

vrelište $\sim 4400^\circ\text{C}$. Na nižoj je temperaturi izolator, a na višim se temperaturama, već prema parcijalnom tlaku kisika, ponaša kao poluvodič. Jedan je od kemijski najstabilnijih oksida, baznog je karaktera, netopljiv u vodi, kiselinama i alkalijama, ali se otapa u umjereno koncentriranoj solnoj ili dušičnoj kiselini uz dodatak fluoridne ili heksafluorosilikatne kiseline, te u vrućoj koncentriranoj sumpornoj i vrućoj fluoridnoj kiselini. Dobiva se žarenjem torijeva oksalata, nitrata ili hidratiranog oksida kao fini, bijeli prah, kojemu prividna gustoća i veličina zrna ovise o načinu pripreme. Njegovim prevodenjem iz dispergirano hidrosola prvo u sol, a zatim u gel, dobiva se torijev(IV) oksid kontrolirane gustoće te veličine i oblika zrna, koji se rabi u nuklearnoj tehnici. Iz otopine torijevih soli taloži se amonijakom ili natrijevim hidroksidom hidratirani oksid $\text{ThO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Torijev(IV) oksid rabi se u smjesi s uranovim oksidom kao oplodni materijal za nuklearne reaktore (v. *Nuklearno gorivo*, TE 9, str. 528). Osim toga služi i kao vatrostalni i keramički materijal pri taljenju kovina s visokim talištem, u smjesi sa cirkonijevim oksidom kao obloga pri vakuumskom taljenju, ali mu je primjena ograničena zbog slabe toplinske provodnosti i slabe otpornosti prema naglim temperaturnim promjenama. Rabi se i kao katalizator u proizvodnji sumporne i dušične kiseline, Fischer-Tropschovoj sintezi, u petrokemiji te u polimerizacijskim i mnogim drugim organskim reakcijama. Primjenjuje se kao elektroodni materijal za magnetrone i kao dodatak volframu u izvorima primarne elektronske emisije. Stakla koja sadrže torijev oksid služe za izradbu najkvalitetnijih leća za kamere i znanstvene instrumente. Rabi se i u medicini pri dijagnostici i terapiji zračenjem, ali je zbog toksičnog i kancerogenog djelovanja uklonjen iz uporabe.

Torijev karbid, ThC_2 , monoklinske je kristalne strukture, gustoće $8,96\text{ g/cm}^3$, tališta pri 2650°C , brzo se razgrađuje s vodom, zagrijavanjem na zraku prelazi u torijev oksid, a dobiva se taljenjem praškastog torija i ugljika pri temperaturi višoj od 1300°C . Nastaje i kao intermedijer prilikom pripreme bezvodnih torijevih soli. U smjesi s uranovim karbidom rabi se kao oplodni materijal za visokotemperaturne nuklearne reaktore.

Torijev(IV) nitrat, $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$, različitog stupnja hidratacije, vrlo je topljiv u vodi i polarnim otapalima, s nitratima alkalijskih, zemnoalkalijskih i drugih dvovalentnih kationa tvori mnoge dvosoli, a s amonijakom i organskim bazama adicijske spojeve. Torijev(IV) nitrat tetrahidrat najkomercijalniji je torijev spoj. Dobiva se kao granulat tijekom kemijske obradbe monacitnog pijeska, a najviše se rabi pri proizvodnji Auerovih mrežica. Pamučno ili svileni tkanje namoči se u smjesu torijeva i cerijeva nitrata, osuši se i spali na plinskom plameniku, te pritom zaostaje kostur od 99% torijeva(IV) oksida i 1% cerijeva(IV) oksida. Izgaranjem rasvjetnog plina na mrežici isijava se jako blještava bijela svjetlost.

Torijev(IV) fluorid, ThF_4 , tališta pri 1100°C , gustoće $6,12\text{ g/cm}^3$, netopljiv je u kiselinama, slabo topljiv u vodi, topljiv u alkoholu. Kao bezvodan spoj dobiva se u obliku monoklinskih kristala reakcijom fluora ili suhog fluorovodika s bezvodnim torijevim tetrabromidom ili tetrakloridom, ili reakcijom torijeva oksida sa suhim fluorovodikom. Iz vodenih se otopina torijevih soli taloži fluoridnom kiselinom u obliku bijelih kristala torijeva tetrafluorida oktahidrata. Rabi se pri proizvodnji kovinskog torija, a dobiva se kao pogodan intermedijer za odvajanje torija pri kemijskoj obradbi monacita sumpornom kiselinom.

Torijev(IV) klorid, ThCl_4 , tetragonalne kristalne strukture, gustoće $4,59\text{ g/cm}^3$, tališta pri 765°C , vrelišta pri 922°C , sublimira u vakuumu pri 740°C , vrlo je higroskopan i topljiv u vodi i alkoholu. Osim alkalijskih dvosoli, tvori adicijske i kompleksne spojeve s amonijakom i mnogim organskim spojevima. Otapanjem hidratiranoga torijeva oksida u solnoj kiselini nastaju bijeli igličasti kristali torijeva(IV) klorida oktahidrata, a u bezvodnom se obliku pripravlja reakcijom fozgena ili ugljičnog(IV) klorida s torijevim(IV) oksidom na povišenoj temperaturi. Rabi se pri sintezi organokovinskih torijevih spojeva, a komercijalno pri dobivanju kovinskog torija.

Torijev(IV) jodid, ThI_4 , tališta pri 566°C , vrelišta pri 837°C , dobiva se izravnom reakcijom elemenata. Bezvodni se oblik pod utjecajem svjetlosti ili zagrijavanjem brzo raspada. Njegovom se termičkom razgradnjom dobiva najčistiji kovinski torij.

Važni su intermedijerni spojevi pri odvajanju torija iz monacitnog koncentrata *torijev(IV) sulfat, oksalat, pirofosfat, karbonat i*

jodat. Slabo su topljivi, hidratirani, a s alkalijskim solima, neki i s amonijevim, tvore dvosoli.

Pri ekstrakciji i ionskoj izmjeni tehnički su važni i *torijevi kompleksi s alkil-aminima i aril-aminima, fosfatima, te kelatnim i drugim organskim spojevima*.

LIT.: F. L. Cuthbert, Thorium Production Technology. Addison-Wesley Publishing Company, Reading 1958. – H. A. Wilhelm, Thorium, u djelu: Rare Metals Handbook (Ed. C. F. Hampel). Reinhold Publishing Corp. Chapman & Hall, London 1961. – R. G. Bellamy, N. A. Hill, Extraction and Metallurgy of Uranium, Thorium and Beryllium. Pergamon Press, London 1963. – N. N. Greenwood, A. Earnshaw, The Actinide Elements; u djelu: Chemistry of the Elements. Pergamon Press, Oxford 1986. – The Science and Engineering of Materials (Ed. J. Randall, M. Denton). Van Nostrand Reinhold Co., Hong Kong 1988. – CRC Handbook of Chemistry and Physics (Ed. R. C. Weast). CRC Press, Boca Raton 1988. – I. Filipović, S. Lipanović, Opća i anorganska kemija. Školska knjiga, Zagreb 1991.

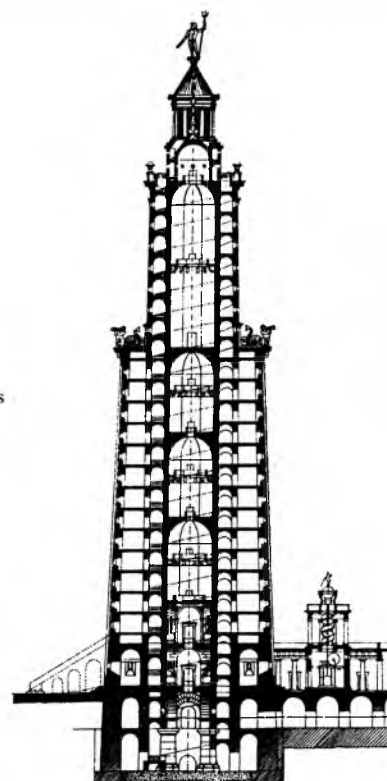
B. Borovnjak-Zlatarić

TORNJEVI I TORANJSKE ZGRADE, građevine, najčešće kompaktna (kružnoga ili pravokutnoga) horizontalnog presjeka, kojima je visina mnogo veća od promjera ili stranica tlocrta. U novije doba to su inženjerske konstrukcije koje se grade na osnovi suvremenih znanstvenih spoznaja i ekonomskih analiza. Zbog svoje uočljivosti u prostoru tornjevi moraju zadovoljiti i estetske zahtjeve, pa je u njihovu projektiranju od samog početka potrebna suradnja konstruktora i arhitekata. Osobito vitki tornjevi, obično filigranske prostorne čelične rešetke koje nose telekomunikacijske uređaje ili visokonaponske vodove, nazivaju se i *jarbolima*.

Posebna su vrsta tornjeva *toranjske zgrade*. Visokom se smatra ona zgrada za koju su bočni utjecaji (vjetar, potres) dominantan faktor u projektiranju. Toranjska zgrada posebno je visoka zgrada (neboder). U usporedbi s tornjevima, toranjske zgrade imaju mnogo veći obujam. One se grade zbog pomanjkanja zemljišta i njegove visoke cijene u velikim gradovima, ali i zbog težnje za urbanim simbolom i prestižom. Toranjska je zgrada često jedino prihvatljivo rješenje prostornih i ekoloških problema.

Babilonska kula, prema Bibliji, »stři do neba« i obično se smatra tornjem, ali ne zadovoljava definiciju tornja. Najstariji poznati toranj jest svjetionik *Faros* na istoimenom otoku ispred Aleksandrije, visok 135 m (sl. 1). Projektant i graditelj

Sl. 1. Svjetionik Faros



bio je Sostratos iz Knidos, a sagrađen je od kamena u ←III. st. Kameni su spajani rastaljenim olovom, pa su spojnice bile tako čvrste i nepropusne da je toranj kao monolit više od tisućljeća odolijevao udarima mora. Imao je mnogo prostorija povezanih rampama i stubama, te zvjezdarnicu. Toranj je 15 stoljeća bio najviša građevina na svijetu, dok ga u XIII st. nije srušio potres. Smatrao se jednim od sedam svjetskih čuda te obilježjem helenističke moći.

Tornjevi su se često gradili kao zvonici uz sakralne objekte. Jednim od najljepših zvonika Italije i jednom od većih turističkih atrakcija Europe smatra se Bomanov *Kosi toranj u Pisi*. To je mramorna građevina kružnog tlocrta, a sastoji se od jezgre, koju čini šuplji valjak vanjskog promjera 15,5 m i debljine zida 3,90 m na donjem, a 2,50 m na gornjem kraju, zatim od prstenastih hodnika oko jezgre i kolonade vitkih kružnih stupova koji podupiru hodnike uzduž njihova vanjskog ruba. Na vrhu se nalazi prostorija za zvona. Šesterokutni je toranj visok 55 m, a građen je od 1173. do 1350. godine. Zbog nejednoličnog slijeganja glinovita tla toranj se tijekom vremena sve više naginje, pa sada bočni pomak vrha tornja iznosi ~5 m.

Pojam nebodera star je više od stotinu godina. Vertikalna nosiva konstrukcija prvih nebodera sastojala se od vanjskih i unutrašnjih zidova od opeke. Kako je zbog razmjerno malene tlačne čvrstoće opeke debljina zidova bila velika, ostalo je malo korisne tlocrtno površine, a otvori za prozore i vrata bili su maleni. Zidovi najviše zgrade tog vremena, 17-katnog Monadnock Buildinga u Chicagu, bili su u prizemlju debeli 1,83 m. Prvim pravim neboderom smatra se Home Insurance Building u Chicagu, kojemu je gradnja počela 1883; nosiva mu je konstrukcija čelični skelet, koji nosi stropove, pregrade zidove i tzv. zavjesu koja bočno zatvara zgradu. Skeletni sustav građenja najvažniji je tehnički napredak još od vremena gotičke arhitekture. Zgrada ima dizala, protupožarnu zaštitu, grijanje i ostale instalacije. Dalji je napredak postignut primjenom kvalitetnijeg čelika. Čelični stupovi mogli su biti vitkiji, konstrukcija lakša i jeftinija, korisna površina zgrade i fleksibilnost u upotrebi prostora veća, a pročelja gotovo potpuno staklena.

Za svjetsku izložbu u Parizu 1889. godine A. G. Eiffel je sagrađio 312 m visok toranj, čeličnu prostornu rešetku tešku 7300 tona koja počiva na četiri stupa sandučasta presjeka i navise se znatno suzuje. Štapovi su konstrukcije spojeni s 2,5 milijuna zakovica. Toranj je trebao demonstrirati mogućnost i važnost čelika kao građevnog materijala. Iako oštro kritiziran, danas se *Eiffelov toranj* smatra važnim obilježjem Pariza.

Godine 1896. V. Šuchov je u Moskvi patentirao svoje rotacijskohiperboloidne mrežaste tornjeve sastavljene od stupova od pravocrtnih željeznih cijevi ili kutnika te od horizontalnih prstenova od drvenih greda. Stupovi su u čvorovima spojeni zakovicama ili vijcima, ili su zavareni. Prsten je na gornjem kraju manji od prstena na donjem kraju tornja. Šuchovljevi su tornjevi izuzetno lagani i ekonomični te prikladni za vodotornjeve, svjetionike, telekomunikacijske i dalekovodne stupove (sl. 2). Tim je sustavom 1896. sagrađen za sverusku obrtničku i industrijsku izložbu u Nižnjem Novgorodu vodotoranj kapaciteta 123 000 L, visine 25,6 m i promjera

11,0 m na donjem, a 4,3 m na gornjem kraju. U sredini tornja nalazi se spiralno stubište. Svojom efektinom siluetom toranj je bio glavna atrakcija izložbe, a moare-efektom svoje mrežaste konstrukcije davao je slikovite refleksije svjetla i sjene.

Šuchovljevi tornjevi postali su uzorom za mnoge slične konstrukcije širom svijeta. Tako se 100 m visok toranj za potrebe lučkog pogona u japanskoj luci Kobeu sastoji od pravocrtnih ukrštenih čeličnih cijevnih stupova u plohi rotacijskog hiperboloida. Stupove protiv izvijanja pridržavaju horizontalni prstenovi, koji su tankim šipkama (šprlicima) učvršćeni za jezgru tornja, filigransku čeličnu rešetku u kojoj su dizala.

Empire State Building u New Yorku ima nosivu konstrukciju od čeličnog skeleta s 210 stupova u pravilnom pravokutnom rasteru. Oko središnje jezgre, gdje su dizala, stubišta i pomoćne prostorije, nalaze se poslovne prostorije. Stupovi se preko čeličnih ploča oslanjaju na armiranobetonske temelje samce, a oni se oslanjaju na granitnu podlogu. Ukupno opterećenje podloge od same zgrade neznatno je veće od težine iskopanog i uklonjenog materijala. Fasade su od granitnih ploča, metalnih traka i stakla. Razgledna je terasa na visini od 320 m iznad ceste, a ukupna je visina zgrade s jarbolom 449 m iznad ceste. Objekt je dovršen 1931. a za projektiranje i građenje bilo je potrebno samo 18 mjeseci. U zgradi radi oko 20 000 službenika, a dnevno prima oko 35 000 posjetitelja. Zgrada ima 73 dizala. S brzim dizalom za 58 sekundi stiže se do 80. kata, a za daljnjih 76 sekundi do 102. kata. Četrdeset dvije godine to je bila najviša zgrada na svijetu i postala je obilježjem New Yorka. Nazvana je osmim svjetskim čudom i dominirala je siluetom Manhattanu do 1972, kada joj primat preuzima *Sears Tower* u Chicagu.

TORNJEVI

Tornjevi su izloženi različitim utjecajima. Na njih djeluju vlastita težina i druga stalna i pokretna gravitacijska opterećenja (antene i ostali uređaji, voda u spremnicima, ljudi, snijeg), inercijske sile od vibracija zvona, statičke i dinamičke sile vjetra, inercijske sile pri potresima, bočni tlak vode, valova i leda, akcije od usidrenja te promjena smjera užadi i leda na njima, bočne akcije na stupove mostova zbog kočenja vozila, nejednolika promjena temperature po poprečnim presjecima i insolacija, bočni pomaci zbog deformacije nosive konstrukcije, podloge temelja i neprecizne izvedbe, zatim nejednoliko slijeganje tla, kemijske atake te katastrofalne pojave (udar zrakoplova ili broda, eksplozija).

Prema svojoj se funkciji tornjevi mogu svrstati u telekomunikacijske (posebice televizijske), razgledne, vodotornjeve, dimnjačke, zvonike, svjetionike, stupove morskih platformi, stupove visokonaponskih vodova i žičara, mostovne pilone itd.

Telekomunikacijski tornjevi

Telekomunikacijski se tornjevi grade da bi se antene postavile što više iznad okoline i tako pri radiokomunikacijama programom obuhvatilo što veće područje radiodifuzije. Osim odašiljačkih i prijamnih antena, u takvim je tornjevima smještena i ostala oprema: odašiljači, prijamnici, repetitori, upravljački uređaji, oprema za napajanje električnom energijom i dr.

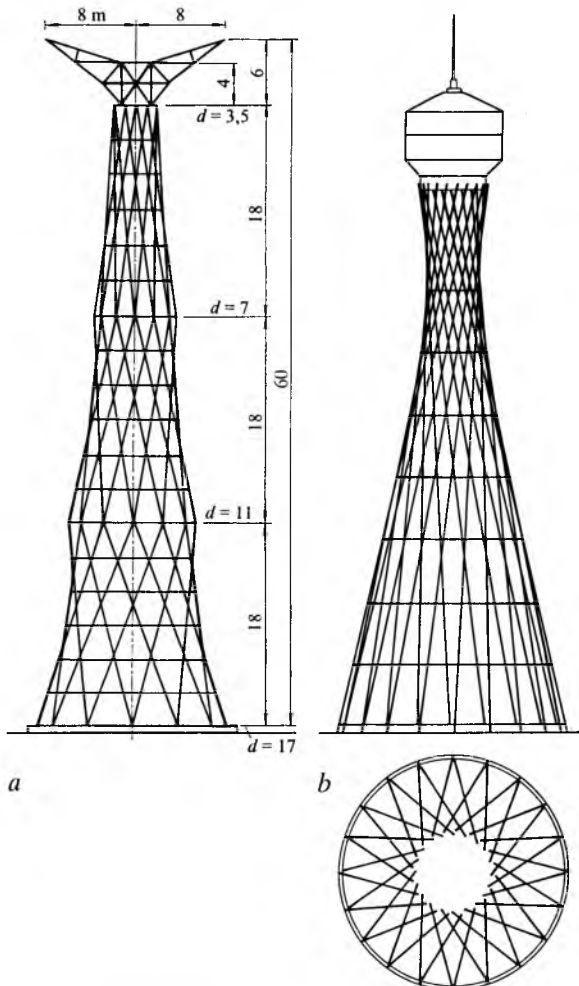
Takvi se tornjevi grade u prvom redu za televizijske potrebe, pa se često nazivaju *televizijskim tornjevima*, iako se upotrebljavaju i za mnoge druge radiokomunikacijske službe.

Telekomunikacijski su tornjevi visoke i atraktivne građevine, pa su u njima često smješteni restorani, kavane, razgledne platforme i sl.

Osnovni su dijelovi telekomunikacijskog tornja vertikalna cijev, temeljna ploča, glava i platforme.

