glasi

$$\sigma_{bt} = \frac{\varepsilon_{sr}}{\varphi_s} E_b [C \exp(-\xi \varphi_t) - 1]. \quad (15)$$

Konstanta C određuje se iz uvjeta da je σ_{bt} u trenutku $t = 0$ jednako σ_{b0} . Nakon uvrštenja vrijednosti za C , dobiva se smanjenje naprezanja u betonu u razini težišta kabela do trenutka t iz izraza

$$\Delta \sigma_{bt} = \left(\frac{\varepsilon_{sr}}{\varphi_s} E_b + \sigma_{b0} \right) [1 - \exp(-\xi \varphi_t)], \quad (16)$$

dok se pripadno smanjenje naprezanja u čeliku određuje iz izraza

$$\Delta \sigma_{kt} = \frac{\Delta \sigma_{bt}}{\omega_k Q_{bk}}. \quad (17)$$

Navedeni izrazi osnivaju se na Dischingerovoј teoriji starenja. Ta teorija ima dosta nedostataka, ali ipak daje za praksu zadovoljavajuće rezultate, jer se u praksi ne pojavljuje smanjenje sile veće od 20% od početne vrijednosti.

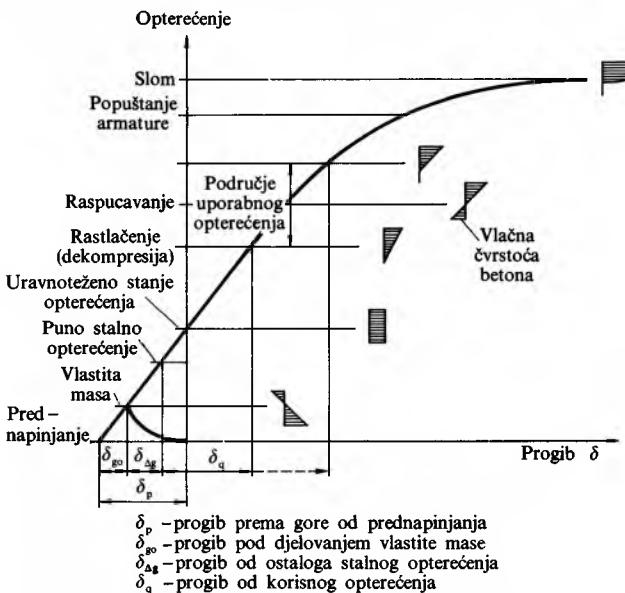
Utjecaj opuštanja čelika. U čelicima koji se danas proizvode i upotrebljavaju za prednapinjanje betona smanjenje naprezanja čelika zbog opuštanja iznosi svega nekoliko postotaka. Zbog toga opuštanje čelika ne treba ni uzimati u obzir u proračunima prednapetih elemenata. Tvornice žica obično daju podatke o iznosu opuštanja prema početnom naprezanju žice.

Ponašanje nosača pod rastućim opterećenjem. Ponašanje savijanog nosača pod rastućim opterećenjem može se jednom pratiti promatranjem odnosa između progiba grede δ i vanjskog opterećenja (sl. 12), a drugi put promatranjem ovisnosti naprezanja u čeliku (napetom i nenapetom) i u betonu o vanjskom opterećenju (sl. 13).

U trenutku napinjanja nosač se progiba prema gore jer se djelovanjem sile prednapinjanja skraćuju donji slojevi nosača. Stalno opterećenje smanjiće taj progib, a kad na nosač djeluje puno računsko opterećenje, nosač će imati progib prema dolje. U području unutar korisnog opterećenja postoje tri karakteristična opterećenja. Prvo karakteristično opterećenje odgovara stanju kad su sva naprezanja po visini presjeka jednaka pa nema progiba nosača, a nosač se samo skraćuje. Drugo karakteristično opterećenje odgovara stanju dekompresije kada iščezava naprezanje na donjem rubu nosača. Treće karakteristično opterećenje odgovara pojavi pukotina

PREDNAPETI (PREDNAPREGNUTI) BETON

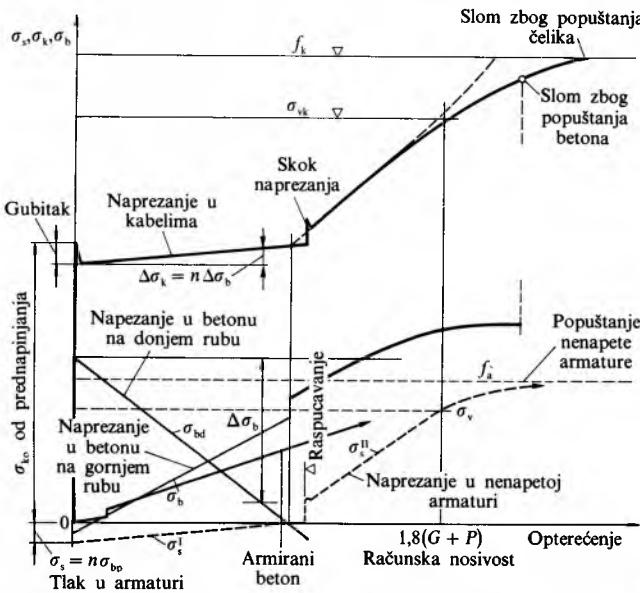
na donjem rubu nosača, jer vlačna naprezanja u betonu prekoračuju vlačnu čvrstoću betona. Poželjno je da stalno opterećenje bude što bliže prvom karakterističnom opterećenju, jer se tako izbjegava prekomjerni progib pojačan puzanjem betona. Nakon raspucavanja betona osjetno brže rastu progibi s porastom opterećenja, a to je pogotovo izrazito kad je dosegnuta granica velikih produljenja u čeliku.



Sl. 12. Ovisnost progiba grede o vanjskom opterećenju (ucrtane su i raspodjele naprezanja u betonu po visini presjeka)

Na sl. 12 vide se i pripadni dijagrami naprezanja u betonu po visini presjeka. Sve dok je opterećenje daleko od onoga uz koje počinje popuštanje čelika, raspodjela je naprezanja po presjeku pravocrtna. Za veća opterećenja koja se približavaju slomu opterećenje je raspodijeljeno po krivulji, što odgovara nelinearnom ponašanju betona kad su naprezanja veća od 40% od čvrstoće betona.

Najveće naprezanje u čeliku kabela u cijelom vijeku trajanja nosača doseže se u trenutku prednapinjanja (sl. 13), što dakako vrijedi uz pretpostavku da opterećenje nije veće od računskog opterećenja. Budući da nosač ima progib prema gore, težina nosača ne povećava naprezanje u čeliku kabela. Kako opterećenje raste, donji se rub nosača razvlači pa se smanjuje naprezanje u betonu, a povećava u čeliku. Taj



Sl. 13. Ovisnost naprezanja u betonu, nenenapetoj armaturi i kabelima o opterećenju

prirost naprezanja nije velik i iznosi oko šest puta više nego smanjenje naprezanja u betonu, koje obično nije veće od 15 N/mm^2 . Prema tome, prirost naprezanja u čeliku iznosi $\sim 90 \text{ N/mm}^2$, dok je u armiranom betonu naprezanje u armaturi obično $\sim 140 \text{ N/mm}^2$, dakle osjetno veće. Kad opterećenje toliko poraste da počne raspucavanje betona, naglo poraste naprezanje u čeliku (sl. 13), jer tada čelik mora preuzeti onu vlačnu silu koju je do tada prenosio beton. Skok naprezanja ovisi o vlačnoj čvrstoći betona i količini nenenapete armature uz vlačni rub nosača. Nakon toga skoka, a uz povećanje opterećenja, naprezanje u čeliku brže raste, a brzina toga porasta ovisi o omjeru ukupne površine presjeka čelika (kabeli i nenenapeta armatura) i površine presjeka betona, te o prianjanju između čelika i betona. Što je to prianjanje slabije, to sporije raste naprezanje u čeliku. Zbog toga presjek prestaje biti ravan, brže se skraćuje beton, pa se neutralna os naprezanja pomiče prema gornjem rubu nosača.

U nenapetoj armaturi sve do dekomprezije donjeg ruba vlada tlak, nakon toga se pojavljuje malo vlačno naprezanje do pojave raspucavanja, kad naglo poraste naprezanje slično skoku naprezanja u prednapetoj armaturi. Nakon toga skoka naprezanje u nenapetoj armaturi raste nešto brže nego u kabelu, jer postoji bolje prianjanje.

Iz dijagrama na sl. 13 vidi se da naprezanja u čeliku nisu razmjerna vanjskom opterećenju. Dakle, dopustiva naprezanja pri prednapinjanju nisu ni u kakvu odnosu sa sigurnošću nosača. Također ni naprezanja u betonu nisu razmjerna s opterećenjem. Zbog toga treba dokazati da se nosač neće slomiti pri preopterećenju.

Proračun normalnih naprezanja prema teoriji elastičnosti.

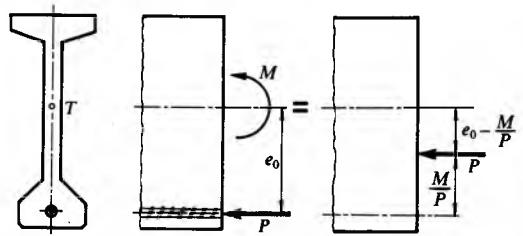
Promatra se, radi jednostavnosti, slobodno položena greda opterećena momentima savijanja promjenljivima uzduž raspona, uz pretpostavku da su dimenzije poprečnog presjeka zadane. Pri statičkom provjeravanju moraju biti ispunjena sljedeća dva uvjeta: a) da postoji dovoljna sigurnost s obzirom na graničnu nosivost, što znači da nosač ima dovoljnju rezervu sigurnosti da se neće slomiti zbog prekoračenja računskog opterećenja i smanjenja računske čvrstoće materijala i b) da naprezanja tokom upotrebe ne prekoračuju dopustive vrijednosti utvrđene propisima. Drugi uvjet posredno osigurava zadovoljenje uvjeta uporabljivosti (progibi u dopustivim granicama, sprečavanje pojave pukotina i dr.), a služi za dimenzioniranje presjeka.

Rubna naprezanja (naprezanje na gornjem rubu σ_g i na donjem rubu σ_d) moraju biti unutar sljedećih granica:

$$\sigma_{vp} \leq \sigma_g \leq \sigma_{tk}, \quad (18)$$

$$\sigma_{vk} \leq \sigma_d \leq \sigma_{tp}, \quad (19)$$

gdje je σ_{vp} vlačno naprezanje tokom prednapinjanja, σ_{tk} tlačno naprezanje tokom upotrebe, σ_{vk} vlačno naprezanje tokom upotrebe, a σ_{tp} tlačno naprezanje tokom prednapinjanja. Dakle, dopustiva se naprezanja odnose na dva krajnja stanja: prednapinjanje i upotrebu.



Sl. 14. Uz određivanje središta tlaka

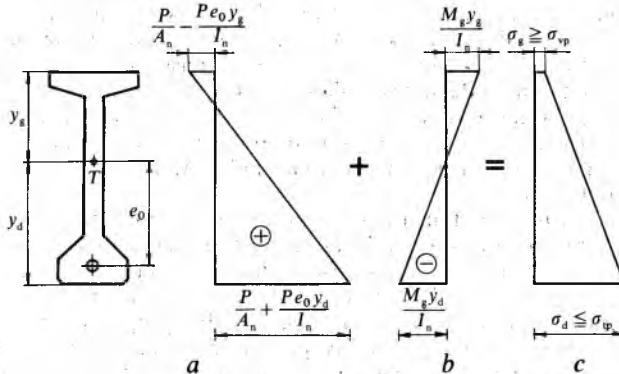
Moment savijanja nepovoljno napreže beton (pojavljuju se prevelika vlačna naprezanja), pa se uvodi tlačna sila P (sl. 14) dovoljno udaljena od težišta presjeka da bi se naprezanja prilagodila svojstvima betona. Kad na presjek nosača, osim momenta savijanja M , djeluje još uzdužna sila P , njihovo se zajedničko djelovanje može zamijeniti djelovanjem sile P

pomaknute u novo hvatište

$$e = e_0 - \frac{M}{P}, \quad (20)$$

gdje je e_0 stvarno hvatište sile P . Novo hvatište sile P naziva se hvatištem tlaka, a geometrijsko mjesto svih središta tlaka uzduž nosača tlačnom krivuljom.

Presjek je nosača napregnut promjenljivim momentima savijanja, ali su za dimenzioniranje mjerodavne samo krajne vrijednosti. Obično je najmanji moment u trenutku prednapinjanja (M_p), a najveći tokom korištenja (M_k). Za ta dva stanja moraju biti zadovoljeni uvjeti (18) i (19).



Sl. 15. Naprezanje tijekom prednapinjanja. a) prednapinjanje, b) djelovanje momenta M_p , c) ukupno naprezanje

Tokom prednapinjanja (savijanje uzdužnom silom P , sl. 15) naprezanje na gornjem rubu iznosi:

$$\sigma_{gp} = \frac{P}{A_n} - \frac{Pe_0 y_g}{I_n} + \frac{M_p y_g}{I_n} \geq -\sigma_{vp}, \quad (21)$$

gdje su A_n i I_n površina i moment tromosti stvarnog presjeka nosača (ne uzimajući u obzir šupljine za prolaz kabela). Ako se u (21) uvrste izrazi za moment otpora

$$W_{gn} = \frac{I_n}{y_g} \quad (22)$$

i za udaljenost između težišta i donjega ruba jezgre presjeka

$$j_{dn} = \frac{W_{gn}}{A_n}, \quad (23)$$

dobiva se

$$\sigma_{gp} = \frac{P}{A_n} \left(1 - \frac{e_0}{j_{dn}} \right) + \frac{M_p}{W_{gn}} \geq -\sigma_{vp}. \quad (24)$$

Analogno, dobiva se naprezanje na donjem rubu:

$$\sigma_{dp} = \frac{P}{A_n} \left(1 + \frac{e_0}{j_{gn}} \right) - \frac{M_p}{W_{gn}} \leq -\sigma_{ip}. \quad (25)$$

Tokom upotrebe mjerodavna su naprezanja nakon što je dostignuta konačna vrijednost sile P , koja tada iznosi $P_\infty = \eta P$, gdje je η koeficijent smanjenja sile zbog skupljanja i puzanja betona. Naprezanja na gornjem i donjem rubu nosača tada iznose:

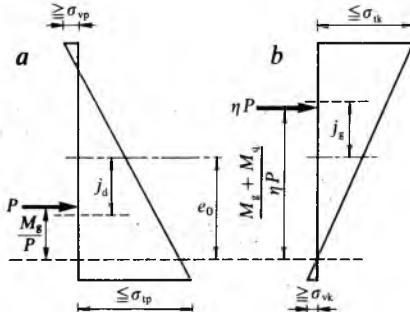
$$\sigma_{gk} = \frac{\eta P}{A_i} \left(1 - \frac{e_0}{j_{di}} \right) + \frac{M_k}{W_{gi}} \leq \sigma_{tk}, \quad (26)$$

$$\sigma_{dk} = \frac{\eta P}{A_i} \left(1 + \frac{e_0}{j_{gi}} \right) - \frac{M_k}{W_{di}} \geq -\sigma_{vk}. \quad (27)$$

Indeks i znači da treba uzeti u obzir tzv. idealni presjek, koji je jednak presjeku betona uvećanom za n -terostruku površinu presjeka čelika. U praksi, međutim, često se računa samo s presjekom betona, pa se tako izjednačuje stvarni presjek betona s idealnim presjekom nosača.

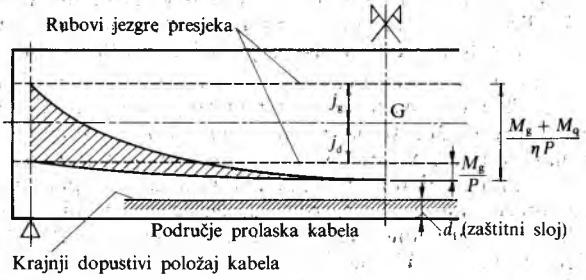
Raspodjele naprezanja po presjeku nosača prikazane su na sl. 16.

U prednapetom betonu poopćena jezgra presjeka služi za određivanje dopustivog položaja kabela, tj. granica unutar kojih se kabel mora smjestiti. Ako se, naime, hvatište tlaka nalazi unutar poopćene jezgre presjeka, rubna naprezanja ne prekoračuju dopustiva.



Sl. 16. Raspodjela naprezanja po presjeku nosača. a) početno, b) konačno stanje

Donja se granica dobiva ako se od donjeg ruba jezgre nanese pomak hvatišta sile za vrijeme prednapinjanja (M_p/P), a gornja granica ako se od gornjeg ruba jezgre nanese pomak hvatišta sile za vrijeme korištenja ($M_k/(\eta P)$). Ako se te granice određe za sve presjeke, dobiva se područje u kojemu se mora nalaziti težište presjeka kabela (sl. 17).

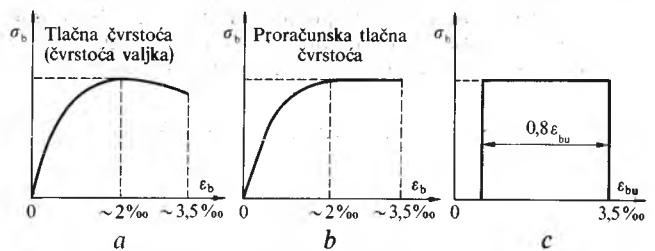


Sl. 17. Područje smještaja težišta presjeka kabela

Granična nosivost pri savijanju. Već je spomenuto da naprezanja u betonu i čeliku rastu s opterećenjem, ali da ona nisu razmjerna opterećenju, pa da je potrebno dokazati graničnu nosivost.

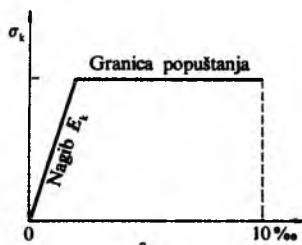
Pri dokazivanju granične vrijednosti pretpostavlja se da postoji takvo prianjanje između čelika i betona da je osigurana jednakost njihovih relativnih deformacija i da presjeci nosača ostaju ravni sve dok se ne dosegne granica nosivosti. Druga pretpostavka slijedi iz prve, a obje su u praksi najčešće ispunjene. Prema drugoj pretpostavci mogu se promjenom samo jednog od parametara (npr. skraćenja betona na rubu) odrediti raspodjele naprezanja po presjeku uz poznate radne dijagrame materijala koji prikazuju ovisnost naprezanja o deformaciji.

Umjesto stvarnih radnih dijagrama upotrebljavaju se shematisirani dijagrami. Tako se za beton upotrebljava dijagram koji se sastoji od parabole i horizontalnog pravca (sl. 18b), a za čelik dijagram koji se sastoji od dva pravca (sl. 19). Dijagram za beton može se još pojednostaviti ako se dio parabole zamjeni horizontalnim pravcem (sl. 18c).