Vertikalna cijev. Vertikalna cijev telekomunikacijskih i sličnih tornjeva u mehaničkom je smislu *fleksijska konzola* upeta u tlo. Oblikuje se i konstruira tako da bude dovoljno čvrsta i kruta. Veličina se bočnih pomaka ograničuje ne samo zbog nepovoljnog utjecaja drugog reda (v. *Stabilnost građevnih konstrukcija*, TE 12, str. 191) nego i zbog adekvatne upotrebljivosti tornja (naginjanje antena, nelagodno osjećanje ljudi na i u tornju). Vertikalne cijevi najčešće su kružnih tlocrta, ali se primjenjuju i višekutni, kvadratni i trokutni oblici. Kružni su prstenasti presjeci rotacijski, a ostali ciklički simetrični, pa im je moment inercije jednak s obzirom na sve središnje osi, a time im je i bočna krutost jednaka u svim smjerovima.

Kružni prstenasti presjek, u usporedbi s ostalim presjecima, uz istu debljinu stijenke i materijalnu površinu presjeka, ima najmanju širinu i time najmanju površinu izloženu vjetru, a zbog najpovoljnijeg aerodinamičnog oblika ima najmanji koeficijent otpora vjetru i time najmanje opterećenje vjetrom po jedinici površine, zatim ima najveći moment otpora i time najmanja normalna naprezanja, najveći moment inercije i time najveću bočnu



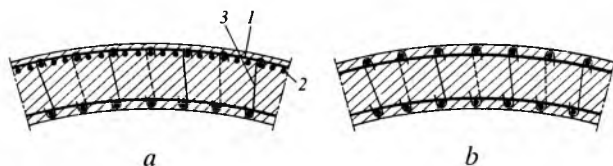
Sl. 2. Šuchovljev trokutni dalekovodni stup (a) i vodotoranj u Nižnjem Novgorodu (b)

krutost, te najmanje bočne progibe, najmanji utjecaj drugoga reda i najmanje amplitude bočnih vibracija. Osim toga, neugodni šumovi koji nastaju pri jakom vjetru najmanji su u tornjevima kružnoga prstenastog presjeka.

Za tornjeve visine do ~100 m primjenjuju se *prizmatične cijevi*, dakle cijevi konstantna presjeka uzduž visine. Promjer je tada obično 4...8 m ili 1/7...1/14 visine tornja. Prednost je konstantnog presjeka optimalno iskorištenje unutrašnjeg prostora i najlakša izvedba. U višim se tornjevima presjek cijevi prema gore smanjuje zbog konstruktivnih, ekonomskih, ali i arhitektonskih razloga. Poprečni presjeci cijevi moraju biti dovoljni za smještaj dizala, stubišta, kabela i ostalih uređaja.

Cijevi su od čelika, a u novije su doba sve češće i od betona. Betonske su cijevi bočno kruche pa su bočne deformacije i promjene nagiba antena manje, a emitiranje i prijam kvalitetniji, bolje prigušuju bočne vibracije pa nema opasnosti od rezonancije, dobro zaštićuju kabele od vanjskih utjecaja, obično su jeftinije i lakše se održavaju. Ako je okolna atmosfera vrlo onečišćena ugljičnim dioksidom ili sumpornim dioksidom, potrebno je površinu betona zaštititi premazom. Nedostatak je betonskih cijevi njihova velika težina.

Betonske se cijevi najčešće izvide primjenom klizne oplata. Armiraju se uz vanjsku i uz unutrašnju pobočku mrežom od meridionalnih i prstenastih horizontalnih šipki. Meridionalne se šipke obuhvaćaju sponama. U unutrašnjoj se mreži prstenaste horizontalne šipke nalaze uz vanjski rub (sl. 3 a), jer tada bolje pridržavaju meridionalne šipke, ili se nalaze podalje od ruba (sl. 3 b) radi lakše montaže. Ako debljina stijenke nije veća od 30 cm, ona se ponekad armira samo uz vanjsku pobočku. Kad je promjer cijevi razmjerno malen i konstantan po visini, cijev se može sastaviti od pretfabriciranih prstenova koji se vertikalno sapnu.



Sl. 3. Dva načina armiranja betonskih cijevi. 1 prstenaste šipke, 2 meridionalne šipke, 3 spona

Proračun armiranobetonskih cijevi sadrži: a) analizu kritičnih horizontalnih presjeka s obzirom na gravitacijska i bočna opterećenja, uključivo i utjecaje eventualnog zakretanja temeljne stope, anisimetrične promjene temperature i insolacije. Uvjeti ravnoteže formuliraju se na deformiranom sustavu, tj. primjenjuje se teorija drugog reda. Debljina stijenke cijevi i meridionalne armature utvrđuju se na osnovi graničnog stanja loma, a napukline se provjeravaju na osnovi graničnog stanja upotrebljivosti. Proračunavaju se konačne vrijednosti bočnih progiba i nagiba te se uspoređuju s dopuštenima; b) analizu kritičnih vertikalnih presjeka cijevi na utjecaj centralnosimetrične promjene temperature i utvrđivanje prstenaste armature; c) analizu lokalnih naprezanja na sastavu cijevi s platformama i dijafragmama i na mjestima oslabljenja, te utvrđivanje lokalne armature. Pri proračunu presjeka treba uzeti u obzir otvore za vrata i ostala oslabljenja.

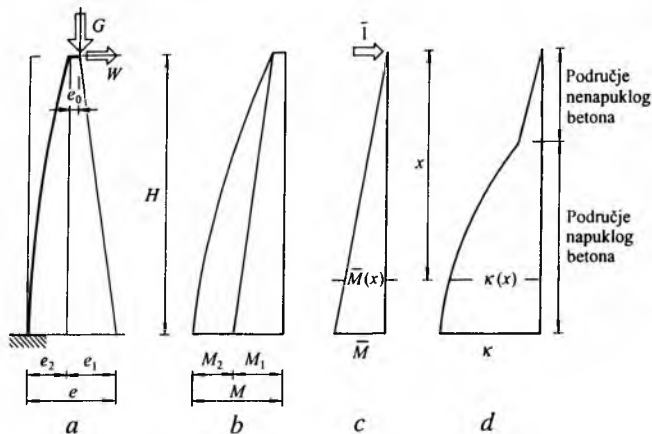
Suština analize drugog reda vrlo se pojednostavnjeno može pokazati na primjeru konzolnog stupa visine H opterećenog na vrhu silom G kojoj je ekscentričnost e_0 u odnosu na os stupa, te bočnom silom W (sl. 4 a). S obzirom na neizbježnu nepreciznost izvedbe, inicijalna se ekscentričnost sile G povećava na e_1 pa moment uklještenja stupa (sl. 4 b) po teoriji prvog reda, dakle na osnovi jednadžbi ravnoteže formuliranih na nedeformiranom sustavu, iznosi

$$M_1 = Ge_1 + WH. \quad (1)$$

Zbog bočnog se progibanja stupa ekscentričnost sile G s obzirom na inicijalnu os stupa dalje povećava na donjem kraju za e_2 . Dodatni je moment uklještenja stupa $M_2 = Ge_2$, a ukupni moment uklještenja $M = M_1 + M_2$. Po Mohrovoj formuli statike građevnih konstrukcija (v. *Statika građevnih konstrukcija*, TE 12, str. 267) ekscentričnost sile G s obzirom na inicijalnu os stupa iznosi

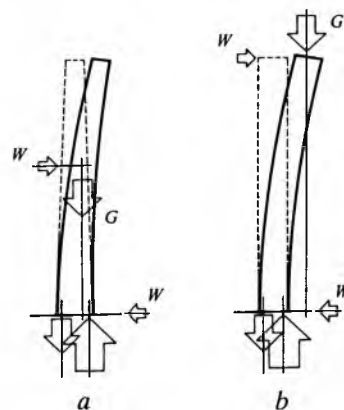
$$e_2 = \int_0^H \bar{M}(x) \kappa(x) dx, \quad (2)$$

gdje je $\bar{M}(x)$ moment savijanja na koti x zbog jedinične bezdimenzijske bočne sile na vrhu stupa (sl. 4 c), $\kappa(x) = M(x)/K(x)$ zakrivljenost (sl. 4 d) progibne linije na koti x , a $K(x)$ fleksijska krutost presjeka na koti x . Numerički je proračun, dakle, unatoč statičkoj određenosti stupa, iterativan i dugotrajan.



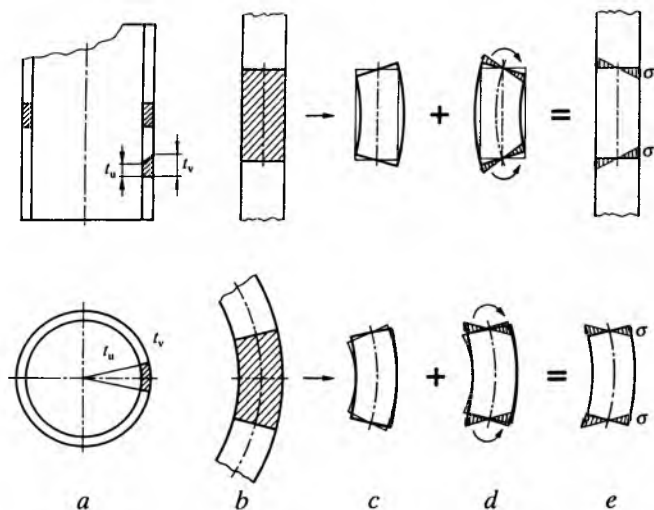
Sl. 4. Ilustracija analize drugog reda

Numeričke analize pokazuju da *utjecaj stalnog opterećenja na mehaničko ponašanje* tornja bitno ovisi o visinskom položaju rezultante G tog opterećenja. Ako je težina pretežno podijeljena po visini tornja, ako dakle uglavnom potječe od cijevi, hvatište je rezultante nešto iznad polovišta visine tornja (telekomunikacijski i slični tornjevi, dimnjaci itd.) i linija djelovanja sile G u deformiranom sustavu siječe presjek uklještenja između hvatišta unutrašnjih sila tlaka i vlaka (sl. 5 a), pa težina s obzirom na vlačnu armaturu i otvaranje fuge u temeljnoj stopi djeluje povoljno. Ako je, međutim, glavni dio težine tornja koncentriran na vrhu (vodotornjevi), hvatište je rezultante praktički na vrhu, linija djelovanja sile G u deformiranom sustavu siječe presjek uklještenja izvan područja omeđenog hvatištima unutrašnjih sila tlaka i vlaka (sl. 5 b), pa težina s obzirom na vlačnu armaturu i otvaranje fuge u temeljnoj stopi djeluje nepovoljno.



Sl. 5. Tornjevi u kojima je težina uglavnom podijeljena po visini (a), odnosno koncentrirana na vrhu (b)

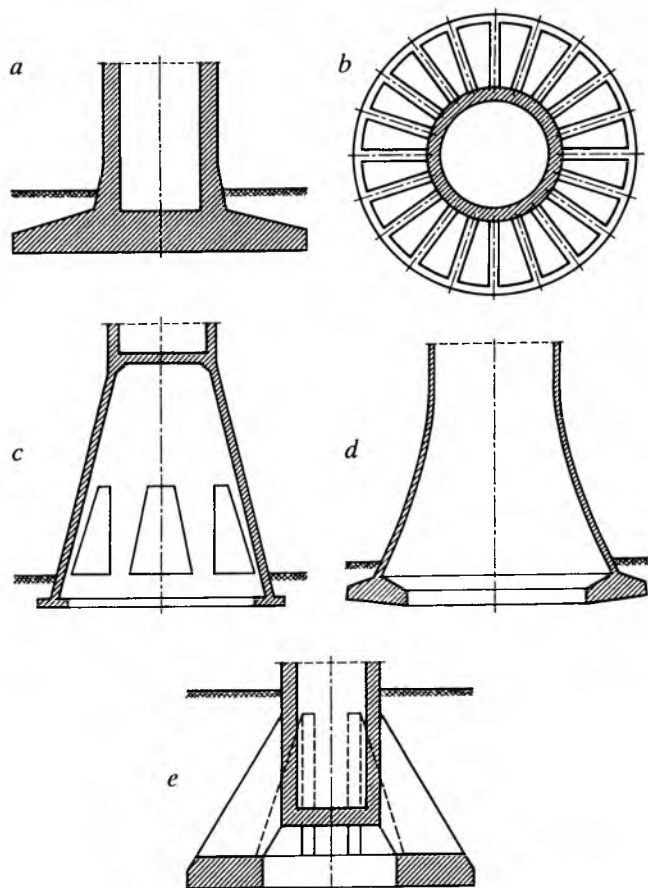
Slika 6 ilustrira djelovanje centralnosimetrične promjene temperature, nejednoliku po debljini stijenke, na kružnu prstenastu cijev (povišenje temperature unutrašnje pobočke manje je od povišenja temperature vanjske pobočke stijenke, $t_u < t_v$). U horizontalnim i vertikalnim presjecima stijenke pojavljuju se momenti savijanja (meridionalni, odnosno prstenasti) i time normalna naprezanja, koja se određuju iz uvjeta da cijev ostaje valjkasta, a presjek kružan.



Sl. 6. Vertikalni osni presjek i tlocrt isječka kružne prstenaste cijevi izložene centralnosimetričnoj promjeni temperature (a), nacrt i tlocrt elementa stijenke (b), deformacija elementa zbog promjene temperature (c), deformacija elementa i momenti savijanja na krajevima elementa s pripadnim normalnim naprezanjima (d), normalna naprezanja (e)

Temelj vertikalne cijevi. Cijevi se najčešće temelje na ploči (kružnoj ili u obliku pravilnog višekuta, punoj ili prstenastoj), i to izravno ili preko prijelazne ljuske, zatim na usidrenom prstenu, na pilotima preko kružnog prstena ili neposredno na ljusci. Način temeljenja ovisi o vrsti i stanju tla, dubini temeljenja te o mogućem postojanju podrumskih prostorija. Specifičnost je temeljenja tornjeva da gravitacijska sila i moment prevrtanja u stopi temelja iziskuju da stopa (donja ploha ploče) bude mnogo veća od presjeka cijevi.

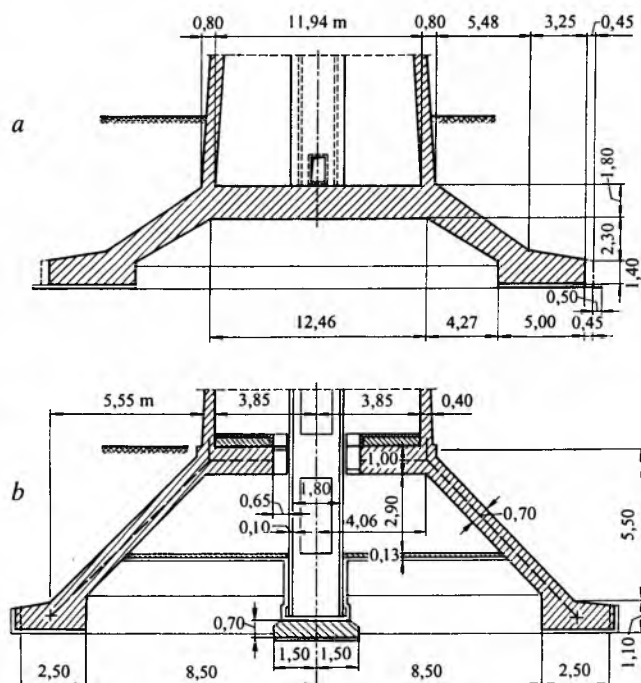
Najpovoljniji su kružni oblici temeljne ploče. Ploča može biti masivna (sl. 7a) ili rebrasta (sl. 7b). Zbog velikih momenata



Sl. 7. Temeljne ploče tornjeva. a masivna, b rebrasta ploča, c s krnjostožastom prijelaznom ljuskom, d s rotacijskohiperboloidnom prijelaznom ljuskom, e s rebri-ma u vertikalnim središnjim ravninama

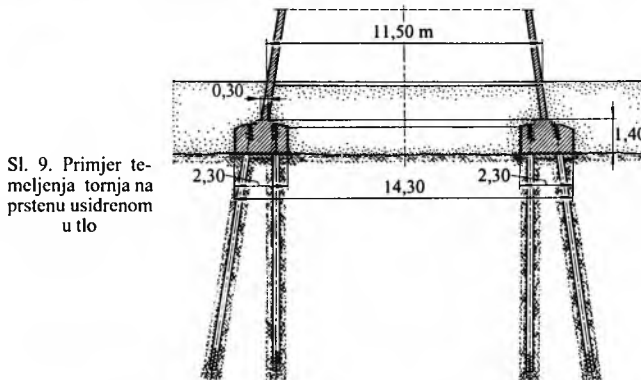
prevrtanja promjenljiva predznaka i smjera mogu u rubnim područjima stope nastati znatna slijeganja, a time i tzv. jahanje tornja na srednjem području stope. S tog je gledišta prsten povoljniji od pune ploče, ali tada stubišta i šaht dizala u srednjem dijelu cijevi treba temeljiti posebno. Kompromisno rješenje između pune i prstenaste ploče jest puna ploča na mekoj podlozi, dakle na tlu razrahljenu u srednjem području.

Ako temeljna stopa nije duboko ispod površine terena, cijev se na temeljnu ploču može osloniti neposredno (sl. 7a,b). Zbog smanjenja prepusta temelja u većih je tornjeva potrebna prijelazna ljuska između cijevi i temelja. To je obično krnjostožasta ljuska s otvorima (sl. 7c) ili dvostruko zakrivljena (npr. rotacijskohiperboloidna) ljuska (sl. 7d). Takve ljuske dobro prenose ne samo gravitacijska opterećenja nego i bočne utjecaje. Debljina je prijelazne ljuske obično 30–50 cm, a armirana je mrežom meridionalnih i prstenastih šipki uz vanjsku i unutrašnju pobočku. Osim prijelaznom ljuskom, cijev se na temeljni prsten može oslanjati i nizom rebara u središnjim vertikalnim ravninama (sl. 7e). Prijelazna konstrukcija (ljuska, odnosno rebra) na temeljni prsten djeluje kosim akcijama. Horizontalne radijalne komponente tih akcija naprežu prsten na vlak, pa je poželjna prednapregnuta prstenasta armatura. Nedostatak je rješenja s rebri-ma da rotacijsku simetriju s obzirom na os cijevi reduciraju na cikličku simetriju. Slike 8a i 8b prikazuju krnjostožastu ljusku telekomunikacijskog tornja u Kielu, odnosno u Hannoveru.



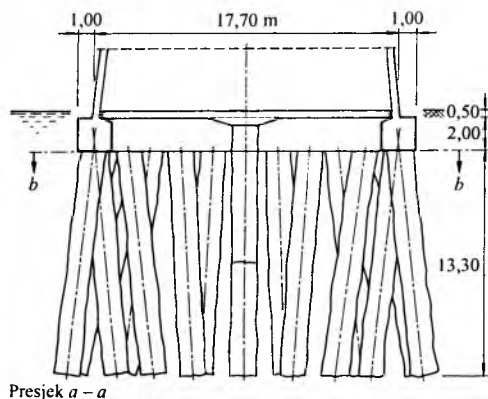
Sl. 8. Temeljne konstrukcije telekomunikacijskih tornjeva u Kielu (a) i Hannoveru (b)

Ako zbog razmjerno malena promjera temeljnog prstena nije osigurana stabilnost tornja od prevrtanja, prsten se može usidriti u tlo (sl. 9). Za to su najpovoljniji, ako to okolnosti dopuštaju, prednapregnuti kabeli učvršćeni u stijenu.

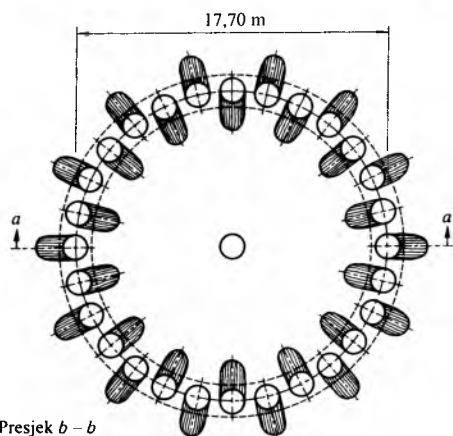


Sl. 9. Primjer temeljenja tornja na prstenu usidrenom u tlo

Primjer temeljenja na pilotima prikazan je na slici 10. Cijev se može temeljiti i neposredno na ljusci, npr. krnjostožastoj ljusci s ukrutnim rebrima (sl. 11a) ili tanjurastoj ljusci (sl. 11b).