Sl. 18. Radni dijagrami betona. a) stvarni dijagram, b) shematisirani dijagram sastavljen od parabole i horizontalnog pravca, c) pojednostavljen shematisirani dijagram

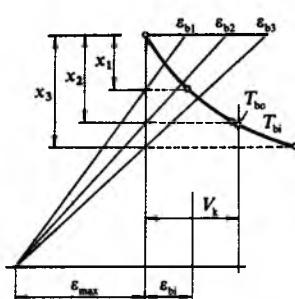
Kad se dokazuje granična nosivost, polazi se od pretpostavljene raspodjele relativnih deformacija po promatranom presjeku tako da se u prvom koraku računa s najvećim skraćenjem betona (3,5%) i s najvećim dodatnim produljenjem čelika (10%). Ako je presjek jače armiran (ω_k veći od 0,02), može se u prvom koraku računati s manjim dodatnim produljenjem čelika (npr. 5%). Dodatno produljenje čelika računa se od stanja koje odgovara konačnom naprezanju (σ_s), dakle kao da su uračunati svi gubici i ukupno smanjenje sile. Ako su, međutim, presjeci izrazito nesimetrični, polazi se od manje vrijednosti skraćenja betona (npr. od 2%).



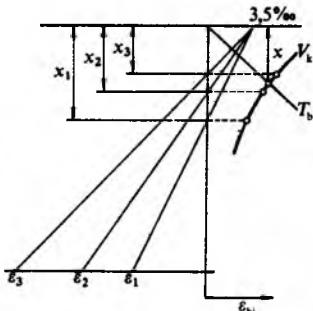
Sl. 19. Shematsirani radni dijagram čelika

Uz pretpostavljenu raspodjelu skraćenja i produljenja poznata je i raspodjela naprezanja iz koje se mogu dobiti tlačna rezultanta u betonu (T_b) i vlačna rezultanta u čeliku (V_k). Pri tom se, kao i za armirani beton, zanemaruje vlačna čvrstoća betona i udio čelika u preuzimanju tlačne sile.

Ako je $T_b > V_k$, znači da se nosač slomio popuštanjem čelika. Tome treba težiti u projektiranju. Ako je zadovoljen uvjet ravnoteže, treba u sljedećem koraku smanjiti ϵ_b i ponovo odrediti vrijednost T_b . Najčešće je potrebno pokušati s još jednom vrijednošću ϵ_b , pa ako ni tada nije ispunjen uvjet ravnoteže, može se nacrtati dijagram ovisnosti T_b o ϵ_b , odnosno o pripadnoj visini tlačnog pojasa x (sl. 20 i 21). U sjecištu pravca V_k , koji odgovara nepromijenjenoj sili, i krivulje T_b nalazi se tražena vrijednost ϵ_b koja odgovara stvarnoj vrijednosti T_b .



Sl. 20. Prikaz sloma zbog popuštanja čelika



Sl. 21. Prikaz sloma zbog popuštanja betona

Kad je zadovoljen uvjet ravnoteže, može se izračunati moment nosivosti presjeka M_n koji je jednak umnošku tlačne ili vlačne rezultante i kraka unutrašnjih sila (razmaka među rezultantama). U statički određenim sklopovima moment nosivosti presjeka ujedno je i moment nosivosti čitava sklopa. O statički neobičenim sklopovima bit će još riječi. Moment nosivosti presjeka uspoređuje se zatim s momentom od vanjskih opterećenja u uvjetima sloma. Tada moraju biti zadovoljene nejednadžbe

$$M_n \geq 1,6 M_{st} + 1,8 M_{pr} \text{ za } \Delta \epsilon_k \geq 3\%, \quad (28)$$

odnosno

$$M_n \geq 1,9 M_{st} + 2,1 M_{pr} \text{ za } \Delta \epsilon_k \leq 0, \quad (29)$$

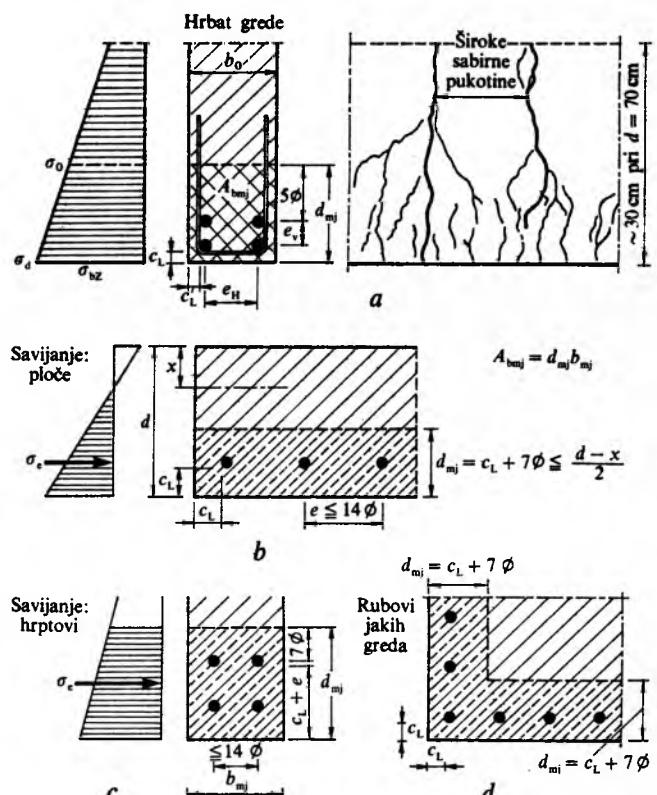
gdje je M_{st} moment od stalnog opterećenja, M_{pr} moment od promjenljivog opterećenja, a $\Delta \epsilon_k$ dodatna deformacija čelika. Ako su vrijednosti $\Delta \epsilon_k$ između 0 i 3%, vrijednosti koeficijenata uz momente određuju se linearnom interpolacijom.

Za ispravno dimenzioniranje presjeka prednapetog betona, pogotovo ako se želi postići dovoljna žilavost koja je potrebna da bi se postigla seizmička otpornost, redovito je mjerodavan uvjet (28).

Granično stanje uporabljivosti. Prednapete konstrukcije moraju biti tako projektirane da ne postoji opasnost od prekomernog raspucavanja betona i od prekomjerne savitljivosti. O raspucavanju betona i o savitljivosti ovisi trajnost i uporabljivost konstrukcije. S titranjima u prednapetim konstrukcijama obično nema teško.

U početku razvoja prednapetog betona nastojalo se potpuno spriječiti raspucavanje betona. Danas se, međutim, dopušta raspucavanje betona i na spremnicima za tekućine i plinove, samo, dakako, takve pukotine ne smiju obuhvatiti čitavu debljinu stijenke i ne smiju biti šire od 0,1 mm. Iako ispitivanja pokazuju da ne postoji opasnost od pojačane korozije ni onda kad su pukotine šroke 0,3 mm, ipak se traži da pukotine u agresivnu okolišu ne budu šire od 0,1 mm, a u manje agresivnu okolišu od 0,2...0,3 mm. Kad je potrebno osigurati izgled površine betona, pukotine ne smiju biti šire od 0,1 mm.

Sirina pukotine ovisi o mnogim faktorima, pa je točan proračun vrlo složen. Zbog toga prevladava praksa da se dodavanjem i pogodnim rasporedom nenapete armature (sl. 22) postigne stanje koje osigurava da neće biti prekoračene granične širine pukotine. Preporuke CEB prepričaju projektantu odluku o tome da li će postići ograničeno raspucavanje većim ili manjim prednapinjanjem, uz uvjet da se potrebna nosivost osigura dodavanjem nenapete armature. I ekonomski razlozi (manji utrošak skupog čelika za prednapinjanje) i uvjeti uporabljivosti (manji progibi prema gore npr. mostova) daju prednost tzv. djelomičnom prednapinjanju, o čemu će još biti riječi.



Sl. 22. Primjeri rasporeda armature za sprečavanje pojave velikih pukotina. a hrbat grede, b ploče, c hrpati, d rub jake grede (indeks mj znači mjerodavan)

Progibi prema dolje i prema gore važni su iz više razloga. Tako npr. na krovistima može biti onemogućena odvodnja ako se nosač toliko izobliči da se pojavi nagib suprotan predviđenom. Prevelikim progibom može biti ugrožena stabil-

nost sporednih elemenata, npr. pregradnih zidova nad stropovima i sl.

Dopušteni progibi, koji se obično navode kao omjer progiba i raspona, ovise o upotrebi nosača. U tabl. 1 nalaze se orientacijske vrijednosti omjera progiba i raspona prema američkim propisima.

Tablica 1

ORIENTACIJSKE VRJEDNOSTI OMJERA DOPUŠTENIH PROGIBA I RASPONA PREMA PROPISIMA SAD

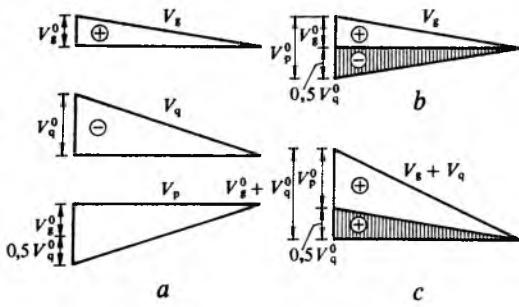
Krovni nosači nepovezani sa sporednim elementima	1/180
Krovni nosači povezani sa sporednim elementima	1/360
Krovni i stropni nosači povezani sa sporednim elementima koji bi se oštetili zbog prevelikog progiba	1/480
Krovni i stropni nosači povezani sa sporednim elementima kojima ne smeta veći progib	1/240
Mostovi bez pješačkog prometa	1/800
Mostovi s pješačkim prometom	1/1000

Izborom presjeka nosača može se znatno utjecati na progib. S obzirom na progib povoljniji su presjeci koji su bliži simetričnima s obzirom na vodoravnu os.

Djelovanje poprečne sile i momenta torzije. Na nosaču od armiranog betona pojavljuju se pukotine već i uz razmjerno mala opterećenja, dok nosač od prednapetog betona uglavnom nema pukotine u čitavom području opterećenja od početnog opterećenja do punog iznosa korisnog opterećenja. Smanjenje raspucavanja betona uzrokovo je smanjenjem glavnih vlačnih naprezanja, jer se pojavljuju uzdužna tlačna naprezanja i manje efektivne poprečne sile kad postoje kabeli s nagnutom osi. Kad u nosačima postoje kabeli s nagnutom osi, treba provjeriti glavna naprezanja, i to za vrijeme prednapinjanja, kad prevladava poprečna komponenta sile prednapinjanja, i za vrijeme korištenja, kad prevladava poprečna sila od ukupnog vanjskog opterećenja. Zbog toga je poželjno da poprečna komponenta sile prednapinjanja V_p bude približno jednaka zbroju poprečne sile od težine nosača V_g i polovice poprečne sile od dodatnog stalnog i promjenljivog opterećenja V_q , što znači da bude

$$V_p = V_g + \frac{1}{2}V_q. \quad (30)$$

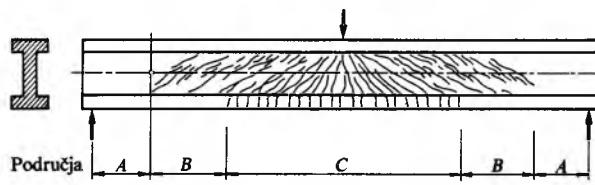
Tako se postiže da rezultirajuća poprečna sila u stanju prednapinjanja iznosi $-V_q$, a u stanju korištenja $+V_q$ (sl. 23). Treba paziti da se poprečna komponenta sile prednapinjanja u toku prednapinjanja razlikuje od iste komponente za vrijeme korištenja zbog smanjenja sile prednapinjanja. Najveće glavno naprezanje pojavljuje se obično na mjestima na kojima je presjek oslabljen zaštitnom cijevi kabela. Kad se računaju glavna naprezanja za vrijeme upotrebe, od punog se presjeka odbija samo polovica površina presjekâ cijevi.



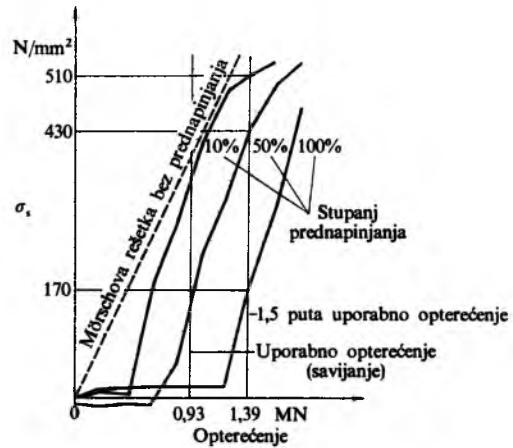
Sl. 23. Dijagrami poprečnih sila. a) pojedinačni utjecaji, b) stanje prednapinjanja, c) stanje upotrebe (rezultirajući su dijagrami osjenjeni)

Nosači od prednapregnutog betona najčešće imaju široke pojascice i tanke hrptove, pa se pukotine najprije pojavljuju u hrptu, osim onih koje nastaju djelovanjem momenta savijanja. Tako se u graničnom stanju nosivosti nosač može podijeliti u tri različita područja s obzirom na pukotine (sl. 24). U području B nema pukotine u pojascici zbog toga što

djeluju razmjerno velika normalna naprezanja od sile prednapinjanja, a moment savijanja još nije toliko da bi ih prevladao.



Sl. 24. Pukotine na prednapetom nosaču neposredno prije dosezanja granične nosivosti



Sl. 25. Ovisnost naprezanja u stremenu o opterećenju za različite stupnjeve prednapinjanja

Stupanj prednapinjanja veoma utječe na iznos poprečne sile prema kojoj treba dimenzionirati poprečnu armaturu u hrptu nosača (sl. 25). Za dimenzioniranje poprečne armature služi model poopćene rešetke u kojoj tlačni članci (između pukotina) imaju nagib manji od 45°. Prema prijedlogu propisa CEB mjerodavna se poprečna sila računa tako da se od granične poprečne sile V_u odbije dio poprečne sile V_b što ga prenosi tlačni pojasi i dio koji se pripisuje utjecaju prednapinjanja V_{bp} . Sila V_{bp} određuje se iz izraza $V_{bp} = \alpha_u V_b$, gdje je $\alpha_u = M_D / M_u$. M_D je moment koji djeluje pri dekompresiji donjeg ruba, a M_u granični moment. Dakle, poprečna sila mjerodavna za dimenzioniranje poprečne armature u hrptu iznosi

$$V_h = V_u - V_b - V_{bp} = V_u - (1 - \alpha_u) V_b. \quad (31)$$

Moment torzije djeluje na prednapeti betonski nosač kao na armiranobetonski nosač. Jedina je razlika u tome što se pukotine na prednapetom nosaču pojavljuju pri većem opterećenju. Nakon pojave pukotina, naprezanja u poprečnoj armaturi veoma brzo rastu, pa se, kad je dostignuta granična nosivost, pojavljuju tolika naprezanja koja bi se pojavila kad nosač i ne bi bio prednapet. Zbog toga nije opravданo smanjivati računski moment torzije mjerodavan za proračun poprečne armature onako kako se smanjuje računska poprečna sila. Dopustivo je smanjenje potrebne uzdužne armature za iznos s kojim prednapeta armatura sudjeluje u uravnoteživanju sila u betonskim tlačnim člancima.

U ostalim pojedinostima proračun i pravila konstruiranja jednaki su onima što vrijede za armirani beton (v. *Armirani beton*, TE 1, str. 387).

Dimenzioniranje presjeka. Dva su postupka za dimenzioniranje presjeka nosača: prvi, za zadani poprečni presjek određuje se potrebna površina presjeka armature, odnosno kabela, i drugi, najprije se odredi presjek nosača a zatim potrebna armatura. Prvi postupak češće se primjenjuje, drugi je, naime, postupak složeniji jer presjeci nosača od prednapetog betona obično nisu jednostavni.

Za dimenzioniranje presjeka služe nejednadžbe (24) do (27). U tim se izrazima pojavljuju dvije nepoznanice: sila prednapinjanja P i udaljenost e_0 njezina hrvatišta od težišta presjeka, pa je dovoljno uzeti u obzir samo dvije od tih

nejednadžbi. Budući da je beton slab u preuzimanju vlačnih naprezanja, obično se proračun provodi pomoću nejednadžbi za vlačna naprezanja, što znači pomoću nejednadžbi (24) i (27). Ako se u te nejednadžbe uvrste vrijednosti iz (22) i (23) i prepostavi da su lijeve strane upravo jednake desnim, dobiva se za stanje prednapinjanja, prema (24),

$$\frac{P}{A_n} - \frac{Pe_0y_g}{I_n} + \frac{M_ky_g}{I_n} + \sigma_{vp} = 0, \quad (32)$$

a za stanje korištenja, prema (27),

$$\frac{\eta P}{A_n} + \frac{\eta Pe_0y_d}{I_n} - \frac{M_ky_d}{I_n} + \sigma_{vk} = 0. \quad (33)$$

Ako se jednadžba (32) pomnoži sa ηy_d , a (33) sa y_g , nakon zbrajanja tako pomnoženih jednadžbi dobiva se

$$P = \frac{\eta y_g(M_k - \eta M_p) - I_n(y_g\sigma_{vk} + \eta y_d\sigma_{vp})}{\eta i_n^2 d}, \quad (34)$$

gdje je i_n polumjer tromosti presjeka ($i_n^2 = I_n/A_n$), a $d = y_g + y_d$ visina presjeka. Ako se jednadžba (32) pomnoži sa $-\eta$, te ako se tako dobivena jednadžba zbroji s jednadžbom (33), dobiva se, nakon uvrštenja vrijednosti za P iz izraza (34),

$$e_0 = \frac{y_d M_k + \eta y_g M_p - I_n(\sigma_{vk} - \eta \sigma_{vp})}{y_g y_d (M_k - \eta M_p) - I_n(y_g \sigma_{vk} + \eta y_d \sigma_{vp})} i_n^2. \quad (35)$$

Da bi se izbjeglo određivanje e_0 prema izrazu (35), često se prepostavlja da e_0 ima najveću moguću vrijednost kojom je još osigurana potrebna debljina zaštitnog betonskog sloja ispod kabela, a koja iznosi

$$e_0 = y_d - a, \quad (36)$$

gdje je a razmak između težišta presjeka kabela i donjeg ruba presjeka. Ako se vrijednost za e_0 iz (36) uvrsti u (33), dobiva se

$$P' = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{y_d M_k - I_n \sigma_{vk}}{i_n^2 + y_d(y_d - a)}. \quad (37)$$

Tako određena sila, označena sa P' , usporeduje se s onom određenom izrazom (34). Ako je $P' > P$, znači da je raspon nosača veći od tzv. graničnog raspona. Uz taj raspon položaj se hvatišta sile prednapinjanja poklapa s najnižim mogućim položajem kojim se osigurava potrebna debljina zaštitnog sloja betona. Ako je pak $P' < P$, raspon je nosača manji od graničnoga, pa se vrijednost e_0 mora izračunati iz izraza (35).