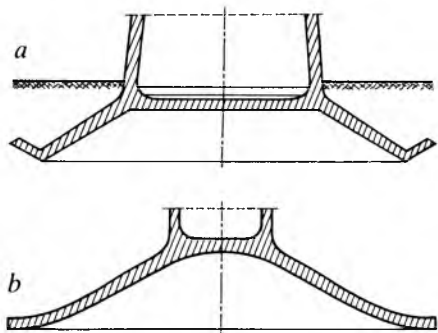
Presjek a - a



Presjek b - b

Sl. 10. Primjer temeljenja tornja na prstenu i pilotima

Pri analizi loma tla i usporedbi tlaka na tlo s dopuštenim tlakom uzima se da je nosivost temeljne stope jednaka umnošku čvrstoće tla i površine dijela temeljne stope koji se utvrđuje tako da mu se središte poklapa s hvatištem rezultante gravitacijskog opterećenja. Tlak u tom dijelu temeljne stope smatra se jednoliko raspodijeljenim.



Sl. 11. Temeljne ljuske. a) krnjostožasta ljuska s ukrutnim rebrima, b) tanjurasta ljuska

Oblik, veličina i položaj temeljne stope utvrđuju se s obzirom na sljedeće zahtjeve: 1) težište stope mora biti na liniji djelovanja rezultante stalnog opterećenja, jer tada stalno opterećenje ne uzrokuje naganjanje tornja. Ako to nije moguće, razlike tlaka u stopi moraju biti što manje, a trag linije djelovanja rezultante stalnog opterećenja mora biti u jezgri stope da se ne bi otvorila fuga, tj. odignuo temelj od tla; 2) pri djelovanju najvećega bočnog opterećenja u najnepovoljnijem smjeru i minimalnoga gravitacijskog opterećenja fuga se u temeljnoj stopi smije otvoriti najviše do težišta stope. Tim se zahtjevom osigurava stabilnost tornja od prevrtanja; 3) horizontalna komponenta napadne sile u temeljnoj stopi ne smije biti veća od umnoška koeficijenta sigurnosti i sile

otpora. To je zbroj sile trenja u stopi i tlaka mirovanja tla na pobočku temelja. Sila trenja u stopi jednaka je umnošku vertikalne komponente napadne sile u stopi, eventualno umanjene za uzgon, i koeficijenta trenja. Tim se zahtjevom postiže sigurnost od klizanja tornja u temeljnoj stopi.

Karakteristike višekutnih punih stopa. Ako je n broj stranica pravilnog višekutnika, a R polumjer opisanog kruga, duljina je stranice

$$a = 2R \sin \frac{\pi}{n}, \quad (3)$$

polumjer upisanog kruga

$$r = \frac{a}{2} \cot \frac{\pi}{n}, \quad (4)$$

površina $A = n a r$, a moment inercije s obzirom na sve središnje osi

$$I = A \frac{6R^2 - a^2}{24}. \quad (5)$$

Najmanja jezgrena udaljenost, tj. najmanja udaljenost ruba od središta jezgre, iznosi za kvadrat

$$j = 0,118a, \quad (6)$$

za šesterokut

$$j = 0,240r \quad (7)$$

te za osmerokut

$$j = 0,226R. \quad (8)$$

Krug, dakle pravilni višekutnik s $n = \infty$, ima površinu

$$A = \pi R^2, \quad (9)$$

moment inercije

$$I = A \frac{R^2}{4}, \quad (10)$$

moment otpora

$$W = \pi \frac{R^2}{4} \quad (11)$$

te jezgrenu udaljenost

$$j = \frac{R}{4}. \quad (12)$$

Karakteristike višekutnih prstenastih stopa. Za kvadratnu prstenastu stopu, gdje a znači vanjsku i a_u unutrašnju stranicu kvadrata, moment inercije s obzirom na sve središnje osi iznosi

$$I = \frac{a^4 - a_u^4}{12}, \quad (13)$$

najmanji moment otpora (za dijagonalni smjer)

$$W = 0,118 \frac{a^4 - a_u^4}{a}, \quad (14)$$

a najmanja je jezgrena udaljenost (za dijagonalni smjer)

$$j = 0,118a \left[1 + \left(\frac{a_u}{a} \right)^2 \right]. \quad (15)$$

Za osmerokutnu prstenastu stopu, ako je R polumjer kružnice opisane po vanjskom rubu, a r polumjer kružnice upisane po unutrašnjem rubu, najmanja je jezgrena udaljenost

$$j = 0,226R \left[1 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

Za kružnu prstenastu stopu, ako je R polumjer vanjske, a r polumjer unutrašnje kružnice, površina iznosi

$$A = \pi(R^2 - r^2), \quad (17)$$

moment inercije za sve središnje osi

$$I = \frac{\pi}{4}(R^4 - r^4), \quad (18)$$

a jezgrena je udaljenost za sve smjerove

$$j = \frac{R}{4} \left[1 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]. \quad (19)$$

Usporedba tih podataka pokazuje da je prstenasta stopa povoljnija od pune stope. Jezgrena udaljenost kružne prstenaste stope veća je $(1 + r/R)^2$ puta od jezgrene udaljenosti kružne stope istog polumjera. Raspodjela je tlaka u prstenastoj stopi jednoličnija, a sigurnost od prevrtanja veća nego u kružnoj stopi. Dakle, rezultanta u prstenastoj stopi može biti mnogo ekscentričnija nego u punoj stopi.

Proračun slijeganja i dimenzioniranje temelja obično se provodi uz pretpostavku da je temelj nedeformabilan, a raspodjela tlaka u stopi ravninska. Da nagib tornja pri bočnom opterećenju ne bi bio prevelik, kutni se pomak temeljne stope zbog momenta prevrtanja u stopi, koji iznosi

$$M_p = 0,75 \frac{(1 - \nu^2) M}{ER^3}, \quad (20)$$

ograničuje na $\sim 0,004$, gdje je ν Poissonov koeficijent, a E dinamički modul elastičnosti tla.

Proračun kružne temeljne ploče. Mjerodavne unutrašnje sile mogu se jednostavno odrediti kinematičkom metodom teorije plastičnosti. Ako je R polumjer temeljne ploče, r vanjski polumjer cijevi na sastavu s temeljnom pločom, te q reaktivni tlak tla (bez doprinosa težine temelja i tla iznad njega), moment uklještenja prepusta ploče po jedinici duljine iznosi

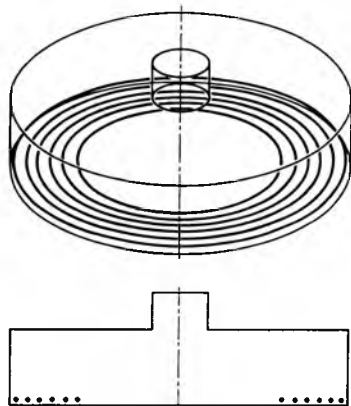
$$M_u = q \frac{2R^3 + r^3 - 3R^2r}{6r}, \quad (21)$$

a pripadna poprečna sila

$$Q = q \frac{R^2 - r^2}{2r}. \quad (22)$$

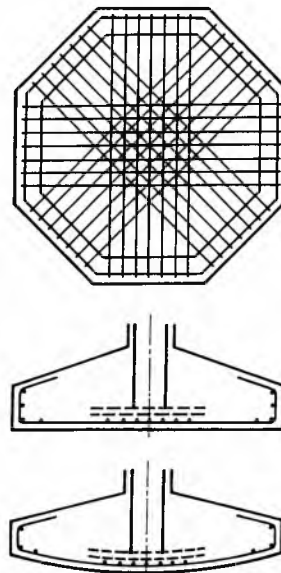
Pritom se pretpostavlja da je reaktivni tlak konstantan po površini stope, tj. da potječe od gravitacijskog opterećenja. Ako je reaktivni tlak promjenljiv, što znači da uključuje i doprinos bočnog opterećenja tornja, za q treba uvrstiti srednju vrijednost tlaka u području prepusta u ravni opterećenja, dakle na udaljenosti $(R+r)/2$ od središta stope.

Kružne temeljne ploče mnogo su ekonomičnije od kvadratnih. Najjednostavnije je i teoretski najispravnije armirati ih prstenasto (sl. 12); čelik je tada svuda jednako i potpuno iskorišten. Često se



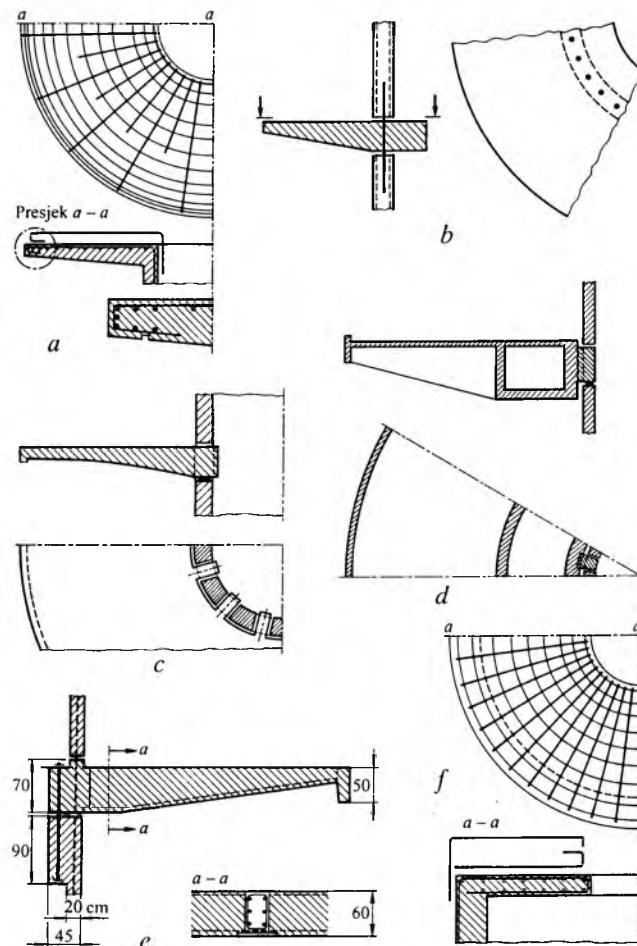
Sl. 12. Armiranje kružne temeljne ploče

primjenjuju i osmerokutne temeljne ploče (sl. 13); armiraju se prstenasto u 4 sloja i uz rub. Temeljna je stopa obično ravna, a može biti i zaobljena.



Sl. 13. Armiranje osmerokutne temeljne ploče

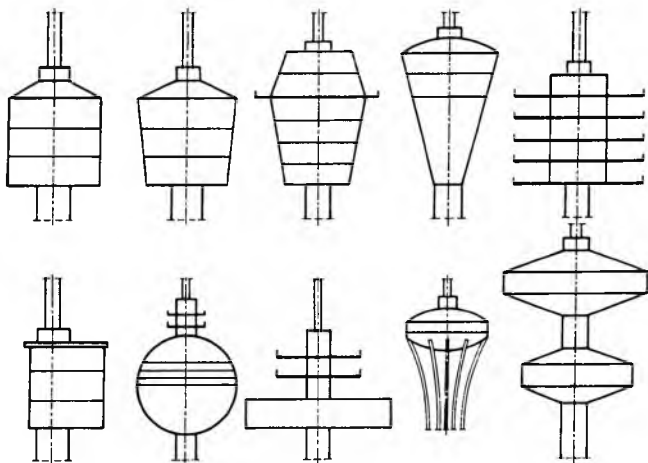
Platforme i glave. Platforme telekomunikacijskih tornjeva, najčešće vanjske, nose razne uređaje, napose antene i parabolična zrcala, te služe kao vidikovci. Platforme su kružne prstenaste ploče. Armiraju se prstenasto i radijalno. Ako istaka nije dulja od 5 m, ploča može biti masivna, ona je ili upeta u cijev, tj. s njome je kruto spojena (sl. 14 a), ili je na cijev zgloбно i radijalno nepomično oslonjena (sl. 14 b) ili je pak na cijev zgloбно i radijalno pomično oslonjena (sl. 14 c). Prednosti su zglobovog oslanjanja da



Sl. 14. Toranjske platforme

se u cijev ne uvode momenti savijanja, da je betoniranje cijevi jednostavnije jer iz nje ne strši armatura za prijenos momenata savijanja i da ploča, ako je radijalno pomično oslonjena, može nesmetano dilatirati zbog promjena temperature. Nedostatak su zglobnog oslanjanja jače naprezanje i progibanje ploče, a u vezi s tim i veći utrošak čelika. Sandučasta ili šuplja kružna prstenasta ploča (sl. 14d) za istake veće od 5 m složena je za izvedbu. Jedno od rješenja kružne prstenaste ploče od pretfabriciranih segmentnih elemenata prikazano je na slici 14e. Ponekad se upotrebljavaju i unutrašnje platforme (sl. 14f).

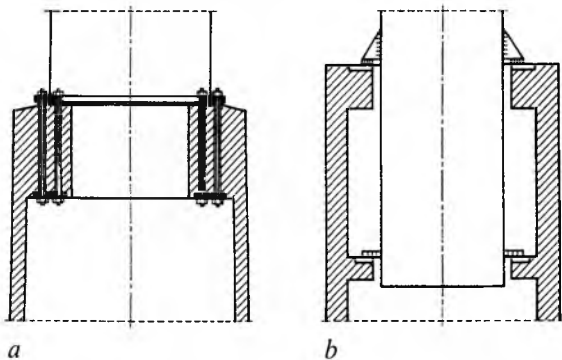
Glave telekomunikacijskih tornjeva služe za tehničke i servisne potrebe, kao restorani, kavana ili spremnici. Zbog statičkih i aerodinamičkih razloga najpovoljniji su kružni tlocrti. Glave mogu u nacrtu imati različite oblike (sl. 15); da bi se spriječili šumovi zbog vjetrova te naslage snijega i leda, glave trebaju biti glatke, zaobljene i bez istaka.



Sl. 15. Razni oblici toranjskih glava

Statički najpovoljnije rješenje za uvođenje većih opterećenja u cijev jesu rotacijske, najčešće plitke stožaste ljuske, ali je njihova oplata, a time i izvedba mnogo složenija, osobito ako su, osim u tlocrtu, zakrivljene i u nacrtu. Napregnute su uglavnom membranskim unutrašnjim silama u smjeru prstena, dakle u horizontalnim ravninama, a ponekad su i prednapregnute. U cijevi na sastavu s ljuskom nalazi se tlačni prsten i dijafragma za preuzimanje meridijanskih akcija ljuske. Uvođenje momenta savijanja u cijev može se spriječiti zglobnim oslanjanjem ljuske. Plašt stožastih ljusaka može se raščlaniti u više vlačnih ili tlačnih štapa u središnjim vertikalnim ravninama, a oni se stabiliziraju horizontalnim vlačnim ili tlačnim prstenovima ili stropovima koji djeluju kao dijafragme.

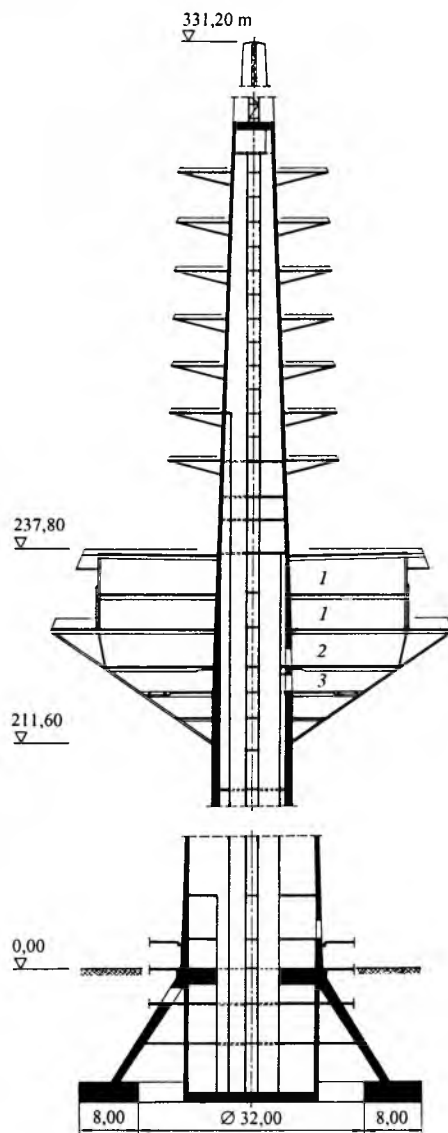
Spoj čeličnog antenskog stupa i betonske cijevi ostvaruje se pločom, debelom 1,2...1,5 m (sl. 16a), koja bez veće deformacije uvodi moment uklještenja stupa u cijev, ili dvjema međusobno razmaknutim tanjim pločama (sl. 16b) koje moment uklještenja stupa uvode u cijev parom horizontalnih sila. Na mjestima mogućih promjena nagiba stijenki obično se nalaze unutrašnje dijafragme; njihova je namjena da preuzmu horizontalne radijalne sile koje nastaju zbog devijacije smjera trajektorija normalnih napona.



Sl. 16. Spoj antenskog stupa i betonske cijevi pomoću debele ploče (a) i pomoću dviju tanjih ploča (b)

Na donjem se kraju tornja često nalazi niska *prigradnja*. Da bi se spriječile štete zbog nejednoličnog slijeganja, preporučljivo je prigradnju izvesti kad je slijeganje tornja uglavnom završeno.

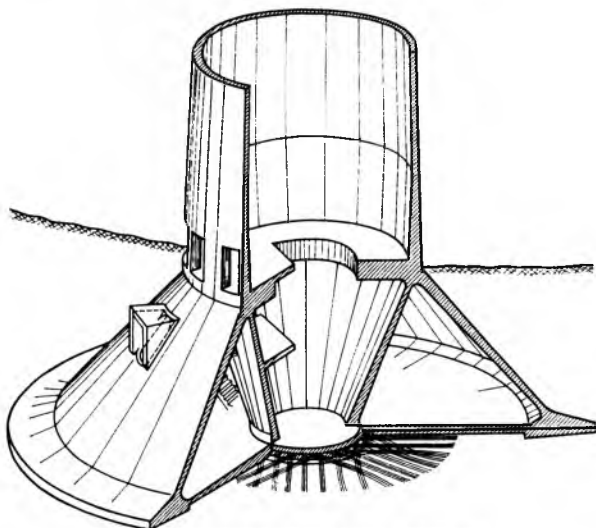
Primjeri telekomunikacijskih tornjeva. *Televizijski toranj u Frankfurtu na Majni* (sl. 17) najviši je toranj te vrste u Njemačkoj. Promjer je cijevi na donjem kraju 19,60 m, na donjem kraju glave 10,80 m, a na mjestu priključka antenskog stupa 5,60 m. Glava ima dva pogonska kata za telekomunikacijsku tehniku, prstenastu razglednu platformu te kavanu i restoran s okretnim podijem. Glava je krmjostožasta ljuska, koja zbog svoje veličine (visina 15 m, promjer 56 m) nije betonska, već se sastoji od čeličnih kosnika u vertikalnim središnjim ravninama i vlačnog prstena na gornjem kraju. Na sedam platformi iznad glave nalaze se zrcalne antene.