Ako se usporede izrazi (34) i (37), zapazit će se osnovna razlika između raspona koji su manji, izraz (34), i onih koji su veći, izraz (37), od graničnoga. Kad su rasponi veći od graničnoga, sila prednapinjanja ovisi o ukupnom momentu savijanja, dok se za manje raspone taj moment umanjuje za iznos momenta od težine nosača, uzimajući u obzir smanjenje sile prednapinjanja zbog skupljanja i puštanja betona. Kad ne bi postojalo to smanjenje sile prednapinjanja, ne bi bio potreban dodatni izdatak za čelik da bi se preuzeo moment savijanja od težine nosača. Iz jednadžbi (34) i (37) vidi se utjecaj dopuštenog vlačnog naprezanja na smanjenje sile prednapinjanja.

Moguće je i drugičiji postupak. Tada se opet polazi od izraza (24) do (27), ali određuje se ovisnost recipročne vrijednosti od P ($1/P$) o e_0 , pa se iz spomenutih izraza dobiva za naprezanje na gornjem rubu tokom prednapinjanja

$$\frac{1}{P} \geq \frac{\frac{e_0}{j_{dn}} - 1}{A_n \left(\frac{M_p}{W_{gn}} + \sigma_{vp} \right)}, \quad (38)$$

za naprezanje na donjem rubu tokom prednapinjanja

$$\frac{1}{P} \geq \frac{\frac{e_0}{j_{gn}} + 1}{A_n \left(\frac{M_p}{W_{dn}} + \sigma_{vp} \right)}, \quad (39)$$

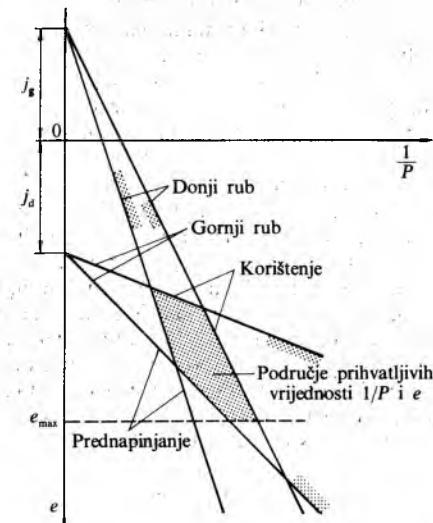
za naprezanje na gornjem rubu tokom upotrebe

$$\frac{1}{P} \leq \frac{\eta \left(\frac{e_0}{j_{gi}} - 1 \right)}{A_i \left(\frac{M_k}{W_{gi}} + \sigma_{ik} \right)}, \quad (40)$$

a za naprezanja na donjem rubu tokom upotrebe

$$\frac{1}{P} \leq \frac{\eta \left(\frac{e_0}{j_{gi}} + 1 \right)}{A_i \left(\frac{M_k}{W_{di}} + \sigma_{ik} \right)}. \quad (41)$$

Navedene su jednadžbe pravci u koordinatnom sustavu $1/P$, e_0 (sl. 26), pa područje omeđeno četirima pravcima označuje skup parova vrijednosti $1/P$ i e_0 kojima su zadovoljene jednadžbe (38) do (41). Osim toga, za raspone veće od graničnog pojavljuje se kao ograničenje i pravac $e_{max} = \text{const}$. koji je određen izrazom (36).



Sl. 26. Ovisnost položaja kabela o recipročnoj vrijednosti sile prednapinjanja za granična naprezanja na gornjem i donjem rubu presjeka nosača.

Pri određivanju presjeka nosača određuju se u prvom redu dimenzije donje pojasnice, jer su dimenzije ostalih dijelova nosača (visina, širina hrpta, širina i debljina gornje pojasnice) najčešće zadane. Visina nosača obično iznosi $1/25 \dots 1/15$ raspona. Širina je hrpta zadana potrebnom debljinom zaštitnog sloja betona uz kabele, dopustivim glavnim naprezanjima i mogućnošću dobrog betoniranja. Širina gornje pojasnice treba biti tolika da ne postoji opasnost izvijanja i da se mogu montirati potrebni elementi koji se oslanjaju na nosač, a debljina gornje pojasnice ovisna je o njezinoj širini, jer je prijeput pojasnice zapravo kratka konzola.

Pri dimenzioniranju donje pojasnice treba nastojati da se u oba stanja (prednapinjanje i korištenje) što bolje iskoriste dopustiva naprezanja.

Kako su naprezanja najveća uz rubove nosača gdje je i presjek širi, neće se mnogo pogriješiti ako se prepostavlja da se presjek nosača sastoji samo od gornje i donje pojasnice i da su njihova težišta razmaknuta toliko koliki je krak unutrašnjih sila, koji približno iznosi $z = 0,75d$, gdje je d visina nosača. Ukupna sila koju mora preuzeti donja pojasnica zbog prelaska od jednog na drugo granično opterećenje iznosi

$$P_d = \frac{M_k - \eta M_p}{0,75d}. \quad (42)$$

Toj je sili pridružena promjena naprezanja od tlačnoga $\eta \sigma_{tp}$ do vlačnoga σ_{vk} . Naprezanje u visini težišta donje pojasnice iznosi približno 90% naprezanja na rubu, pa je potrebna površina presjeka donje pojasnice

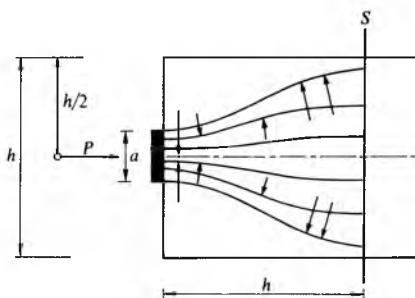
$$A_{dp} = \frac{M_k - \eta M_p}{0,75d} \cdot \frac{1}{0,9(\eta \sigma_{tp} + \sigma_{vk})}. \quad (43)$$

Treba spomenuti da se u izrazu (43) pojavljuju dvije nepoznacice, M_p i η , koje treba procijeniti prema iskustvu. Može se, međutim, dogoditi da se ustanovi tokom proračuna da je procjena bila pogrešna, pa proračun treba ponoviti.

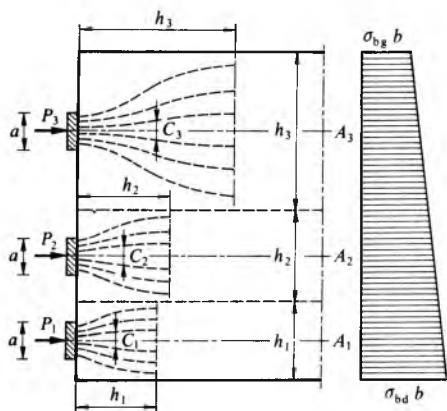
Područje sidrenja kabela. Kad se armatura napinje prije očvrsnuća betona, sila se napinjanja uvodi u nosač postupno po duljini sidrenja, a kad se napinje kabelima, sila je napinjanja koncentrirana na razmjerno malu površinu podložne pločice sidra. U oba slučaja normalna se naprezanja jednolikom raspodijele po presjeku nosača tek na udaljenosti od mesta uvođenja sile koja je približno jednaka visini nosača. Naprezanje se širi od mesta usidrenja na čitavu visinu nosača po dvostruko zakrivljenim trajektorijama (sl. 27) pa zbog toga nastaju poprečna naprezanja u području uvođenja sile. Neponosno ispod sidra djeluje tlak, a na udaljenijim mjestima vlak, što slijedi iz oblika trajektorija. Djelovanjem vlačnih naprezanja beton se raspucava, pa se te vlačne sile nazivaju silama cijepanja, koje mora preuzeti armatura. Postoji mnogo postupaka za određivanje tih sile, ali su oni i nedovoljno točni i zamršeni, pa se najčešće sila cijepanja određuje iz izraza

$$C = 0,3 P \left(1 - \frac{a}{h} \right), \quad (44)$$

gdje je P sila napinjanja, a visina podložne pločice, a h visina nosača (sl. 27).



Sl. 27. Rasprostiranje naprezanja u području sidrenja kabela



Sl. 28. Primjer rasporeda sidara za približno određivanje sila cijepanja pomoću ekvivalentnih prizma

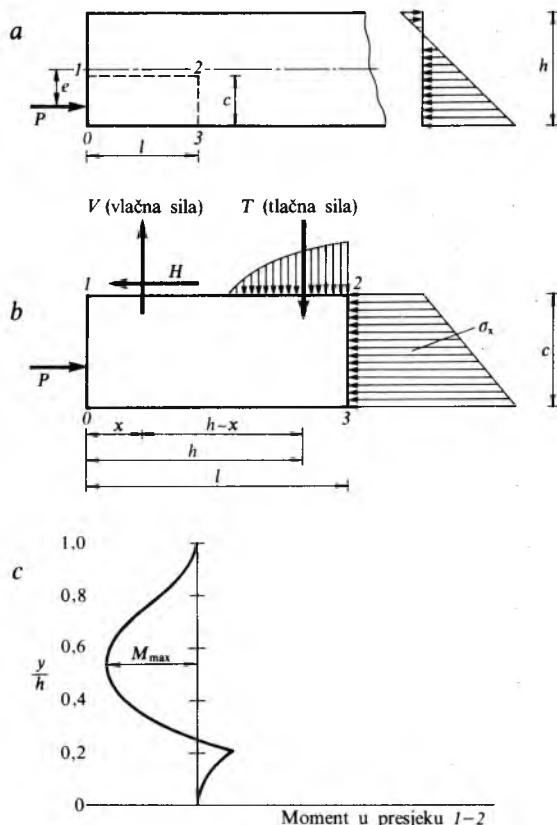
Obično su sidra kabela nesimetrično razmještena po čelu nosača (sl. 28), pa se ispod svakog sidra stvara tzv. ekvivalentna prizma. Tada se sile cijepanja u svakoj od ekvivalentnih prizama računaju iz izraza

$$C_i = 0,3 P_i \left(1 - \frac{a_i}{h_i} \right), \quad (45)$$

gdje je h_i visina ekvivalentne prizme, dok se indeks i odnosi na ekvivalentne prizme.