Sl. 17. Televizijski toranj u Frankfurtu na Majni. 1 telekomunikacijska oprema, 2 razgledna platforma i kavana, 3 restoran na okretnom podiju

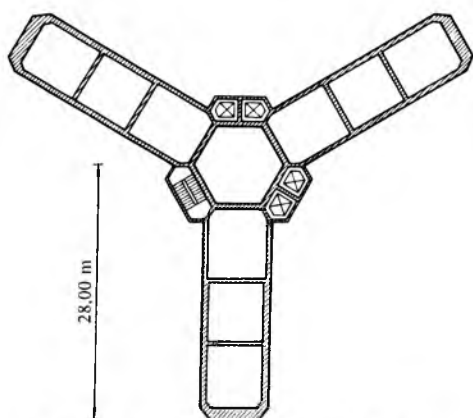
Televizijski toranj u Stuttgartu, sagrađen 1954/55, vitak je betonski toranj s razglednom platformom i restoranom. Betonska je cijev visoka 161 m, a čelični antenski jarbol, nasaden na vrh cijevi, 51 m. Promjer je cijevi na gornjem kraju 5 m, a određen je potrebom za smještaj dvaju dizala, stubišta i kabela; naniže se u blagom luku povećava na 10,5 m. Debljina stijenke na donjem je kraju 60 cm, a na vrhu 18 cm; na svakih 10 m cijev je ukrućena prstenom koji ujedno drži vodilice dizala. Cijev je pomoću dvostruke stožaste ljuske temeljena na kružnoj temeljnoj ploči (sl. 18) koja na tlo naliježe samo vanjskim i središnjim područjem, pa je njezino savijanje neznatno, a polumjer inercije temeljne

stope velik. Razuporne sile od prijelaznih ljsaka preuzima četveroslojna armatura od prednapregnutih kabela u temeljnoj ploči. Kao prije Eiffelov toranj, i taj je toranj bio najprije kritiziran, ali je uskoro općeprihvaćen, te je postao obilježjem Stuttgarta. Godišnje ima ~700 000 posjetitelja, pa je trošak gradnje pokriven u 5 godina zaradom na prijevozu dizalima i iznajmljivanju restorana. Taj je toranj, prvi te vrste, bio uzorom za gradnju sličnih tornjeva širom svijeta.



Sl. 18. Temelj televizijskog tornja u Stuttgartu

Među najvišim je betonskim tornjevima na svijetu *CN-toranj u Torontu* (Canadian National Railway Tower), građen 1973–76. godine. Šiljak je antenskog stupa na visini od 553 m iznad tla. Konstrukcija se sastoji od šesterokutne betonske cijevi, jezgre konstantna vanjskog promjera od 11 m i triju radijalnih sandučastih rebara koja se naviše suzuju (sl. 19). Na visini od 460 m nalazi se manja razgledna glava, tzv. orlovsko gnijezdo, a na 350 m tlocrtno okrugla, po visini profilirana glavna glava koja sadrži restoran za 450 osoba s okretnim podijem i dvije razgledne platforme, te ispod svega telekomunikacijsku tehniku. Jezgra ima tri niše; u dvjema su po dva dizala, a u trećoj je stubište. Građevina je temeljena na 5,50 m debeloj prednapregnutoj ploči vanjskog promjera 70 m, znatno istaknutoj preko krajeva rebara. Gornji su dijelovi tornja montirani helikopterom.

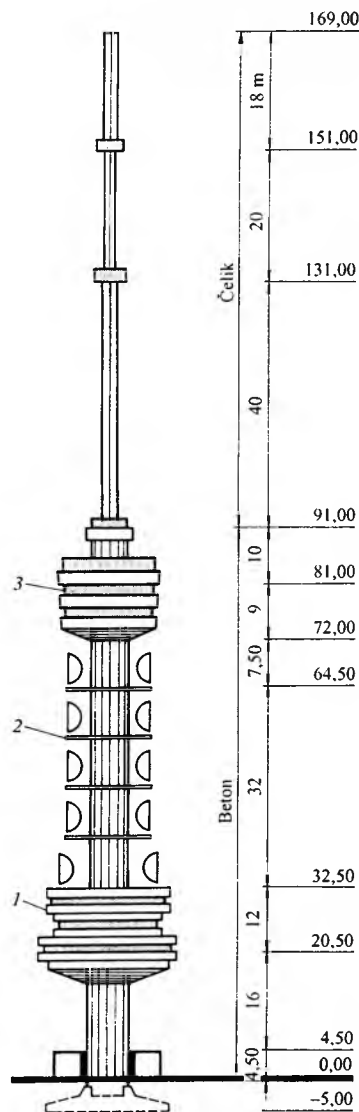


Sl. 19. Horizontalni presjek CN-tornja u Torontu

Trokraki oblik presjeka konstruktivno je nepovoljan s aerodinamičkog gledišta, jer je opterećenje od vjetrova 3 do 4 puta veće nego u okruglog presjeka i jer je jezgrena udaljenost, a time i stabilnost protiv prevrtanja, razmjerno malena; arhitektonski taj oblik presjeka može biti povoljan, jer rebra svojim sužavanjem naviše naglašavaju visinu.

Telekomunikacijski toranj na Medvednici građen je od 1973 do 1975. godine za potrebe radiotelevizije i pošte (sl. 20). Trup tornja betonska je cijev debljine 65 cm do kote 20,30 m, a 35 cm iznad te

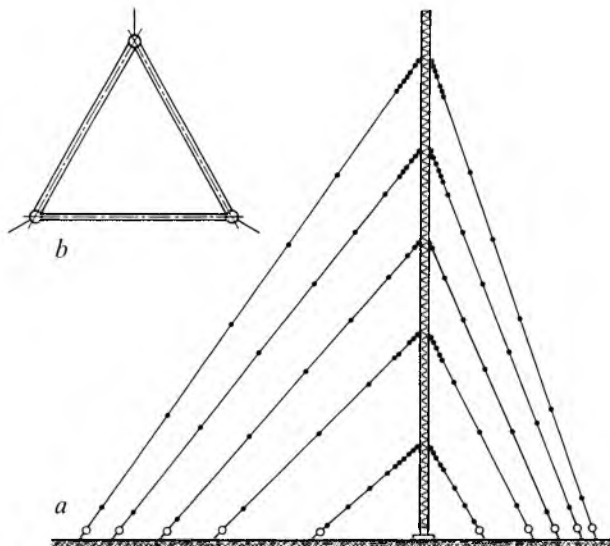
kote. Cijev je na gornjem kraju zatvorena betonskom pločom debljine 1,40 m, na koju je pričvršćen čelični stup. Ukupna je visina tornja 169 m. Pogonska glava ima 4 kata promjera 18...22 m; njezina se nosiva konstrukcija sastoji od krnjostožaste ljuske prednapregnute uzduž obodnog prstena, radijalnih montažnih prednapregnutih greda i monolitnih armiranobetonskih stropnih ploča. Turistička glava izvedena je slično kao i pogonska. Četiri platforme nose zrcalne antene, a konstruktivno su to kružne prstenaste ploče promjenljive debljine. Temelj je kružna ploča promjenljive debljine; najveća debljina na sastavu s trupom iznosi 3,70 m.



Sl. 20. Telekomunikacijski toranj na Medvednici. 1 pogonska glava, 2 platforme za antene, 3 turistička glava

Telekomunikacijski jarboli. Za smještaj laganih antena na velikoj visini, kako bi se omogućio kvalitetan prijam na što većem području, upotrebljavaju se telekomunikacijski jarboli. Uobičajene su visine 200...300 m. To su vitki, obično čelični stupovi (cijevi ili filigranske prostorne rešetke). Stup je na temelj pričvršćen prostornim zglobovima, a bočno je stabiliziran užadima, obično u trima središnjim vertikalnim ravninama. Nagib je užadi 45...60°. Užad je obično prednapregnuto da se prekomjerno ne provjesi i da se spriječi prekomjerno vibriranje stupa pri jakom vjetru. Amplitude od 1...2 m nisu rijetke. Sile u užadi proizvode tlačne sile u stupu. Kako se užad iz veće udaljenosti praktički ne primjećuje, telekomunikacijski jarboli djeluju kao stojeće igle. Nagraduje ih, međutim, njihova crveno-bijela boja koja je potrebna radi sigurnosti zračnog prometa. Najviši telekomunikacijski jarbol sagra-

đen je 1970. pokraj Varšave (sl. 21a). Stup visine 642 m trokutna je rešetka (sl. 21b) sa stranicama duljine 4,80 m, a bočno je stabiliziran užadima na 5 kota.

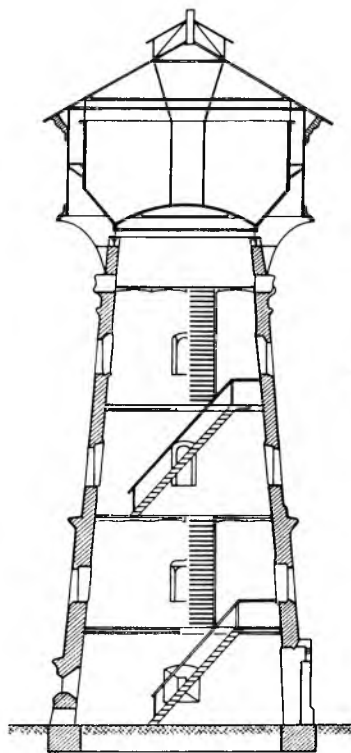


Sl. 21. Pregled i poprečni presjek stupa telekomunikacijskog jarbola pokraj Varšave

Ostali tornjevi

Vodotornjevi. Vodotornjevi drže spremnike za opskrbu vodom industrijskih objekata i naseljenih područja. Često su prijeko potrebni na položitim terenima kako bi se i u gornjim katovima višekatnih zgrada postigao dovoljan tlak vode. Vodotornjevi se sastoje od cijevi s temeljem i spremnika s vodom.

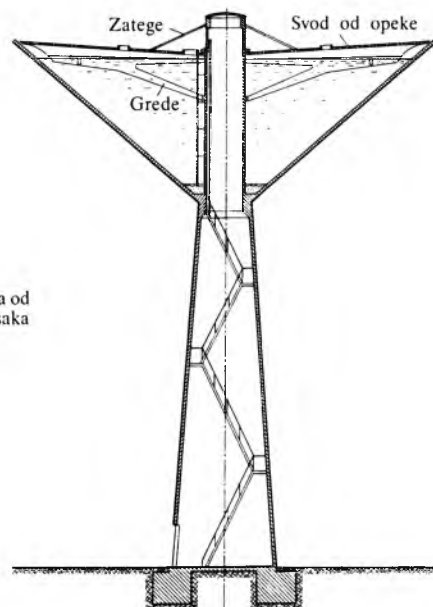
Cijev je najčešće masivna ili raščlanjena cilindrična ljuska, krnjostožasta ljuska koja se proširuje naniže ili naviše, ili rotacijskohiperboloidna ljuska. Spremnici su u početku bili valjkasti, a na ležajnu su se konstrukciju oslanjali uzduž oboda dna. Godine 1883. Intze je patentirao novu vrstu spremnika od valjkastog plašta i dna sastavljena od kugline kalote u srednjem i krnjostožaste ljuske u vanjskom dijelu. Ležajni se prsten nalazi na sastavu srednjeg i vanjskog dijela dna pa je tako mnogo manjeg promjera od gornjega valjkastog dijela posude, i promjer je cijevi mogao biti manji. Prvi vodotoranj s Intzeovim spremnikom



Sl. 22. Vodotoranj s Intzeovim spremnikom

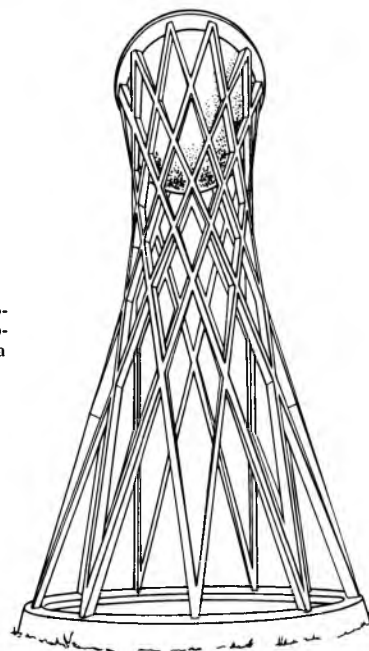
sagrađen je u Wiesbadenu 1897. godine (sl. 22). Toranj više nije u upotrebi, ali stoji kao povijesni spomenik.

Vodotoranj od dviju krnjostožastih ljusaka, jedne za cijev, a druge za spremnik, prikazan je na slici 23.



Sl. 23. Presjek vodotornja od dviju krnjostožastih ljusaka

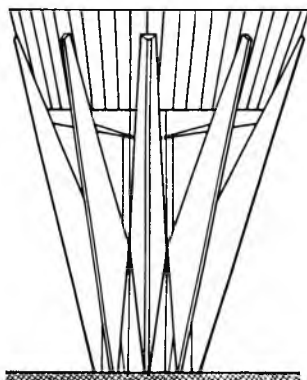
Slika 24 prikazuje projekt vodotornja od dviju rotacijskohiperboloidnih ljusaka, gdje je donja cijev raščlanjena u mrežastu konstrukciju od dvaju nizova stupova koji se sijeku, a gornja je (spremnik) preko ležajnog prstena obješena na vrh cijevi.



Sl. 24. Vodotoranj od rotacijskohiperboloidne mrežaste cijevi i rotacijskohiperboloidnog spremnika

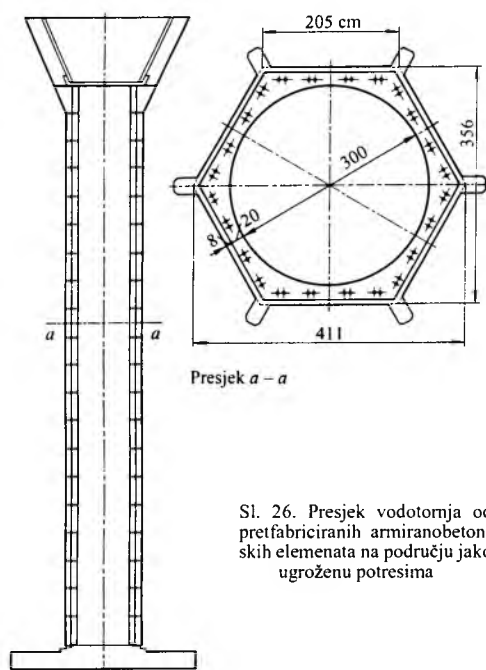
Vodotoranj na slici 25 sastoji se od prostornog okvira s nizom stupova promjenljiva presjeka u središnjim vertikalnim ravninama, te od prstena i krnjostožastog spremnika.

Primjer tornja na području jako ugroženom potresima u Turskoj prikazuje slika 26. Toranj je visok 35 m, a cijev je sastavljena od dvadeset prstenastih armiranobetonskih elemenata pretfabričiranih na gradilištu. Elementi su izvana šesterokutni i uzduž bridova ukruženi rebrima, a iznutra kružni, visoki 1,50 m, sa stijenkom na najtanjem mjestu debljine 28 cm. Međusobno su spojeni zavarivanjem ubetoniranih čeličnih pločica s vertikalnom armaturom koja strši iz elemenata i mršavim betonom koji se ne skuplja. Spremnik, kapaciteta 200 m³, betoniran je *in situ* (na samom mjestu), da bi se osigurala vodonepropusnost. Cijev je te-



Sl. 25. Vodotoranj od prostorno okvime konstrukcije i krmjostožastog spremnika

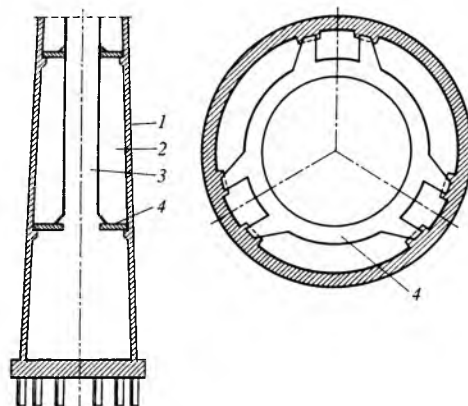
meljena na kvadratnoj armiranobetonskoj ploči sa stranicama duljine 10 m i debljine 1 m. Toranj je proračunan na bočna ubrzanja u iznosu jedne desetine ubrzanja sile teže.



Sl. 26. Presjek vodotornja od pretfabriciranih armiranobetonskih elemenata na području jako ugroženu potresima

Industrijski dimnjaci. U industrijskim postrojenjima dimnjaci služe za odvođenje plinova i dima iz toplana i toplinskih agregata metalurške i kemijske industrije. Visina dimnjaka određuje se toplinskotehničkom analizom, a uobičajene su visine 200...300 m. Dimnjak se sastoji od temelja, vanjske cijevi, unutrašnje dimovodne cijevi, toplinske izolacije između obiju cijevi, pokrova, vanjskih ljestava i gromobrana, te signalizacije za sigurnost zračnog prometa. Vanjska je cijev obično armiranobetonska, valjkasta ili krmjostožasta. Prednosti su krmjostožastih cijevi manji utrošak betona i veća krutost, lakše su i ljepše, a nedostatak im je složenija izradba. Najčešće se betoniraju *in situ*, no mogu se i sastaviti od pretfabriciranih elemenata. Omjer je visine i vanjskog promjera cijevi na donjem kraju obično ~20.

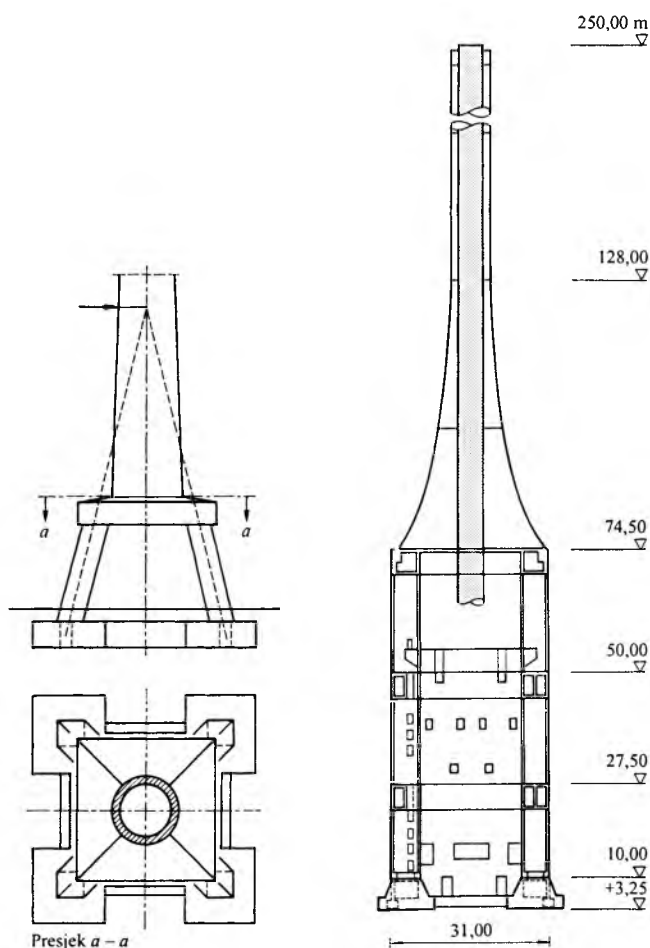
Posebna dimovodna cijev potrebna je zbog visoke temperature i kemijske agresivnosti dima i plinova. Temperatura i stupanj njihove agresivnosti široko variraju, već prema tipu agregata, sastavu goriva i obradbi prije nego što uđu u dimnjak. Uobičajene su temperature do 700 °C. Dimovodna se cijev gradi od glinene ili šamotne opeke ili vatrootpornih betonskih blokova, a sastoji se od 7...15 m visokih pojasova koji se oslanjaju na konzole isturene iz vanjske cijevi da mogu neovisno o njoj slobodno dilatirati. Zračni je sloj između cijevi debeo obično 3...5 cm, a toplinska izolacija (mineralna vata i sl.) služi zaštiti vanjske cijevi i sprečavanju prekomjernog hlađenja plina. Ima i rješenja sa zračenim međuprostorom (sl. 27). Dovodne dimovodne kanale treba konstruktivno odvojiti od vanjske cijevi da se izbjegnu prinude zbog temperaturnih razlika.