Kabeli su uz krajeve nosača obično nagnuti s obzirom na uzdužnu os. Taj je kut redovito malen (do 10°), pa ne utječe na naprezanje u području uvođenja sile.

Osim sila cijepanja koje djeluju u dvama okomitim smjerovima, po visini i po širini nosača, u području uvođenja sile djeluju i vlačne sile koje proizlaze iz uvjeta ravnoteže momenata unutrašnjih i vanjskih sile (sl. 29). Jedan par čine sile u kabelu umanjena za posmičnu silu uzduž vodoravnog ruba promatrane prizme i rezultanta tlačnih naprezanja na okomitoj pobočki prizme, a drugi vlačna sila u armaturi u blizini čela nosača i tlačna sila na udaljenosti približno jednakoj visini nosača, računajući od čela nosača. Za dimenzioniranje poprečne armature mjerodavna je najveća vlačna sila. Ona se nalazi na onoj visini, računajući od donjeg ruba nosača, gdje je moment od vodoravnih sile najveći. Vlačna sila jednaka je najvećem momentu podijeljenu s krakom $h - x$ (sl. 29), a potrebna površina presjeka armature određena je kvocijentom te sile i dopuštenog naprezanja. Tako se dimenzionira i armatura potrebna da izdrži silu cijepanja.



Sl. 29. Naprezanja na kraju prednapetog nosača. a) položaj ekvivalentne prizme, b) sila na prizmu, c) ovisnost momenta savijanja u vodoravnom presjeku o položaju presjeka po visini nosača; T tlačna sila, V vlačna sila, σ_s naprezanje, H posmična sila

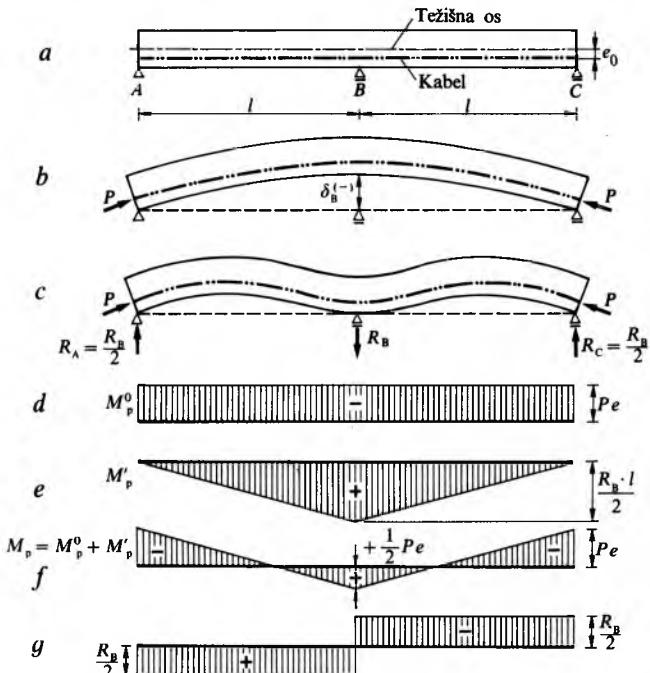
Treba odabrati šipke što manjeg promjera (manji od 12 mm), kako pukotine ne bi bile šire nego što je dopušteno (0,25 mm). Ako se pukotine pojave tokom prednapinjanja, one se neće dalje širiti, jer se sila prednapinjanja s vremenom smanjuje, a opterećenje vanjskim silama ne povećava naprezanja na mjestu usidrenja.

U nosaču kojemu je armatura napeta prije očvrsnuća betona te su vlačne sile manje, ali se one ne mogu zanemariti. Rasporedom spletova struna, kojim se postiže jednolika raspodjela naprezanja po presjeku, te se sile mogu osjetno smanjiti.

Statički neodređeni nosači imaju sljedeće prednosti prema statički određenim nosačima: a) manji momenti savijanja uz jednak raspon i uz jednak opterećenja, b) manji progibi uz jednaku krutost i c) veću sigurnost u graničnom stanju nosivosti. To vrijedi za sve vrste nosača, a prednapeti statički

neodređeni nosači imaju još i dodatnu prednost, jer je potrebno manje sidara i manje rada za prednapinjanje. Statički neodređeni nosači imaju nedostatak da su vrlo osjetljivi na prudne deformacije, npr. zbog popuštanja ležajeva.

Treba, međutim, paziti na to da se mogu prednapeti samo oni nosači koji se mogu nesmetano skraćivati.



Sl. 30. Progibi, momenti savijanja i poprečne sile statički neodređenog prednapetog nosača. a) nenapeti nosač, b) napeti nosač bez srednjeg ležaja, c) napeti nosač sa srednjim ležajem, d) momenti od prednapinjanja, e) momenti djelovanjem srednjeg ležaja, f) ukupni momenti, g) poprečne sile

U prednapetim betonskim nosačima pojavljuju se dodatne rezne sile. Statički određeni nosač, naime, slobodno se izobličuje djelovanjem momenata sile prednapinjanja, dok statički neodređeni nosač ima tzv. prekobrojne veze koje sprečavaju slobodno izobličenje (sl. 30). Na mjestu tih veza moraju se pojavit reakcije koje zajedno s reakcijama u krajnjim ležajevima tvore sustav sila u ravnoteži. Djelovanjem tih reakcija nastaju statički neodređeni momenti savijanja raspodijeljeni uzduž raspona. To se može pokazati na primjeru grede s dva jednaka polja koja je prednapeta kabelom udaljenim e_0 od težišta nosača (sl. 30). Zbog sile prednapinjanja nastaje moment savijanja koji je nepromjenljiv uzduž raspona. Kad ne bi bilo srednjeg ležaja B, nosač bi se savio prema gore. Budući da se nosač, zbog postojanja srednjeg ležaja, ne može uzdići, na tom će mjestu djelovati prema dolje reakcija R_B . Da bi greda bila u ravnoteži, moraju na krajnje ležajeve A i C djelovati suprotno usmjerene, međusobno jednakne, reakcije R_A i R_C . Momenti (M_x) koji nastaju djelovanjem reakcija zbrajam se algebarski s momentima od sile prednapinjanja, pa je moment u točki x

$$M_{px} = Pe_0 + M_x, \quad (46)$$

odakle je efektivna ekscentričnost sile u statički neodređenu nosaču

$$e_n = e_0 + \frac{M_x}{P}. \quad (47)$$

Za proračun prednapetih statički neodređenih nosača mogu se primijeniti svi postupci kojima se proračunavaju statički neodređeni nosači (v. Nauka o čvrstoći, TE 9, str. 319). Ipak je za niže stupnjeve statičke neodređenosti najprikladnija metoda zakretnih kutova, koja će se prikazati na primjeru grede sa dvama poljima koja je prednapeta paraboličkim kabelom (sl. 31). Radi jednostavnosti, zaoblje-

nje kabela nad srednjim ležajem zamjenjuje se lomom. Moment od statičke neodređenosti određuje se iz uvjeta da je zbroj kutova zbog prednapinjanja nad srednjim ležajem jednak nuli. Zakretni kutovi zbog pojedinačnih utjecaja iznose

$$\zeta_1 = \frac{Pfl}{3EI}, \quad (48)$$

$$\zeta_2 = \frac{Pe_0 l}{3EI}, \quad (49)$$

$$\zeta' = \frac{Ml}{3EI}, \quad (50)$$

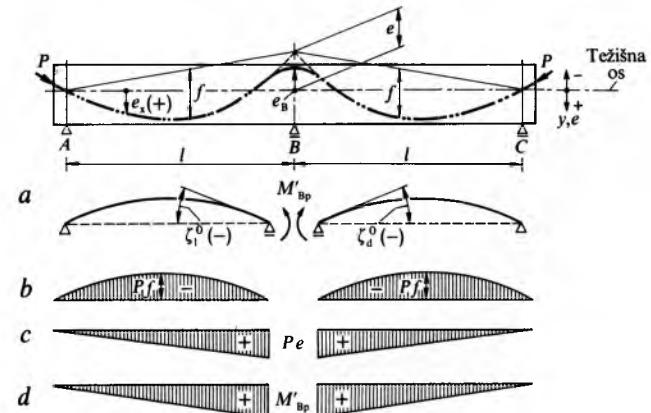
gdje je P sila prednapinjanja, f strelica parabole kabela, l raspon polja, E modul elastičnosti, I moment tromosti, e_0 razmak ležišta kabela od težišta nosača, a M moment statičke neodređenosti. Iz uvjeta

$$2(-\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta') = 0 \quad (51)$$

slijedi da je

$$M = P(f - e_0). \quad (52)$$

Ako je $f = e_0$, moment statičke neodređenosti postaje jednak nuli, pa se takav kabel naziva konkordantnim kabelom. U početku razvoja teorije prednapetog betona pridavala se velika važnost konkordantnosti kabela, ali se poslije pokazalo da nastojanje da se postigne konkordantnost traži veći utrošak čelika i da daje manju sigurnost u graničnom stanju nosivosti.