Sl. 27. Dimnjak s armiranobetonskom dimovodnom cijevi od pretfabriciranih elemenata oslonjenih na pretfabricirane prstenaste ploče te sa zračenim međuprostorom. 1 vanjska cijev, 2 zračni međuprostor, 3 dimovodna cijev 4 pretfabricirana prstenasta ploča

Manji se dimnjaci obično temelje na kružnoj punoj, a veći na kružnoj prstenastoj ploči. Primijeni li se okvorna prijelazna konstrukcija od ploče i kosih stupova, dimnjak se može temeljiti na četiri temelja samca (sl. 28). Naprezanje stupova je najmanje, a bočna krutost najveća ako se osi stupova sijeku približno na visini rezultante bočnog opterećenja. Da se spriječi horizontalno pomicanje temelja samaca, treba ih međusobno povezati štapovima.

U nas se kao primjeri industrijskih dimnjaka navode visoki dimnjaci u Rijeci i Zagrebu. Dimnjak Termoelektrane Rijeka I (sl. 29) visok je 175,5 m, a temeljen je na kotlovnici. Konstrukcija kotlovnice prostor je trokutan okvir koji zauzima tlocrtnu površinu 31 m × 31 m i visinu 70,5 m, tako da je ukupna visina ob-

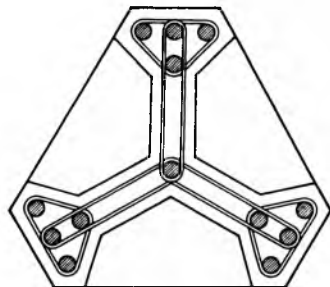


Sl. 28. Dimnjak s prijelaznom konstrukcijom između cijevi i temelja

Sl. 29. Dimnjak s kotlovnicom Termoelektrane Rijeka I

jekta gotovo 250 m. Dimnjak u sklopu pogona-Toplana u Zagrebu visok je 200 m. Projektiran je za temperaturu dimnih plinova 150...200 °C, a izveden u tzv. kliznoj tehnologiji. Konstruktivno je to armiranobetonska konzola svijetlog promjera 12,95 m na donjem i 7,20 m na gornjem kraju. Debljina je stijenke 45...20 cm.

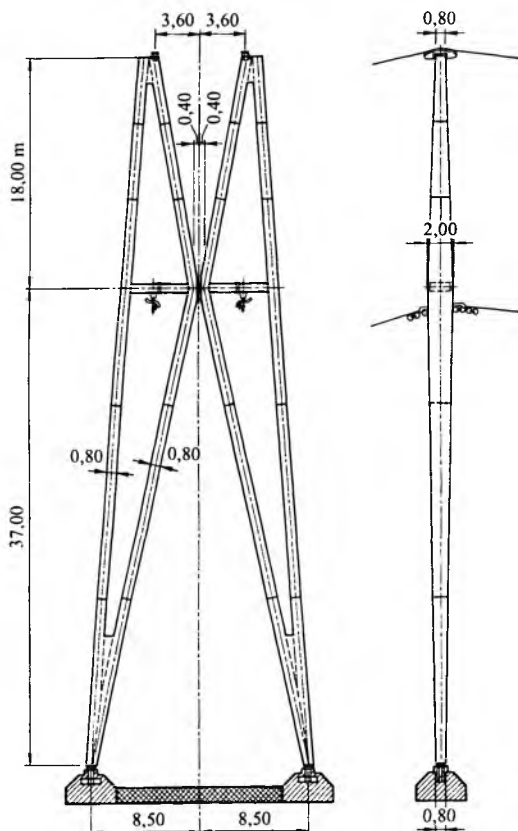
Dalekovodni stupovi čelične su rešetke ili punozidne konstrukcije s raščlanjenim (npr. križnim ili trokrakim) presjekom od prednapregnutog betona (sl. 30). Opterećenje od vodova razmjerno je maleno, a važniji su utjecaji vjetera i eventualnih potresnih uzbuđa. Stupovi moraju zadovoljiti ekonomske i estetske zahtjeve te se moraju lako montirati, jer se često postavljaju i na teško pristupačnim terenima. Ako je raspon vodova velik (premošćivanje zaljeva i morskih tjesnaca), stupovi moraju biti vrlo visoki. Vodovi koji premošćuju Messinski prolaz imaju raspon 3,3 km, pa su stupovi prostorne čelične rešetke visoke 220 m.



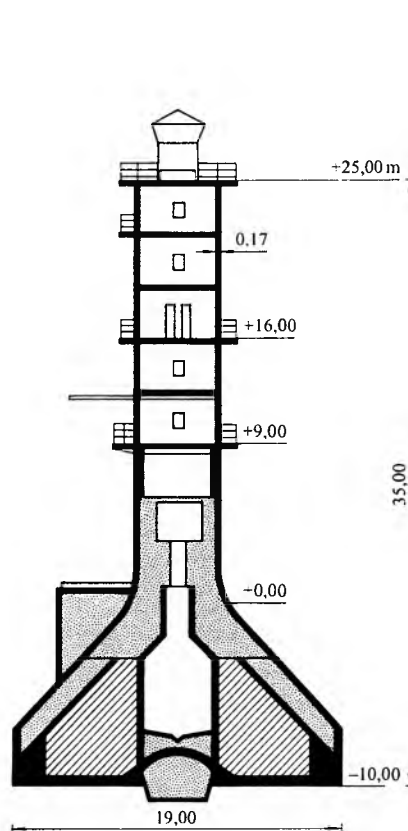
Sl. 30. Poprečni presjek dalekovodnog stupa od prednapregnutog betona

Stupovi žičara. Kao primjer stupova žičare može poslužiti jedan od dva obalna stupa žičare preko Ciriškog jezera (sl. 31), visoka 55 m i međusobno udaljena 1007 m. Na svome su vrhu stupovi opterećeni nosivom užadi, a preko prečke i vučnom užadi. Zavareni sandučasti štapovi međusobno su spojeni vijcima. U smjeru užadi piloni djeluju kao pendel-stupovi.

Svjetionici su izloženi jakom vjetru i često moraju biti otporni na udare valova, tlak leda i udar broda. Težište konstrukcije mora



Sl. 31. Pilon žičare preko Ciriškog jezera



Sl. 32. Primjer svjetionika na Sjevernom moru

biti što niže radi lakšeg postizanja stabilnosti od prevrtanja (sl. 32).

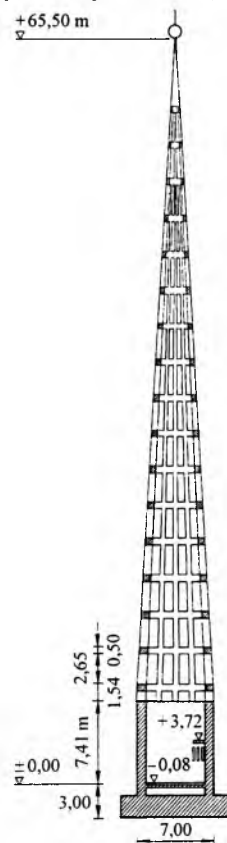
Sakralni tornjevi čest su graditeljski element. Pri projektiranju vitkih zvonika treba nastojati da osnovna vlastita frekvencija njihovih bočnih vibracija bude barem 20...25% viša od frekvencije zvona, da bi se spriječila rezonancija i velike amplitude vibracija. Na slici 33 prikazan je vertikalni presjek jednog od dvaju zvonika gradske župne crkve *Don Bosco* u Augsburgu, sagrađene 1960/61. godine. Piramidna konstrukcija visoka je 65,5 m i građena je od 16 pretfabriciranih stupaca povezanih prečkama, a stoji na 7,41 m visokom postolju.

TORANJSKE ZGRADE

Projektiranje toranjskih zgrada. Osnovni su zahtjevi konstruktivnog projekta dovoljna čvrstoća, krutost i stabilnost. Adekvatna bočna krutost potrebna je radi ograničavanja utjecaja drugog reda, dakle dodatnih momenata savijanja koji nastaju zbog pomaka hvatišta gravitacijskih sila, zatim zbog relativnih bočnih pomaka susjednih stropova da bi se spriječile štete na nenosivim dijelovima konstrukcije (npr. lomljenje prozorskih stakala) te zbog amplituda bočnih pomaka i ubrzanja pri vibracijama uzrokovanim vjetrom i potresom, a radi sprečavanja nelagodna osjećaja ljudi u zgradi.

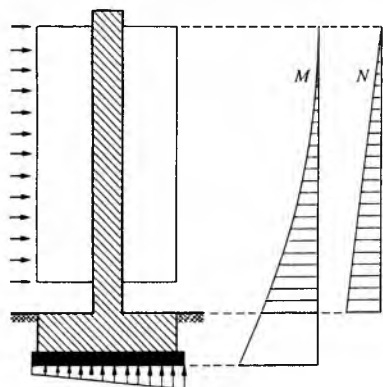
Dok u konstruktivnom projektiranju malih niskih zgrada prevladava utjecaj gravitacijskog opterećenja, a bočni utjecaji iziskuju eventualno samo neznatne dodatne troškove, u konstruktivnom projektiranju toranjskih zgrada prevladavaju bočni utjecaji i iziskuju velike dodatne troškove. Zanimljiva je ovisnost troška zgrade po jedinici površine stropne konstrukcije o broju katova. Trošak za stropove praktički ne ovisi o broju katova, trošak za stupove i zidove raste otprilike linearno, a trošak za bočno ukrućenje zgrade raste eksponencijalno s brojem katova.

Toranjske zgrade obično imaju jezgru. Ona sadrži dizala, stubišta, kabele, instalacije te eventualno sanitarne i druge pomoćne prostorije. Radi protupožarne zaštite u mnogim je zemljama propisano da se stubišta i dizala odvoje od ostalih prostorija protupožarnim zidovima. Jezgra mehanički predstavlja konzolu (sl.



Sl. 33. Zvonik župne crkve Don Bosco u Augsburgu

34). Ona se obično temelji na ploči preko roštilja od zidova (podrumske kutije) visokih jedan, dva, a ponekad i do pet katova; ima, dakle, jedinstven temelj, a to je i najpovoljnije rješenje za potresna područja i područja s podzemnim iskopima. Težište temeljne stope mora biti vertikalno ispod težišta zgrade kako bi naginjanje zgrade mogli uzrokovati tek vjetar i potres.



Sl. 34. Mehanička shema jezgre, dijagram momenta savijanja od bočnog opterećenja (M) i dijagram uzdužne sile od gravitacijskog opterećenja (N)

Starije toranjske zgrade i one građene 60-ih godina ovog stoljeća najčešće su prizmatične, tj. imaju konstantan presjek po visini. Poslije su se počeli graditi tornjevi kojima se presjek naviše smanjivao. Razvoju konstruktivnih sustava toranjskih zgrada bitno je pridonio F. Khan.

Preporuke za projektiranje. 1) S obzirom na opterećenje vjetrom poželjni su kružni tlocrti; slijede tlocrti u obliku pravilnih višekuta, a najnepovoljniji su nepravilni raščlanjeni tlocrti. 2) Smanjenjem horizontalnih presjeka zgrade naviše smanjuju se krakovi bočnih sila, a time i momenti savijanja u horizontalnim presjecima zgrade i u temeljnoj stopi. Tako se veličina presjeka prilagođuje veličini unutrašnjih sila i pridonosi uštedi materijala. 3) Gravitacijska opterećenja poželjno je što kraćim putem prenijeti na temelje, pa treba izbjegavati stropove velikih raspona, a vertikalne elemente (stupovi i zidovi) treba locirati osno jedan povrh drugog. Općenito, nepoželjna su skretanja i diskontinuiteti u prijenosu opterećenja. 4) Vertikalni ukrutni elementi, tj. oni koji sudjeluju u prijenosu bočnih opterećenja, moraju primati što veće gravitacijsko opterećenje. Ono smanjuje vlačna naprezanja nastala savijanjem i tako omogućuje uštedu čelika. To treba uzeti u obzir pri utvrđivanju tlocrtne dispozicije zidova i stupova. 5) Poželjno je da presjeci stupova i zidova budu po visini zgrade konstantni. S kotom presjeka zgrade smanjuju se unutrašnje sile, pa se tome prilagođuje čvrstoća presjeka, i to smanjenjem čvrstoće betona i količine armature. Poželjno je također da i stropovi budu međusobno jednaki, jer to pojednostavljuje izradbu. Važno je pravodobno odrediti položaj instalacijskih vodova kako bi se izbjegla bušenja greda i ploča za njihov razvod. 6) Statički proračun poslovnih objekata treba provesti s dovoljno velikim korisnim opterećenjem, kako bi se mogli pregradni zidovi po volji postavljati, a teški predmeti (trezori, namještaj itd.) sigurno i slobodno transportirati. 7) Instalacije trebaju biti neovisne o nosivoj konstrukciji. Nosiva je konstrukcija tada nešto skuplja, ali je moguća veća sloboda u projektiranju instalacija.

Građevni materijali i gradnja. Nosive se konstrukcije toranjskih zgrada grade od čelika, a u novije doba sve češće i od betona.

Prednosti su čelika manja težina, brža izvedba i veća arhitektonska fleksibilnost u upotrebi zgrade, a nedostaci su potreba dodatnih mjera za protupožarnu zaštitu, te ponekad nepovoljno dinamičko ponašanje zgrade pri udarima vjeta i potresima zbog neznatnog prigušenja i dugih perioda vlastitih bočnih vibracija. Prednosti su betona veća krutost zgrade, jače prigušenje vibracija, jeftina gradnja zgrada s mnogo jednakih elemenata i mogućnost rada suvremenim oplatnim tehnikama, a nedostaci su veća težina zgrade, što je nepovoljno s obzirom na veličinu presjeka vertikalnih nosivih elemenata i temelja, manja arhitektonska fleksibilnost pri eventualnim promjenama u upotrebi zgrade, veća krhkost ako je viša marka betona pa se duktilnost mora ostvariti prikladnim detaljiranjem armature, te dulje trajanje gradnje. U Europi, a osobito u nas, uglavnom se primjenjuje beton.

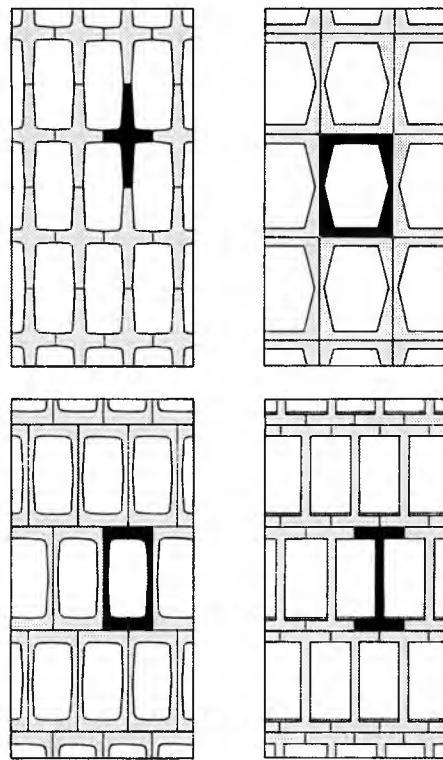
Betonske nosive konstrukcije grade se najčešće *in situ*, primjenom klizne oplate. *Postupkom podizanja ploča* (prema engl. *lift*-

-slab) najprije se montiraju stupovi, a stropovi – masivne, rebraste ili šuplje dvosmjerne ploče s otvorima oko stupova – betoniraju se na podu te se podižu hidrauličkim prešama na određeno mjesto i pričvršćuju za stupove pomoću metalnog ovrtnika. *Postupkom podizanja katova* (prema engl. *jack-block*) čitav se kat gradi na tlu i digne na određeno mjesto. Osim tih, uglavnom industrijaliziranih metoda, primjenjuje se i pretfabrikacija.

Mjere za sprečavanje progresivnog kolapsa. Nepredvidivi izvanredni utjecaji (eksplozija unutar ili izvan zgrade, udar zrakoplova ili vozila, sabotaža, preopterećenje i požar) mogu uzrokovati lokalni kolaps konstrukcije. U nekim konstruktivnim sustavima, npr. u konstrukciji od pretfabriciranih panoa koji nisu dovoljno čvrsto međusobno spojeni, lokalni kolaps može pokrenuti rušenje ostalih dijelova konstrukcije, tj. uzrokovati progresivni kolaps. Da se to ne bi dogodilo, trebalo bi nosivu konstrukciju toliko ojačati da je izvanredni utjecaji ne mogu oštetiti, što je s ekonomskog gledišta neprihvatljivo. Zato treba nosivu konstrukciju projektirati tako da ona pri izvanrednom utjecaju može lokalno kolabirati, ali da pritom ne potakne i progresivno kolabiranje većeg dijela ili cijele zgrade.

Prilikom eksplozije plina u tornju Ronan-Point u Londonu 1968. izbačen je jedan fasadni pano, pa su panoi iznad njega ostali bez ležaja i padali jedan za drugim, a njihovi su udari i udari ostalih predmeta lančano rušili donje dijelove konstrukcije. Studije su te katastrofe pokazale važnost integriteta nosive konstrukcije i solidnog povezivanja njezinih dijelova horizontalnim (poprečnim, uzdužnim i obodnim) i vertikalnim serklažima, potrebu da se uspostave dva ili više načina prijenosa opterećenja te potrebu što višeg stupnja statičke ili kinematičke neodređenosti konstrukcije.

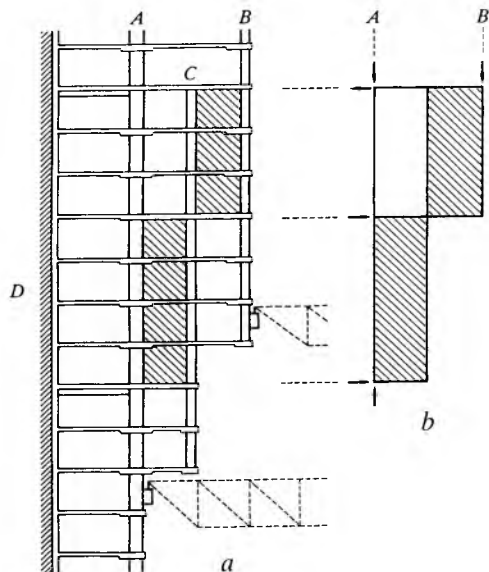
Zidovi-zavjese obično su troslojni panoi od otpornoga vanjskog sloja (lagani beton ili aluminij), lakoga srednjeg sloja koji toplinski izolira i unutrašnjeg sloja primjerena funkciji prostora koji zatvara. Pričvršćenje panoa na nosivu konstrukciju, obično stropove, mora omogućiti neovisno deformiranje nosive konstrukcije i panoa. Oslanjanje panoa na nosivu konstrukciju mora biti statički određeno, a potrebno je i dodatno, okomito oslanjanje na ravninu panoa. Zbog neizbježnih nepreciznosti izvedbe i nepredvidivih manjih deformacija potrebna je tolerancija od 2...3 cm. Pričvršćenje se postiže oslanjanjem ili vješanjem (vijčanim spojevima s ovalnim rupama, eventualno primjenom gumenih ploča). Na slici 35 prikazana su četiri rješenja nosivih fasada od pretfabriciranih panoa.