Sl. 31. Primjer za određivanje momenta od statičke neodređenosti metodom zakretnih kutova. a) zakretni kutovi grede razrezane nad ležajem B, b i c momenti savijanja od sile prednapinjanja na razrezanoj gredi, d) prekobrojni moment na ležaju B

Ukupni moment nad ležajem od prednapinjanja dobiva se iz izraza (46) ako se za M_x uvrsti vrijednost iz (52), pa je

$$M_p = Pe_0 + Pf - Pe_0 = Pf, \quad (53)$$

što znači da moment savijanja nad ležajem ovisi samo o strelici parabole uz zadanu silu prednapinjanja. Prema tome, paraboličan kabel zadane strelice može se po volji pomicati gore-dolje, uz uvjet da os kabela prolazi težištem presjeka nad krajnjim ležajevima. Taj pomak ne utječe na učinak prednapinjanja. To se naziva linearnom transformacijom. Najmanji utrošak čelika i najveća granična nosivost postiže se kad e_0 nad ležajem i strelica parabole f imaju najveće moguće vrijednosti.

Za proračun višestruko statički neodređenih nosača veoma je pogodna metoda skretnih sila ili ekvivalentnih poprečnih opterećenja. Ako je, npr., kabel paraboličan, razmak e_0 mijenja se uzduž raspona po paraboličkom zakonu, pa ako se računa da je sila prednapinjanja konstantna uzduž raspona, mijenjat će se i moment savijanja od prednapinjanja također po paraboličkom zakonu. Opterećenje s po jedinici duljine, koje uzrokuje takvu raspodjelu momenata savijanja, jednolik je raspoređeno uzduž raspona. Vrijednost toga opterećenja (jednoliko raspoređenih skretnih sila) može se odrediti iz jednakosti momenata savijanja koja je prikazana

izrazom

$$\frac{sl^2}{8} = Pe_0 \quad (54)$$

pa je

$$s = \frac{8Pe_0}{l^2}. \quad (55)$$

Ako se postavi da je $e_0 = f$, što vrijedi za $M = 0$, dobiva se

$$s = \frac{8Pf}{l^2}, \quad (56)$$

pa moment nad ležajem jednoliko opterećene grede na dvama ležajevima iznosi

$$M_B = \frac{sl^2}{8} = Pf. \quad (57)$$

Prema tome, metodom skretnih sila dobiva se neposredno ukupni moment od prednapinjanja.

Ža proračun momenata savijanja od pokretnog opterećenja često se upotrebljavaju utjecajne linije. One se mogu upotrijebiti i za proračun momenata savijanja koji se pojavljuju zbog prednapinjanja.

Ako se pretpostavi da je greda na sl. 31 opterećena jednoliko raspoređenim opterećenjem koje se postepeno povećava, uz opterećenje veće od uporabnoga, u ležajevima će biti dostignuta granična nosivost presjeka. S povećanjem se opterećenja, međutim, ne mijenja moment savijanja u ležajnom presjeku, ali se povećavaju deformacije, pa se gornji rub razvlači, a donji stlačuje, te se zbog toga susjedni presjeci desno i lijevo od ležajnog presjeka zakreću. Tada ležajni presjek počinje djelovati kao plastični zgrob koji prenosi najveći mogući moment savijanja, dok obični zgrob ne može prenositi nikakav moment. Pojava plastičnog zgoba pretvara kontinuiranu gredu u dvije slobodno položene grede, odnosno općenito snizuje neodređenost za jedan stupanj. Opterećenje može dalje rasti sve dok se u najviše napregnutom presjeku (u simetričnoj gredi postojat će dva takva presjeka) ne pojavi novi plastični zgrob zbog čega nosač gubi stabilnost.

Prema dosada prikazanom ne postoji principijelna razlika između armiranog i prednapete grede. Treba, međutim, znati da u prednapetoj gredi, kad je beton dosta raspucan, potpuno iščezavaju momenti zbog statičke neodređenosti.

Djelomično prednapinjanje. U početku upotrebe prednapetog betona smatralo se da svakako treba sprječiti raspucavanje betona kako bi se postigla veća trajnost konstrukcije. Zbog toga se nisu dopuštala vlačna naprezanja ni pri punom opterećenju (tzv. potpuno prednapinjanje).

Poslije se uvidjelo da se s dopuštenim malim vlačnim naprezanjima, približno do polovice tlačne čvrstoće betona, postižu ekonomičnije konstrukcije a da se ne smanjuje njihova sigurnost. Zapaženo je, naime, da potpuno prednapete konstrukcije imaju nedostataka i to: a) pojava velikih progiba prema gore zbog puzanja betona, jer su se prednapinjanjem eliminirala i ona vlačna naprezanja koja se vrlo rijetko ili nikada ne pojavljuju, b) nepotrebno veliki utrošak čelika za prednapinjanje i c) pojava rijetkih ali širokih pukotina zbog nepredviđenih vlačnih naprezanja (skupljanje betona, promjena temperature, pojava preopterećenja). Osim toga, uvidjelo se da su za trajnost konstrukcije mjerodavne prilike pri dugotrajnim opterećenjima i da nisu štetne pukotine koje se otvaraju pri promjenljivim opterećenjima.

Sve je to uvjetovalo primjenu djelomičnog prednapinjanja, što znači da se dopuštaju ne samo vlačna naprezanja veća od dopustivih nego i pojava pukotina. Djelomično prednapinjanje najprije je dopušteno švicarskim propisima (1968). Iskustva su povoljna, pa se djelomično prednapinjanje uvođi i u propise drugih zemalja.

Postoji više prijedloga za definiciju stupnja prednapinjanja. Od dosadašnjih prijedloga, najprihvatljiviji je Bachmannov prijedlog (H. Bachmann), prema kojemu se stupanj prednapinjanja definira kao omjer momenta dekompresije

M_D , tj. dijela ukupnog momenta savijanja koji je potreban da bi se poništalo tlačno naprezanje od prednapinjanja, i ukupnog momenta savijanja M_k , pa je stupanj prednapinjanja određen izrazom

$$k = \frac{M_D}{M_k}. \quad (58)$$

Radi se o prijelazu od armiranih ($k = 0$) na potpuno prednapete ($k = 1$) konstrukcije.

Za sada se radi tako da se kabeli dimenzioniraju prema momentu M_D , a nenačeta armatura prema graničnoj nosivosti, što znači da nenačeta armatura zajedno s kabelima mora preuzeti ukupnu vlačnu silu kad je dosegnuta granica nosivosti. Pri tom mora udio površine nenačete armature u površini presjeka betona ispod neutralne osi iznositi: 0,3...0,4% za savijanje i 0,6...0,8% za tzv. čisti vlak. Niži postoci vrijede za slabiji (marka betona 30), a viši za jači beton (marka betona 60).

Prednosti su djelomično prednapetog betona u većoj krutosti konstrukcije kad je beton raspucan, u povoljnijem rasporedu pukotina s obzirom na pogibelj od korozije, u manjim progibima pod dugotrajinim opterećenjem i manjem utrošku čelika. Visoki stupnjevi prednapinjanja primjenjuju se samo za velike raspone i tamo gdje postoji opasnost od zamora čelika zbog učestaloga promjenljivog opterećenja (željeznički mostovi, kranske staze).

Prednapinjanje bez prianjanja, s kabelima u betonskom presjeku. Prilikom uštrcavanja cementne kaše, da bi se ostvarilo prianjanje između čelika i betona, pojavljuju se teškoće, a postupak je i dosta skup. Osim toga, ni pouzdanost veze između betona i čelika, a niti pouzdanost zaštite čelika od korozije nije uvijek zajamčena i veoma se teško provjera. Zbog toga se prednapeta sidra u tlu i stijeni zaštuju polietilenским cijevima u kojima je prostor između cijevi i žica ispunjen mašču ili uljem. Iskustva su s takvom zaštitom kabela vrlo dobra, pa se, osobito u SAD, već dvadeset godina primjenjuju u zgradarstvu.

Dugo se, međutim, zaziralo od primjene takve zaštite kabela, jer su bile poznate prednosti prianjanja između čelika i betona. Bez prianjanja pojavljuje se pod većim opterećenjem malo jako rastvorenih pukotina, pa je nosivost manja i do 20% u usporedbi s konstrukcijama s prianjanjem. Dakle, za konstrukcije u kojima nema prianjanja čelika i betona, uz jednaku graničnu nosivost, potrebno je više čelika.

Prednapinjanje bez prianjanja, međutim, ima i prednosti: pouzdanija je zaštita od korozije, pa su mogući tanji zaštitni slojevi betona, što povećava učinak čelika; gubici su zbog trenja manji, što također doprinosi manjem utrošku čelika. Osim toga, istodobnim djelomičnim prednapinjanjem ublažuje se, pa i potpuno uklanja, jako rastvaranje pukotina, što je glavni nedostatak prednapinjanja bez prianjanja, pa je taj postupak u nekim područjima primjene u prednosti pred prednapinjanjem s prianjanjem.

Proračun, dakako, treba prilagoditi izmijenjenim uvjetima. Čelik se u cijevi ispunjenoj mašču ili uljem produljuje po cijeloj duljini, pa se granična nosivost ne može odrediti promatranjem samo jednog presjeka, nego se mora promatrati nosač kao cjelina. Za proračun djelovanja poprečne sile ne može se primijeniti model rešetke, nego model luka sa zategom koja ne mora biti pravocrtna. Najmanja površina presjeka nenačete armature određuje se kao za djelomično prednapete nosače, ali treba posebno paziti na promjer i raspored šipaka da bi se ograničile širine pukotina.

Najčešće se upotrebljavaju kabeli presjeka 100 i 140 mm². Prednapinjanje bez prianjanja najčešće se primjenjuje u zgradarstvu kad su potrebne ploče većih raspona (uobičajena je vitkost 1/40, a za gljivaste ploče 1/60). Takvo se prednapinjanje sve više primjenjuje za poprečno napinjanje kolničkih ploča na mostovima, jer se ne treba bojati agresivnog djelovanja soli za otapanje leda zbog pouzdanosti zaštite od korozije. Također se tako grade podne ploče u industrijskim halama, aerodromske piste i piste na klizalištima.