Sl. 35. Nosive fasadne konstrukcije od pretfabriciranih panoa

Prihvatna konstrukcija. Ako iz funkcionalnih ili kojih drugih razloga neke stupove nije moguće provesti do temelja, njihove akcije treba preuzeti nekom, najčešće skupom, prihvatnom konstrukcijom.

Na dva tornja blizanca u Chicago Mercantile Exchange, visoka 180 m (sl. 36a), trebalo je zbog velikih dvorana u nižim katovima prihvatiti 6 vanjskih stupova (B) koji nose 35 konzolno isturenih gornjih katova i njihove akcije prenijeti u 10,5 m udaljene glavne stupove (A) presjeka $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$. Prijenos je ostvaren pomoću dva 75 cm debela zida (od 9. do 12. i od 13. do 15. kata). Mehanička shema prijenosne konstrukcije (sl. 36b) pokazuje da se moment koji je rezultat prijenosa akcija stupova B na stupove A uravnotežuje momentom horizontalnih sila u stropovima. Oba su tornja izgrađena malo koso da bi se kompenzirali bočni pomaci zbog ekscentričnosti gravitacijskog opterećenja s obzirom na težište temeljne stope.



Sl. 36. Primjer prihvatne konstrukcije. A glavni, B vanjski i C pomoćni stup, D jezgra tornja

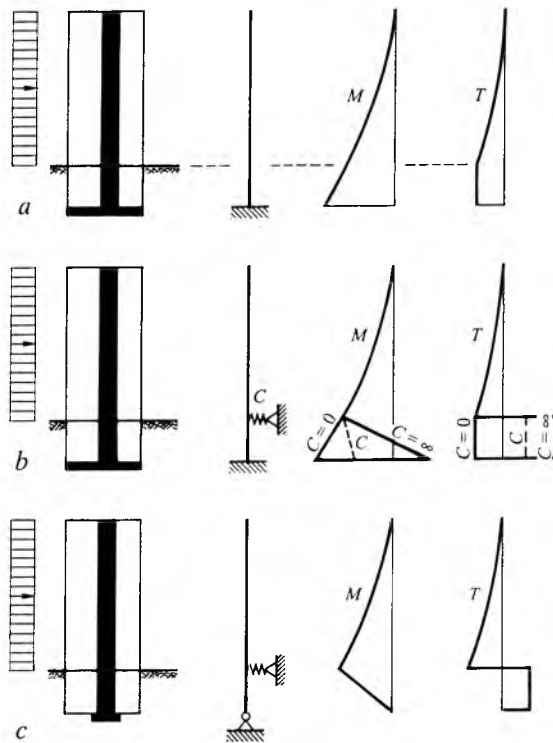
Tipični sustavi toranjskih zgrada. Osim klasičnih sustava sa zidovima, sustava s okvirima i sustava sa zidovima i okvirima primjenjuju se i noviji tipovi sustava, koji se često i međusobno kombiniraju.

Sustav s jezgrom i filigranskom vanjskom okvirnom cijevi. To je jedan od najčešćih sustava toranjskih zgrada umjerene visine. Naziva se i cijev u cijevi; jezgra je unutrašnja cijev, a vanjska je cijev prostorni skelet sa stupovima na fasadi i prstenastim gredama na visini stropova. Skelet je obično filigranski pa se ukupna bočna opterećenja pripisuju jezgri, a gravitacijska se opterećenja raspodjeljuju na obje cijevi prema doprinosnim tlocrtnim površinama.

Funkcija je prizemlja često različita od funkcije gornjih katova. Ako razmak stupova u prizemlju treba biti razmjerno velik i bez prihvatnog nosača iznad prizemlja, skelet mora biti širokog rastera, tj. razmak stupova u gornjim katovima bora biti isti kao i u prizemlju. U gornjim se katovima za priključak razdjelnih zidova i međusobno odvajanje prozorskih jedinica primjenjuju sekundarni stupovi, koji u ravni pročelja moraju biti uži od stupova da bi razlika između nosivih i nenosivih elemenata bila uočljiva.

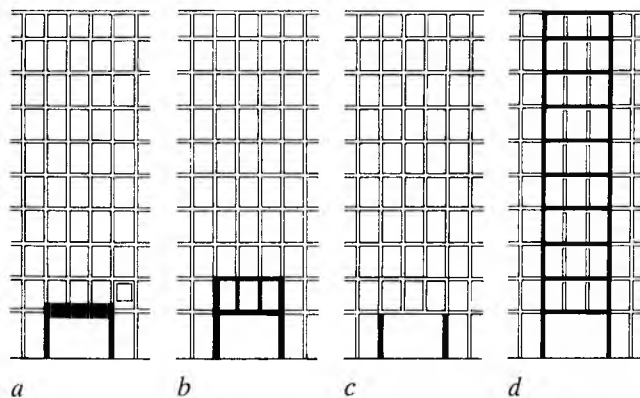
Temeljna je ploča obično zajednička za obje cijevi. Stabilnost se jezgre može ostvariti uklještenjem njezina donjeg kraja (sl. 37a) ili horizontalnim pridržanjem na razinama stropa podrum-ske kutije, te tla u temeljnoj stopi i uklještenjem donjeg kraja (sl. 37b). Stanje unutrašnjih sila tada znatno ovisi o krutosti C horizontalnog pridržanja. Obično se pretpostavlja da je $C = \infty$, pa moment savijanja jezgre u području podruma mijenja predznak, a poprečna je sila vrlo velika i iziskuje jaku poprečnu armaturu. Strop prenosi horizontalnu akciju jezgre u obodne podrum-ske zidove, pa je u svojoj ravni napregnut na savijanje i smicanje. Horizontalno pridržanje jezgre na dvjema razinama i prijenos njezina momenta uklještenja parom horizontalnih sila omogućuju i da se jezgra smatra zgloбно pričvršćenom za tlo (sl. 37c). Stranice te-

meljne ploče jezgre onda mogu biti mnogo kraće, jer je tlak u stopi raspodijeljen jednoliko. Vanjska se cijev temelji odvojeno.



Sl. 37. Tri načina uklještenja jezgre, pripadne mehaničke sheme, te dijagrami momenta savijanja (M) i poprečne sile (T)

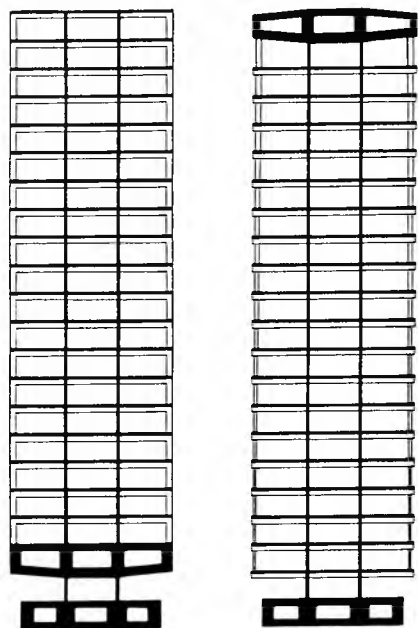
Na pročelju prizemlja često su potrebni široki otvori, pa jedan ili nekoliko stupova gornjih katova treba iznad prizemlja prihvatiti jakim masivnim nosačem (sl. 38a). Bolja su rješenja okvirni i zidni nosač na cijeloj visini prvog kata. Okvirni nosač (sl. 38b) dopušta prozore, ali treba skupu složenu armaturu i prilično je savitljiv, a zidni nosač (sl. 38c) ne dopušta prozore, ali je ekonomičniji i krući. Moguće je rješenje i rešetka koja dopušta prozore, ali kosnici ostaju vidljivi, što je estetski nepovoljno. Iskustvo je pokazalo da je za prihvat velikog opterećenja konstruktivno povoljnija jedna vrlo jaka greda nego više slabijih greda. Navedena su rješenja ekonomičnija od skeleta širokog rastera (sl. 38d).



Sl. 38. Konstruktivna rješenja koja omogućuju široki otvor u pročelju prizemlja. a) jaki masivni nosač, b) okvirni nosač, c) zidni nosač, d) skelet širokog rastera

Ako se želi da prizemljem prolazi samo jezgra, svi stupovi obodnog skeleta trebaju završiti iznad prizemlja, pa je za njihov prihvat potrebna jaka prostorna konzolna konstrukcija koja je masivna, šuplja ili raščlanjena u rešetku, a često je i dominantan izraz arhitekture zgrade. Ona se može nalaziti neposredno iznad prizemlja zgrade (sl. 39a). Zgrade s prihvatnom konstrukcijom na krovu (sl. 39b) pogrešno se nazivaju visećim zgradama. Njihova je prednost mala širina fasadnih stupova, a nedostatak su im ver-

ticalni pomaci vanjskih i unutrašnjih ležajeva stropova, jer je jezgra tlačena pa se skraćuje, a obodni su stupovi zategnuti pa se produljuju, zatim potreba protupožarne zaštite obodnih stupova, te visoka cijena zbog zaobilaznog prijenosa dijela gravitacijskog opterećenja preko krova. Denivelacija ležajeva stropova naniže postaje sve veća i uzrokuje prinudna naprezanja stropova, no ona se može smanjiti prednaprezanjem obodnih stupova.



Sl. 39. Sustav s jezgrom, filigranskom vanjskom okvirnom cijevi i prostornom konzolnom konstrukcijom neposredno iznad prizemlja (a), odnosno na krovu (b)

Izvedba je tog sustava složena i skupa; obično se najprije betoniraju jezgra i konzole, a tek onda stropovi. Ako ima mnogo katova, potrebna je još jedna prostorna konzolna konstrukcija koja se stavlja u tehničku ili instalacijsku etažu, ako tamo ne smeta.

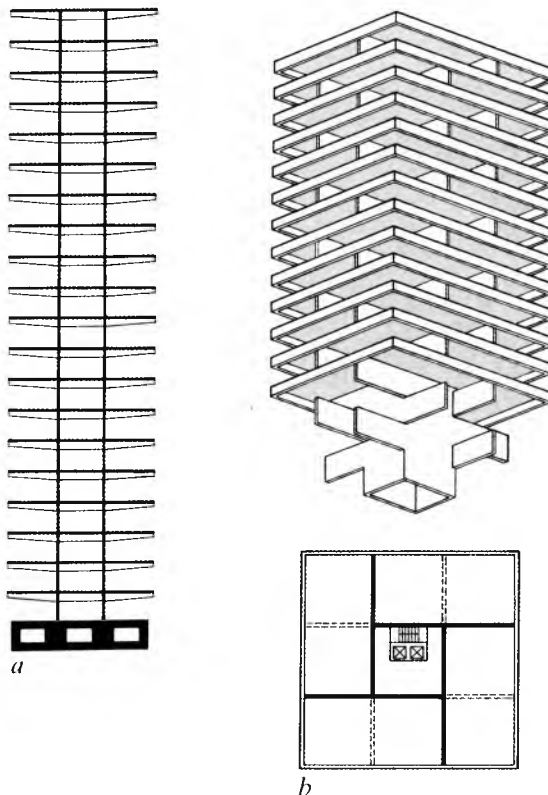
Sustav od jezgre i konzolnih stropova. U rješenju na slici 40 a stropovi se oslanjaju na konzolne grede promjenljiva presjeka koje su upete u zidove središnje jezgre. Konzola u usporedbi s prostom gredom istog raspona i opterećenja ima mnogo veće momente savijanja i poprečne sile, a posebno progibe, pa grede moraju biti vrlo visoke, što iziskuje mnogo čelika i potrebno nadvišenje oplata da bi progibi bili u dopuštenim granicama. Veliki inicijalni, tzv. elastični progibi zbog puzanja betona povećavaju se na približno trostruku vrijednost, pa je poželjno grede prednapregnuti. U rješenju na slici 40 b, umjesto grednih, primijenjene su naizmjenice u svakom drugom katu bitno kruće zidne konzole visine jednog kata. Stropovi su kvadratne dvosmjerne ploče, masivne ili rebraste, koje naizmjenice leže, odnosno vise na zidnim konzolama, a oslanjaju se i na zidove jezgre, te prstenastu obodnu gredu koja leži na krajevima konzola. Duljina je jedne od tlocrtnih stranica prostorija jednaka dvostrukom rasponu ploča, pa se time postiže znatna arhitektonska fleksibilnost. Prednosti su tog sustava slobodno prizemlje, veća sloboda u oblikovanju fasada, te uvođenje ukupnoga gravitacijskog opterećenja u jezgru, a time i smanjenje vlačnih naprezanja u jezgri koja su uzrokovana bočnim utjecajima. Nedostatak je sustava visoka cijena stropova.

Kako je jezgra obično oslabljena vertikalnim nizovima otvora za vrata, ona djeluje kao fleksijsko-posmična konzola. Njezine unutrašnje sile, deformacije i stabilitetna i dinamička svojstva najlakše se određuju Rosmanovom metodom sastavljenog štapa. Utjecaj se drugog reda može zanemariti ako za oba glavna smjera vrijedi da je

$$H \sqrt{\frac{G}{K}} \leq 0,6, \quad (23)$$

gdje je H visina zgrade od vrha do presjeka u kojem se jezgra može smatrati upetom, G ukupna težina zgrade po visini H za-

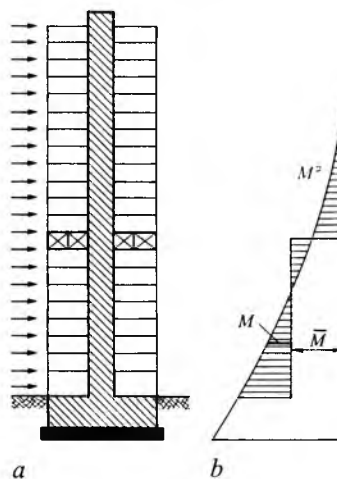
jedno s korisnim opterećenjem, a K je ekvivalentna fleksijska krutost presjeka jezgre u promatranom smjeru. Taj se uvjet osniva na spoznaji da je utjecaj drugog reda zanemariv dok je G mnogo manje od kritične težine zgrade koja uzrokuje bifurkaciju stanja ravnoteže, a osniva se na Eulerovoj jednadžbi za izvijanje fleksijskih štapova.



Sl. 40. Sustavi s jezgrom i konzolnim gredama (a), odnosno zidnim konzolama (b)

Sustav s jezgrom i stupovima. Ako je tlocrt zgrade raščlanjen, vanjski stupovi i prečke koje ih povezuju ne tvore uvijek i cijev. Mehaničko je ponašanje tog sustava analogno ponašanju prije opisanog sustava.

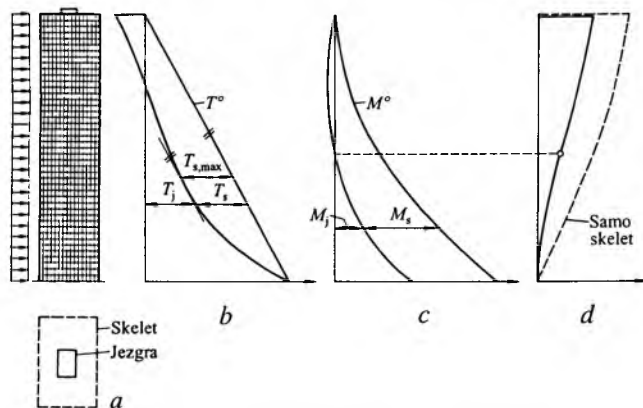
Sustav sa zidnim ili rešetkastim prečkama. Kao primjer tog sustava poslužit će sustav s jezgrom i obodnim stupovima, u kojemu se obodni stupovi preko zidnih ili rešetkastih prečaka (autrigera), uglavnom u instalacijskom katu, uključuju u prijenos konzolnih momenata savijanja od bočnih opterećenja (sl. 41a).



Sl. 41. Sustav sa zidnim ili rešetkastim prečkama (a) i dijagrami konzolnog momenta savijanja M^2 zgrade i momenta savijanja M jezgre (b). M moment kojim periferni stupovi rasterećuju jezgru

Zidne ili rešetkaste prečke postavljaju se u oba glavna smjera, a kako su visoke jedan, dva ili tri kata, fleksijski su tako krute da se mogu smatrati nedeformabilnim. Njihov se utjecaj u mehaničkoj shemi zgrade simulira horizontalno pomičnim djelomičnim ili potpunim uklještenjem jezgre na odnosnoj visini. One rasterećuju jezgru momentom savijanja $\bar{M}$ (sl. 41 b) koji ostvaruju obodni stupovi tlačnim silama na strani zgrade okrenutoj od vjetra, te vlačnim silama na strani zgrade okrenutoj prema vjetru. U manjoj mjeri sudjeluju i stupovi na fasadama paralelnim s opterećenjem.

Sustav s jezgrom i vanjskom okvirnom cijevi. Ako je unutrašnja cijev (jezgra) razmjerno malena poprečnog presjeka ili su bočna opterećenja vrlo velika, vanjska se cijev (prostorni skelet) projektira jačom, da bi obje cijevi sudjelovale u prijenosu bočnih opterećenja. Jednu od metoda utvrđivanja mjerodavnih unutrašnjih sila i deformacija pri bočnom i torzijskom opterećenju, te utvrđivanja kritičkih težina i dinamičkih karakteristika sustava razradio je R. Rosman (sl. 42). Po toj se metodi jezgra simulira fleksijsko-posmičnom konzolom, a vanjska cijev posmičnom konzolom. Obje su cijevi povezane stropnim diskovima. Ako su otvori jezgre razmjerno maleni, njihov se utjecaj može zanemariti, pa jezgra degenerira u fleksijsku konzolu. Tada se konzolna poprečna sila T° i konzolni moment savijanja M° raspodjeljuju na jezgru (T_j, M_j) i skelet (T_s, M_s). Zbog sudjelovanja opterećenja na dvije cijevi znatno se smanjuju i bočni progibi. Analiza pokazuje da se međudjelovanje obje cijevi uglavnom ostvaruje horizontalnom silom u najgornjem stropu.



Sl. 42. Sustav s jezgrom i vanjskom okvirnom cijevi (a), pripadni dijagrami poprečne sile (b) i momenta savijanja (c), te progibna linija (d)

Okvirne cijevi. To je sustav obično pravokutnog tlocrta, a sastoji se od obodnih stupova i prstenastih greda na razinama stropova, dakle od četiriju obodnih okvira i stropova. Prozori u pobočkama zgrade pravilno su raspoređeni, a međusobni je razmak stupova obično malen. Uzduž vertikalnih bridova zgrade obično se nalaze stupovi. Ponekad uzduž bridova nema stupova, pa se gredni prepusti sijeku pod pravim kutom.

Stupovi primaju gravitacijska opterećenja i djeluju kao dijagrame, tj. osiguravaju nepromjenljivost oblika horizontalnih presjeka zgrade. Ako su tlocrtno stranice zgrade velike, dodaju se unutrašnji stupovi koji omeđuju unutrašnju cijev (jezgru). Oni su vrlo vitki kako bi zauzimali što manje prostora, a tretiraju se kao pendel-stupovi. Vanjska cijev ekonomično prenosi sva bočna opterećenja jer su krakovi unutrašnjih sila vrlo veliki. Gravitacijska se opterećenja raspodjeljuju na vanjsku i unutrašnju cijev prema doprinosnoj tlocrtnoj površini. Ponekad se, međutim, unutrašnji stupovi na jednoj ili više razina oslanjaju na jaku stropnu konstrukciju koja njihove akcije prenosi na obodne stupove. I s obzirom na torziju taj je sustav vrlo čvrst i krut, jer krakovi parova sila na koje se torzijski momenti rastavljaju, jednaki tlocrtnim stranicama zgrade, imaju najveću moguću vrijednost.

Okvirne se cijevi grade od čelika i betona. Ako su prozori maleni, ravninski okviri u pobočkama zgrade postaju zidovi s vertikalnim nizovima otvora. Taj je sustav bočno bitno krući, a naziva se i *perforirana zidna cijev*.

U analizi utjecaja bočnih opterećenja okviru paralelni s ravninom opterećenja nazivaju se *hrptenim okvirima*, a oni okomiti na ravninu opterećenja *pojasnim okvirima*.

U analizi mehaničkog ponašanja okvirne cijevi izložene bočnom opterećenju prvo se analizira cijev s fleksijski apsolutno krutim, praktički vrlo jakim prstenastim gredama. Grede raspodjeljuju ukupno gravitacijsko opterećenje pripadnog stropa na stupove tako da su produljenja i normalna naprezanja svih stupova jednaka. Za utjecaj bočnih opterećenja vrijedi Bernoullijeva hipoteza ravnih presjeka i Navierova ravninska raspodjela normalnih naprezanja u poprečnim presjecima cijevi.

Ravnina kroz vertikalnu os, os krutosti zgrade, okomita na ravninu opterećenja, neutralna je ravnina. Ako u njoj ima stupova, oni se ne produljuju i nisu napregnuti. Produljenja i normalna naprezanja stupova hrptenih okvira prema vertikalnim bridovima zgrade brojčano se linearno povećavaju. Produljenja, odnosno normalna naprezanja svih stupova pojasnih okvira brojčano su najveća i međusobno su jednaka. Cijev se ponaša kao fleksijska konzola, njezina je progibna linija konveksna, gledano sa strane opterećenja, a određuje se na osnovi momenta inercije materijalnoga poprečnog presjeka cijevi, utvrđenog elementarnim metodama mehanike materijala. Hrpteni okviri prenose konzolne poprečne sile, a sudjelovanje pojasnih okvira u prijenosu konzolnih momenata ostvaruje se produljenjem bridnih stupova i prijenosom vertikalnih sila uzduž sastava hrptenih i pojasnih okvira.

U okvirnim cijevima s realno mogućim omjerima krutosti greda i stupova, zbog savijanja i smicanja greda uzrokovanih bočnim opterećenjem, poprečni se presjeci cijevi torzijski iskrivljuju, tj. nastaju odstupanja od ravninske raspodjele produljenja i normalnih naprezanja po poprečnim presjecima. Mehaničko ponašanje sustava tada je nepovoljnije. Najjače su opterećeni bridni stupovi, a opterećenje se stupova pojasnih okvira smanjuje od bridova prema sredini okvira. U približnim proračunima ta se činjenica uzima u obzir uvođenjem sudjelujuće širine pojasnih okvira (slično se pri dimenzioniranju armiranobetonskih greda T-presjeka koje su opterećene u ravnini hrpta računa sa sudjelujućom širinom pojasne ploče). Prema istraživanjima B. Taratanatha sudjelujuća širina pojasnih okvira iznosi $\sim 15 \cdots 20\%$ njihove stvarne širine.

Stupovi su okvirnih cijevi pri bočnom opterećenju aksijalno napregnuti na vlak ili tlak, te na savijanje u ravnini pripadnog okvira, a bridni su stupovi napregnuti na savijanje u ravninama obaja okvira. Koso se savijanje može spriječiti ako se stupovi ne smještaju uzduž bridova zgrade. Gravitacijsko opterećenje reducira ili eliminira vlačne sile u stupovima.

Zbog konzolnih momenata savijanja, tj. produljenja stupova, bočnim se progibima cijevi superponira doprinos konzolnih poprečnih sila, tj. savijanja i smicanja stupova i prečaka. Što su grede kruće i što je cijev vitkija, to su manja odstupanja od tehničke teorije savijanja pa je cijeli sustav ekonomičniji.

Analiza se utjecaja torzijskog opterećenja cijevi može provesti samo približno. Torzijski se momenti rastave u četiri međusobno jednake sile u pobočkama cijevi. Ako je presjek cijevi kvadratan, nema torzijske iskrivljenosti (deplanacije) presjeka i produljenja stupova, a ako presjek nije kvadratan, utjecaj se produljenja stupova zanemaruje. Donji se kraj cijevi ne može torzijski iskriviti zbog krutosti podrumске kutije.

Rešetkasto-okvirna cijev. To je sustav obično pravokutnog tlocrta, a sastoji se od obodnih stupova, obodnih prstenastih greda na razinama stropova i kosnika u pobočkama zgrade. Sastoji se, dakle, od prostornog okvira i prostorne rešetke koji djeluju zajednički. Taj je sustav neusporedivo krući od okvirne cijevi. Rešetka reducira torzijsku iskrivljenost poprečnih presjeka cijevi pri gravitacijskom i pri bočnim opterećenjima do te mjere da se ona može zanemariti, pa se time bitno poboljšava mehaničko ponašanje sustava. Pri gravitacijskom opterećenju rasterećuju se rubni i dodatno opterećuju bridni stupovi, pa se njihova produljenja, odnosno normalna naprezanja izjednačuju, a momenti se savijanja od bočnih opterećenja uvode kao parovi sila u bridne stupove. Bridni su stupovi, dakle, pojasovi rešetke, pa moraju imati prikladne presjeke. Visina greda može tada biti manja, razmak stupova veći, a širina je njihovih stranica u ravnini pobočke zgrade manja nego u okvirnoj cijevi. U čvorovima rešetke u bridovima zgrade uvode se u prstenaste grede horizontalne komponente sila u kosnicima, pa one djeluju kao zatege.

Mehaničko ponašanje rešetkasto-okvirnih cijevi pri bočnom opterećenju uglavnom odgovara fleksijskoj konzoli; progibna je linija konveksna, gledano sa strane opterećenja. Eventualna unutrašnja cijev od pendel-stupova oko jezgre ne sudjeluje u preuzimanju bočnih opterećenja i nije sastavni dio ukutnog sustava.

To je mehanički i ekonomski povoljno rješenje nosive konstrukcije toranjskih zgrada dalo nove poticaje razvoju arhitekture.

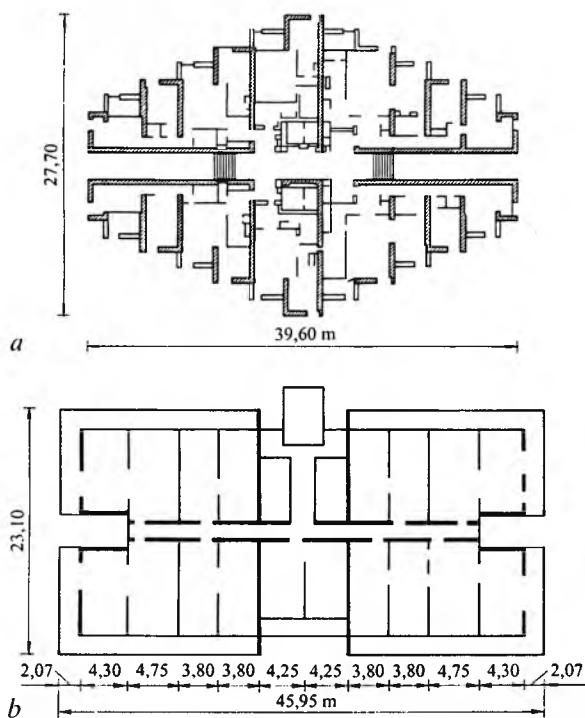
Višećelijske cijevi. U višećelijskim cijevima ravninski se ukrutni elementi nalaze, osim u pobočkama, i u unutrašnjosti zgrade. Vanjski su elementi obično okvirni da bi se dobila pravokutna polja za prozore, a unutrašnji su rešetkasti ili okvirni da bi se izbjegli kosnici. Glavna je prednost višećelijskih cijevi u tome što pojasni okviri sudjeluju u punoj mjeri i bez redukcije širine u prijenosu bočnih opterećenja.

Megastrukturni sustav sastoji se od nekoliko višekatih ili mnogokatnih jedinica, često različita tlocrta.

Primjeri toranjskih zgrada. *Armiranobetonske zgrade s poprečnim i uzdužnim zidovima.* Stambena toranjska zgrada L'île verte (sl. 43 a) u Grenobleu nalazi se u području jakih potresnih uzbuđa. Od vrha podrumске kutije visoka je 100 m. Zidovi su u donjem dijelu debeli 40 cm, a naviše se stanjuju do 16 cm. Stropne su ploče debele 16 cm.

Stambena toranjska zgrada Colonia (sl. 43 b) u Kölnu, sagrađena 1972, sastoji se od poprečnih zidova debljine do 35 cm, dvaju uzdužnih zidova, jednosmjernih stropnih ploča raspona 4,75 m i debljine 18 cm, te dvokatne podrumске kutije. Visina je zgrade iznad tla 138 m.

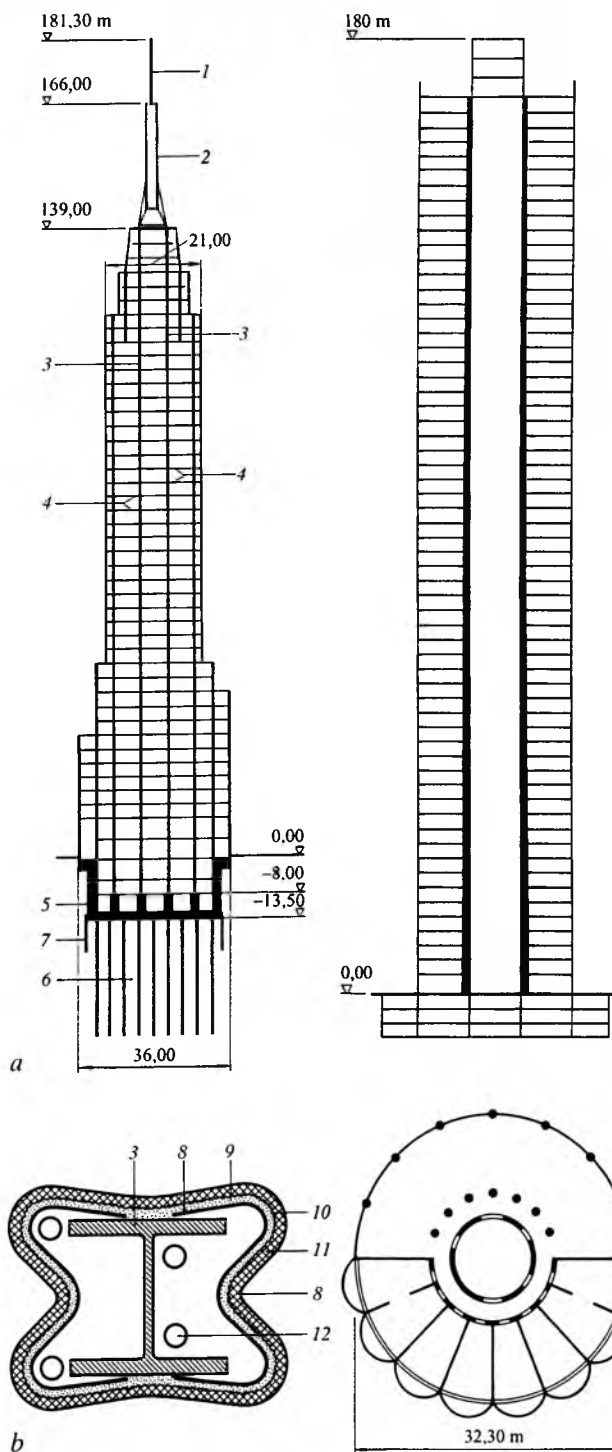
Zgrade s jezgrom i filigranskom vanjskom cijevi. Stambene toranjske zgrade Marina City (sl. 45) u Chicagu, sagrađene 1961, sa 60 katova i visinom od 180 m, imaju središnju šuplju valjkastu jezgru promjera 9,75 m, 16 obodnih stupova, radijalne grede i masivne stropne ploče. Donjih dvadeset katova služi parkiranju. Ispod 2 m debele armiranobetonske temeljne ploče nalaze se betonski kesoni. Zgrade su betonirane *in situ*, najprije jezgra do vrha, a tek onda stupovi i stropovi. Dobile su nadimak kukuruzni klipovi i postale obilježjem Chicaga. Oblikovno im je sličan hotel



Sl. 43. Tlocrti dviju toranjskih zgrada s armiranobetonskim poprečnim i uzdužnim zidovima. a zgrada L'île verte u Grenobleu, b zgrada Colonia u Kölnu

U Zagrebu se među tom vrstom toranjskih zgrada ističe poslovna zgrada Zagrepčanka (v. *Javne zgrade*, TE 6, str. 603).

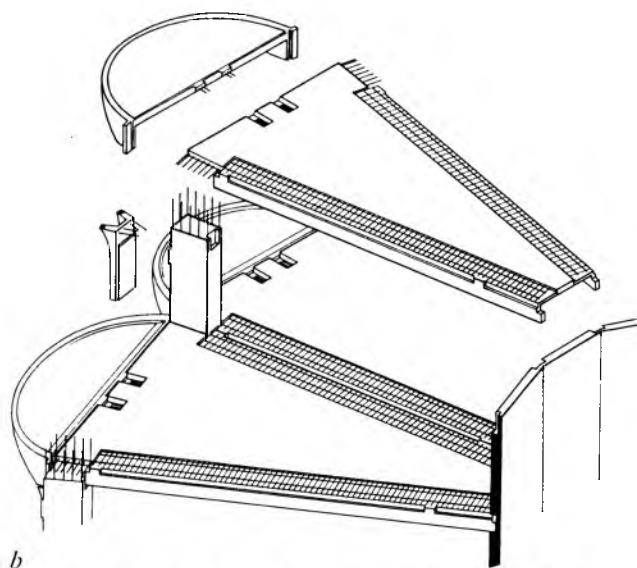
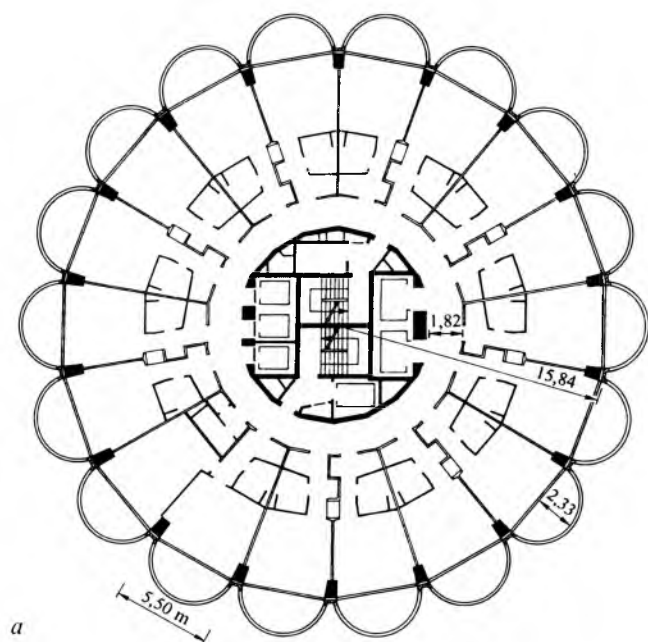
Zgrade s prostornim skeletom. Četrdesettrokatna toranjska zgrada La Latino-Americana (sl. 44) u Ciudad de México primjer je zgrade s prostornim skeletom (v. *Skeletne konstrukcije*, TE 12, str. 115). Sagrađena je 1952/53. u području s jakim i čestim potresima. To je prostorni čelični okvir od valjanih profila spojenih zakovicama. Tlocrt je kvadratan sa stranicama duljine 36 m u donjem i 21 m u gornjem dijelu; razmak je stupova 6 m u oba smjera. Stropovi su betonske ploče, a djeluju spregnuto s prečkama okvira. Pročelja od aluminija i stakla istaknuta su 1,50 m preko obodnih stupova i ne sudjeluju u prijenosu opterećenja. Stupovi su staklenom vunom zaštićeni od požara.



Sl. 44. Vertikalni presjek toranjske zgrade u Ciudad de México (a) i poprečni presjek stupa i njegove zaštite (b). 1 antena, 2 televizijski stup, 3 stup, 4 stropovi, 5 koritasta temeljna ploča, 6 piloti, 7 žmurje, 8 lim, 9 staklena vuna, 10 žičana mreža, 11 žbuka, 12 vodovi

Sl. 45. Vertikalni presjek i tlocrt stambene toranjske zgrade u Chicagu

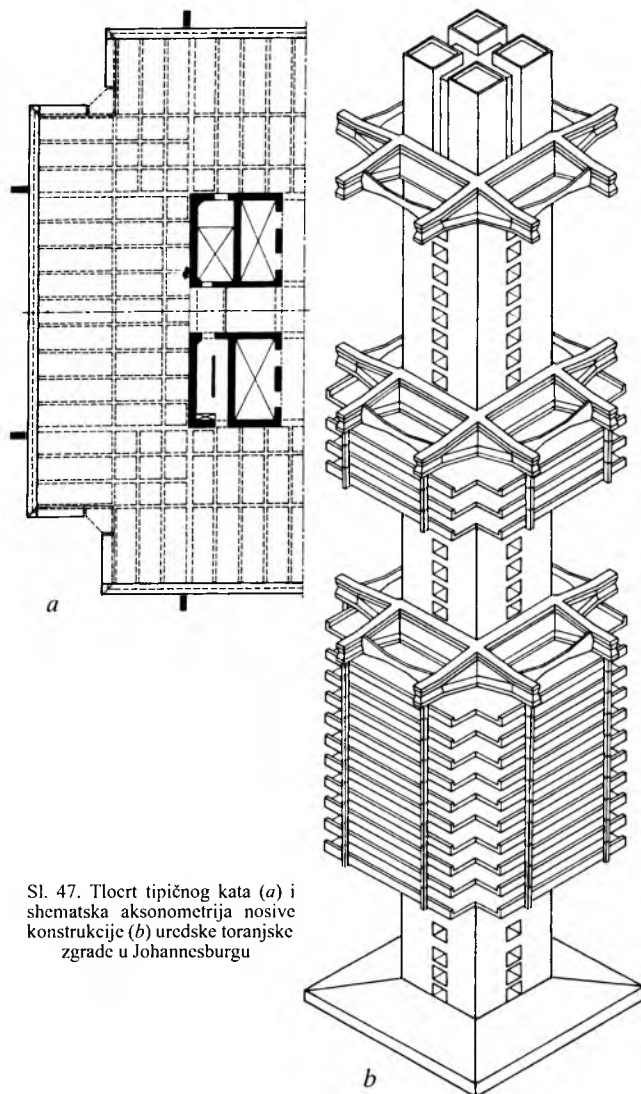
Holiday Inn (sl. 46) u Augsburgu. Zbog velikog broja katova i cikličke simetrije tlocrta bilo je potrebno mnogo jednakih stropnih elemenata složena oblika, pa se pretfabrikacija pokazala najekonomičnijim načinom gradnje.



Sl. 46. Tlocrt (a) i detalji (b) hotelske toranjske zgrade u Augsburgu

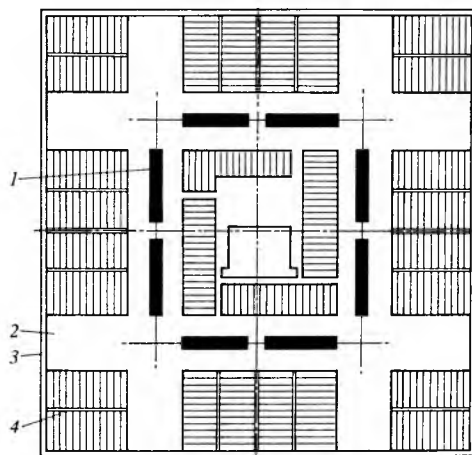
Toranjska zgrada Standard Bank Centre (sl. 47) u Johannesburgu visoka je 139 m. Jezgra se sastoji od četiri profilirana stupa koji sadrže stubišta, dizala i sanitarne prostorije, a međusobno su povezani prečkama. Po visini zgrada ima tri jedinice od po 9 uredskih katova. Stropovi se oslanjaju na jezgru, a s vanjske su strane obješeni na visoke konzole u tehničkim etažama. Tlocrt je kvadrat s izrezanim uglovima. Jezgra zauzima samo ~20% tlocrtnu površine i ona jedina prolazi prizemljem. Zgrada ima 5 podzemnih etaža, a na vrhu su strojevi za dizala, spremnici za vodu i klimatizacijski uređaji. Pročelja su zgrade od stakla, aluminija i obrađenog betona.