Prednapinjanje bez prianjanja, s kabelima izvan betonskog presjeka. Taj je postupak prednapinjanja jedan od najstarijih. Prvi mostovi od prednapetog betona izgrađeni su u Njemačkoj (F. Dischinger, 1928. i 1936, raspon 68 i 69 m). U Francuskoj su takvim postupkom izgrađena četiri mosta usprkos snažnu utjecaju Freyssineta koji je priznavao samo kable s ostvarenom vezom s betonom. Taj je postupak sredinom sedamdesetih godina primijenjen za ojačanje već izgrađenih mostova od prednapetog betona (potpuno prednapinjanje). Takvi se mostovi nisu, naime, ponašali u skladu s predviđanjima iz sljedećih razloga: *a)* gubici su sile prednapinjanja bili veći, pa su unesene sile bile manje od predviđenih, *b)* smanjenje sila zbog skupljanja i puzanja betona bilo je veće od očekivanog, *c)* naprezanja su bila veća od dopuštenih i *d)* ugrađeni beton bio je slabije kakvoće od one predviđene projektom. Zbog toga su se na mnogim takvim mostovima pojavile vidljive pukotine (potencijalna mjesta pojačane korozije) uz prevelike progibe. Rješenje je nađeno u tzv. vanjskom prednapinjanju, tj. postavljanjem kabela izvan betonskog presjeka, obično s unutrašnje strane hrptova sanduka, odnosno rebara mosta s otvorenim poprečnim presjekom.

Za razliku od kabela koji se postavljaju unutar presjeka, takvi su kabeli pravocrtni, pa se na mjestima promjene smjera moraju predvidjeti izbočine ili poprečni okviri. Zaštitne cijevi ne mogu biti od rebrastog lima, jer bi se rasprse pri uštrcavanju zaštitne masti ili cementne kaše, već se moraju upotrijebiti čelične bešavne cijevi ili cijevi od polietilena velike gustoće. Te se cijevi nastavljaju zavarivanjem. Pri projektiranju pojedinosti (sidrenje, skretanje kabela) mora se osigurati mogućnost zamjene kabela ako bi se on tijekom upotrebe oštetio.

Taj postupak ima sljedeće prednosti: *a)* manji su gubici sile zbog trenja, jer se pojavljuju gubici samo zbog promjene smjera, *b)* potrebne su manje širine hrptova sanduka rasponskog sklopa, pa je masa sklopa manja, *c)* betoniranje se odvija u povoljnijim uvjetima, pa je kakvoća betona redovito bolja, *d)* kraće je trajanje građenja, *e)* lakše se uštrcava zaštitna mast, odnosno cementna kaša i *f)* oštećeni i zardali kabeli mogu se zamijeniti. Nedostaci toga postupka jesu: *a)* budući da su kabeli smješteni u šupljinu sanduka, imaju manju ekscentričnost, odnosno krak unutrašnjih sila kad je dosegнутa granična nosivost, pa je zbog toga nešto veći utrošak čelika i *b)* nosivost je nosača manja nego onih u kojima je ostvarena veza između betona i čelika.

Taj je postupak prikladan za građenje mostova postupnim napredovanjem polje po polje, pa ga francuski inženjeri od kraja sedamdesetih godina sve više primjenjuju za gradnju mostova srednjih raspona (50–100 m).

LIT.: Y. Guyon, Béton précontraint II. Editions Eyrolles, Paris 1963. – S. Kaufman, W. Olszak, Cz. Eimer, Konstrukcje sprezone. Arkady, Warszawa 1965. – F. Leonhardt, Prednapregnuti beton u praksi. Građevinska knjiga, Beograd 1968. – E. Bölskei, G. Tassi, Feszlett tartók. Tankönyvkiadó, Budapest 1972. – A. Mehmel, Vorgespannter Beton. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1973. – V. Kos, Prednapregnuti beton. Viša tehnička građevinska škola, Društvo građevinskih inženjera i tehničara, Zagreb 1974. – D. Jevtić, Prednapregnuti beton. Građevinska knjiga, Beograd 1974. – G. S. Ramaswamy, Modern Prestressed Concrete Design. Pitman Publishing, London 1976. – A. H. Nilson, Design of Prestressed Concrete. John Wiley and Sons, New York 1978. – E. Hampe, Spannbeton, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1980. – F. Leonhardt, Vorlesungen über Massivbau, fünfter Teil: Spannbeton. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1980. – R. Lacroix, A. Fuentes, Le projet de béton précontraint. Editions Eyrolles, Paris 1981.

Z. Marić

PREHRAMBENA TEHNOLOGIJA, prema definiciji IFT (Institute of Food Technologists, 1964), primjena je znanosti i inženjerstva u proizvodnji, preradbi, pakiranju, distribuciji, pripremanju i upotrebi hrane.

Sve je donedavno područje prehrambene tehnologije bilo podijeljeno prema sirovinama ili proizvodima preradbe, pa se

npr. govorilo o tehnologiji mlijeka, tehnologiji masti i ulja (v. *Masti i ulja*, TE 7, str. 665), tehnologiji šećera (v. *Šećer*). Danas se, međutim, prehrambena tehnologija promatra kao cjelina u procesnoj tehnici (v. *Procesna tehnika*), jer se uvidjelo da jedinične operacije i jedinični procesi čine zajedničku osnovu procesa i u prehrambenoj tehnologiji i u ostaloj procesnoj tehnici. To je omogućilo ubrzani razvoj prehrambene tehnologije u cjelini i njenih specifičnih područja.

Kao i opći razvoj tehnologije, i razvoj prehrambene tehnologije ovisi i o društvenim promjenama. Te su promjene snažno utjecale na razvoj proizvodnje polupripremljene i pripremljene, tzv. *gotove hrane*, tj. kompleksne hrane koja sadrži komponente i biljnog i životinjskog porijekla.

GLAVNE KARAKTERISTIKE PROCESA PREHRAMBENE INDUSTRije

Osnovne odlike prehrambene industrije, koje čine njene procese specifičnim područjem procesne tehnike, u prvom redu njena uska povezanost s poljoprivredom te s čuvanjem sirovina, materijala u preradbi i proizvoda od kvarenja. Pri tom su vrlo važni konzerviranje i sanitacija. Zbog toga su jedinični procesi i operacije konzerviranja hrane (v. *Konzerviranje hrane*, TE 7, str. 268) bitni dijelovi mnogobrojnih procesa prehrambene industrije.

Dalje se specifičnosti procesa prehrambene industrije pojavljuju u vođenju procesa i kontroli kvalitete sirovina i proizvoda.

Vodenje procesa prehrambene industrije. U industrijskoj se proizvodnji hrane uz ostalo traži djelotvornost procesiranja i ujednačenost kvalitete proizvoda. Ti se zahtjevi vrlo teško mogu zadovoljiti bez automatskog vodenja, pa se sve ključne faze procesa prehrambene industrije moraju tako voditi. Automatskim vodenjem procesa moguće je uskladiti mnogo-brojne procesne varijable, što je osobito važno za kontinuirane procese prehrambene industrije.

Kontrola kvalitete u prehrambenoj industriji. Kao općenito u procesnoj industriji tako i za dobivanje kvalitetnih proizvoda prehrambene industrije u prvom redu potrebne kvalitetne sirovine i pomoćni materijali. Međutim, specifičnost je prehrambene industrije u tome što njeni proizvodi moraju imati ne samo prikladna fizikalna i kemijska nego i biološka svojstva, a, osim toga, moraju zadovoljiti i organoleptičke zahtjeve potrošača. Za zadovoljenje tih zahtjeva potrebne su u toku vođenja procesa, uz temeljitu kontrolu kvalitete sirovina, pomoćnih materijala i proizvoda fizikalnim, kemijskim i biološkim metodama, pouzdane organoleptičke ocjene. Za to postoje posebne metode i senzorski testovi.

Kontrola kvalitete u prehrambenoj industriji provodi se statističkim metodama. Da bi se konačno postigla potrebna kvaliteta poluproizvoda ili proizvoda, korigira se režim vođenja procesa ili režim vođenja pojedinih njegovih dijelova.

Sanitacija u prehrambenoj industriji. Pod sanitacijom u prehrambenoj industriji razumijeva se skup postupaka koji su, uz konzerviranje, još potrebni da bi se spriječilo ili barem ograničilo kvarenje i kontaminacija sirovina i proizvoda uz održavanje optimalnih radnih uvjeta. Za programiranje i vođenje sanitacije potrebno je dobro poznavati potencijalne izvore onečišćivanja.

Važan je činilac sanitacije sanitarno održavanje postrojenja i zgrade u kojoj je ono smješteno. Već se pri projektiranju i građenju postrojenja i zgrada za prehrambenu industriju moraju uzeti u obzir uvjeti sanitacije da bi se ona mogla što jednostavnije i djelotvornije provoditi. Za tu je svrhu izrađen sustav CIP (od engleskog *clean in place*, čisto na pravom mjestu), koji omogućuje djelotvornije čišćenje opreme i instalacija i smanjuje opasnost od kontaminacije.

Sanitacija u postrojenjima prehrambene industrije obuhvaća i susbijanje glodara, kukaca i mikroorganizama. Da bi se to postiglo, potrebno je poznavati uvjete njihove aktivnosti, što se provjerava i u laboratorijskim testovima.

Veze prehrambene industrije s poljoprivredom od recipročne su važnosti za obje te djelatnosti i očituju se u