Zgrade od jezgre i konzolnih stropova. Sedamnaesterokatna apartmanska toranjska zgrada Barras Heath (sl. 48) u Coventryju ima kvadratnu jezgru od 8 zidova (1) i strop od roštilja niskih glavnih greda (2) koje se oslanjaju na jezgru, obodnih greda (3), sekundarnih greda (4) koje se oslanjaju na glavne grede i obodnu gredu, te rebrastih jednosmjernih ploča koje se oslanjaju na



Sl. 47. Tlocrt tipičnog kata (a) i shematska aksonometrija nosive konstrukcije (b) uredske toranjske zgrade u Johannesburgu

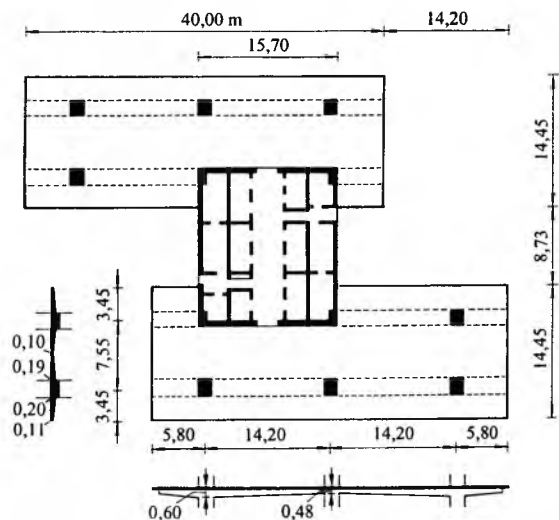
glavne i sekundarne grede. Stranice su kvadratnog tlocrta duge 18,9 m. Zgrada je izgrađena postupkom podizanja katova.



Sl. 48. Tlocrt toranjske zgrade u Coventryju od jezgre i konzolnih stropova. 1 zidovi, 2 glavne grede, 3 obodne grede, 4 sekundarne grede

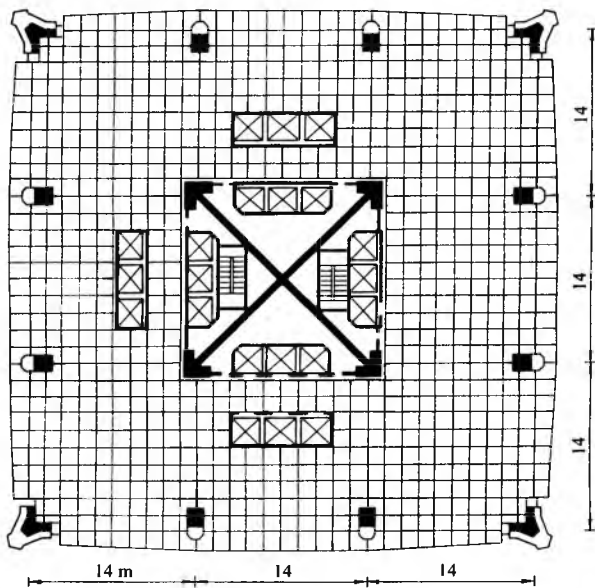
Zgrade s jezgrom i stupovima. Četrdeseterokatna poslovna toranjska zgrada u Frankfurtu na Majni ima središnju jezgru i dva antimetrično locirana krila sa stupovima (sl. 49). Stropovi su masivne jednosmjerne ploče parabolična podgleda, oslonjene na niske podvlake linearno promjenljive debljine.

Zgrade sa zidnim ili rešetkastim prečkama. Nervijeva 45-katna administrativna toranjska zgrada (sl. 50) izgrađena 1967. u



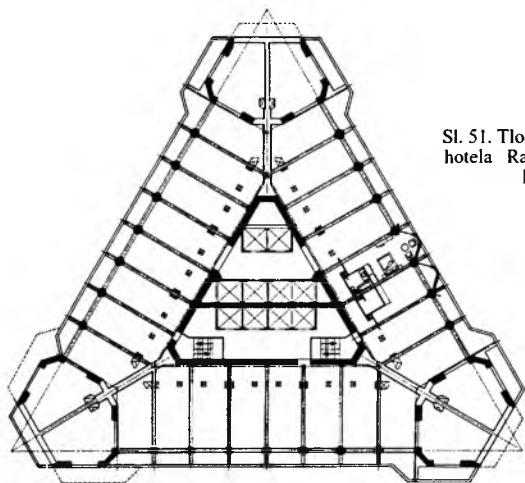
Sl. 49. Tlocrt tipičnog kata poslovne toranjske zgrade u Frankfurtu na Majni.

Montrealu ima u središnjem dijelu križnu jezgru, a u trima tehničkim etažama zidne ili rešetkaste prečke (autrigreri) spajaju zidove jezgre s uglovnim stupovima i tako znatno povećavaju čvrstoću i bočnu krutost zgrade. Specifičnost je jezgre da nije oslabljena vertikalnim nizovima otvora, pa djeluje kao fleksijska konzola.



Sl. 50. Nervijeva administrativna toranjska zgrada u Montrealu

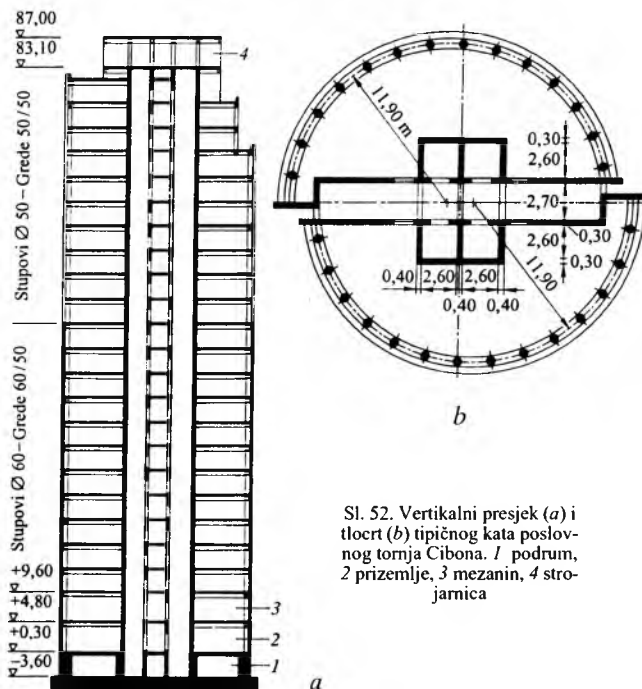
Zgrade s jezgrom i vanjskom okvirnom cijevi. Hotel Ramses-Hilton dominira silhuetom Kaira. Vertikalnu nosivu i ukrutnu



Sl. 51. Tlocrt tipičnog kata hotela Ramses-Hilton u Kairu.

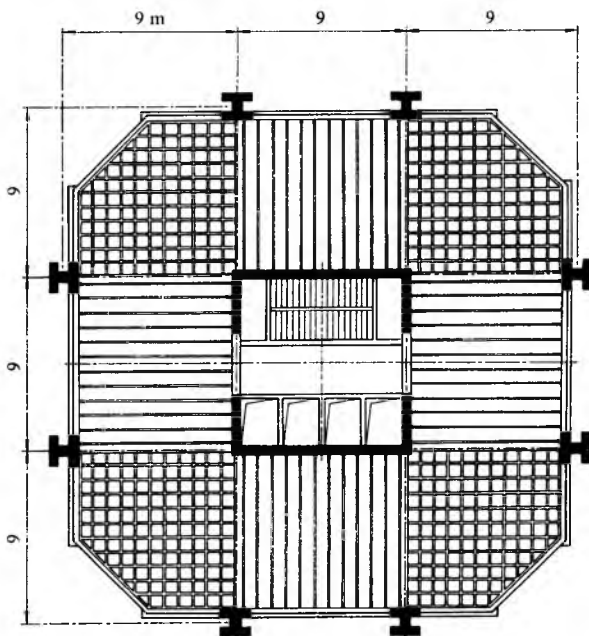
konstrukciju tog 120 m visokog hotela čine dvije cijevi: središnja trokutna jezgra i obodni okviri. Stropovi su 12 cm debele jednosmjerne ploče na gredama. Zgrada ima 30 katova sa sobama (sl. 51), 4 kata restorana, holova i prostorija za administraciju, 2 kata za mehaničke uređaje te razglednu terasu na vrhu. Temeljena je na 2,60 m debeloj ploči i na 900 pilota.

Poslovni toranj Cibona (sl. 52) u Zagrebu sastoji se od dva poluvaljka polumjera ~13 m, međusobno pomaknuta za 1,80 m. Tlocrtna je površina 485 m². Toranj ima podrum, prizemlje, mezanin, 21 kat i strojarnicu na vrhu. Nosivu konstrukciju čine četiri armiranobetonske *in situ* izvedene središnje jezgre, fasadni okviri s okruglim stupovima i stropne ploče. Ukupna visina od temeljne ploče do vrha strojarnice iznosi 90,6 m.



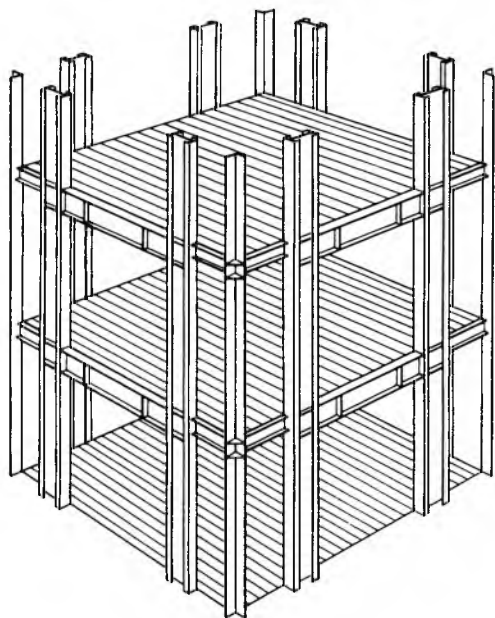
Sl. 52. Vertikalni presjek (a) i tlocrt (b) tipičnog kata poslovnog tornja Cibona. 1 podrum, 2 prizemlje, 3 mezanin, 4 strojarnica

Zgrade s jezgrom, obodnim okvirima i zidnim i rešetkastim prečkama. U točkama na trećinama visine administrativne toranjske zgrade u Bratislavi zidovi jezgre u oba su glavna smjera spojeni s obodnim stupovima zidnim ili rešetkastim prečkama (autrigrerima) visokim jedan kat. U ravninama pročelja stupovi s jakim gredama tvore 4 ravninska okvira. Visina je tornja 113 m (sl. 53).



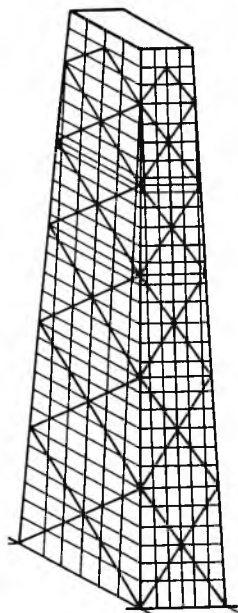
Sl. 53. Tlocrt tipičnog kata administrativne toranjske zgrade u Bratislavi

Okvirnocijevne zgrade. Shematska aksonometrija odsječka jedne okvirne cijevi prikazana je na slici 54. Primjer su takve konstrukcije toranjske zgrade World Trade Center u New Yorku, visoke 412 m (110 katova), tlocrtna površina $63,5 \text{ m} \times 63,5 \text{ m}$.



Sl. 54. Odsječak okvirne cijevi

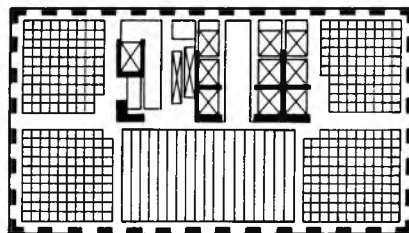
Rešetkasto-okvirne cijevne zgrade. Prva je takva zgrada John Hancock Center u Chicagu, sagrađena 1969, ima stotinu katova, a visoka je 344 m. Zgradu je kao čeličnu konstrukciju u obliku obeliska (sl. 55) projektirao F. Khan. Zgrada poput malog grada sadrži stanove, urede, studije, garaže, predvorja, trgovine i restorane. Nosiva su konstrukcija okviri od stupova i prečaka ukrućenih dvostrukim dijagonalama u pobočkama zgrade. Konstrukcija nije skrivena iza pročelja nego estetski sudjeluje u arhitekturi zgrade.



Sl. 55. Zgrada John Hancock Center u Chicagu

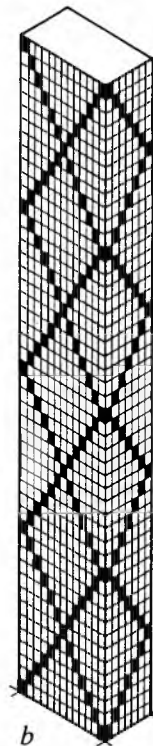
Prva zgrada od betonske rešetkasto-okvirne cijevi sagrađena je nekoliko godina poslije u New Yorku i postala je prototipom za više sličnih objekata (sl. 56). Prizmatična je, visoka 174 m, ima 50 katova, a tlocrtna joj je površina $38 \text{ m} \times 21 \text{ m}$, pa je omjer visine i manje tlocrtna stranice 8:1. Obodni su stupovi u ravni pročelja široki 1,20 m, a dubina im je 61 cm na donjem, do 36 cm na gornjem dijelu. Osnovi su razmak stupova 3,0 m, a širina prozora 1,6 m. Stropovi su 38 cm debele jednosmjerne i dvosmjerne re-

braste ploče, obodna su rebra iste debljine kao i unutrašnja. Dijagonale su u užim pobočkama zgrade jednostruke, a u širim dvostruke. One su ostvarene betonskim panoima iste debljine kao i stupovi (umjesto prozora) u poljima između stupova i prečaka. Dijagonale su pri bočnim opterećenjima napregnute osno, ali djeluju i kao posmični elementi. U čvorovima cijevi uzduž vertikalnih bridova zgrade nastaju, zbog tlačnih sila u dijagonalama, horizontalni potisci orijentirani prema van; oni se uravnotežuju vlačnim silama u prstenastim gredama koje djeluju i kao zatege. Tri tlocrtno razmjerno malene jezgre samo neznatno pridonose čvrstoći i bočnoj krutosti zgrade.



a

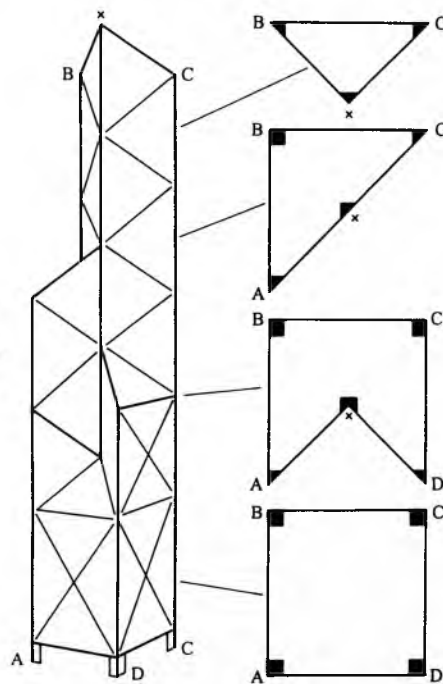
Sl. 56. Tlocrt tipičnog kata (a) i aksonometrija (b) prve zgrade od betonske rešetkasto-okvirne cijevi (New York)



b

Megastrukturne zgrade. Hongkonška toranjska zgrada Bank of China (sl. 57) ima 76 katova. U najnižem je dijelu kvadratno-prizmatična, sa stranicom duljine 48 m. Tlocrtno naviše izostavljen je jedan po jedan kvadrant kvadrata, pa u najvišem dijelu zgrade ostaje tek jedan kvadrant. Primarna je nosiva konstrukcija

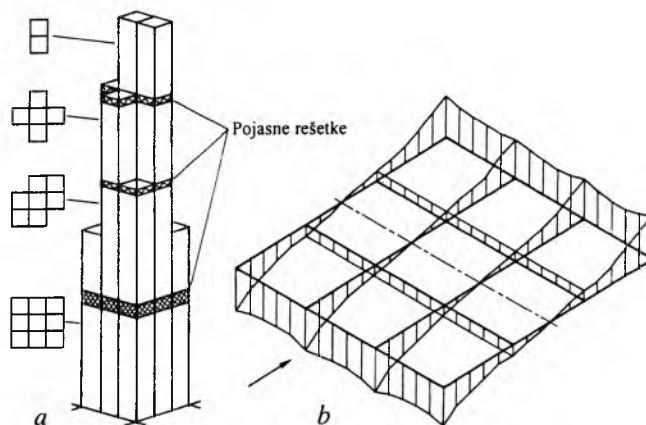
Sl. 57. Perspektiva i horizontalni presjeci toranjske zgrade Bank of China u Hong Kongu



sastavljena od 8 čeličnih rešetaka u pobočkama i dijagonalnim ploham prizme. Visine su rešetaka različite u pojedinim visinskim područjima zgrade. Svaka od 8 ravninskih rešetaka ima vlastite pojasove, pa nema trodimenzijskih čeličnih čvorova, a stupovi i pojasovi susjednih rešetaka spregnuti su obavijanjem armiranim betonom. Tako je izvedbeno vrlo jednostavno postignuto prostorno međudjelovanje ravninskih rešetaka. Od vrha zgrade naniže svakih se 13 katova gravitacijsko opterećenje prenosi horizontalnim rešetkastim pločama u bridne stupove tornja. Bridni stupovi nose gotovo cijelu težinu zgrade. Stup u osi najnižeg dijela zgrade seže od vrha do 25. kata, pa katovi ispod njega daju velik slobodan prostor za bankovne prostorije. Zgrada je temeljena na kesonima koji dopiru do granitnog sloja.

Sears Tower u Chicagu, sagrađen 1974, visok je 443 m, među najvišim je zgradama na svijetu (110 katova). Konstruktivni sustav je višestupnijska okvira cijev ukrucena na trima razinama pojasnim rešetkama (sl. 58). U donjem se dijelu tlocrt sastoji od 9 kvadratnih modula sa stranicama duljine 24 m, a raster je stupova 4,80 m. Slobodne tlocrtne površine u modulu iznose 24 m × 24 m. Moduli završavaju na različitim razinama pa na vrhu ostaju još samo dva modula. Analizom se pokazalo da je torzijska iskrivljenost poprečnih presjeka zgrade pri bočnom opterećenju neznatna, pa se sustav ponaša kao fleksijska konzola.

Toranj zgrade Bank of Southwest u Houstonu jedinstvene je nosive konstrukcije. Ima 82 kata, a visoka je 372 m. Stranice su kvadratnog tlocrta duge 50,3 m. Osnovnu vertikalnu konstrukciju čini 8 bočnih kompozitnih stupova od čelika i armiranog betona. Stupovi su međusobno povezani s 8 prostornih, po 9 katova visokih rešetaka, sastavljenih od po 4 trokutne ravninske rešetke (sl. 59). Funkcija je rešetaka da nose sekundarne stupove u unutrašnjosti zgrade i prenose njihove akcije na bočne stupove, da primaju poprečne sile od bočnih opterećenja, da ih prenose na donji dio sustava i djeluju kao posmični elementi između bočnih

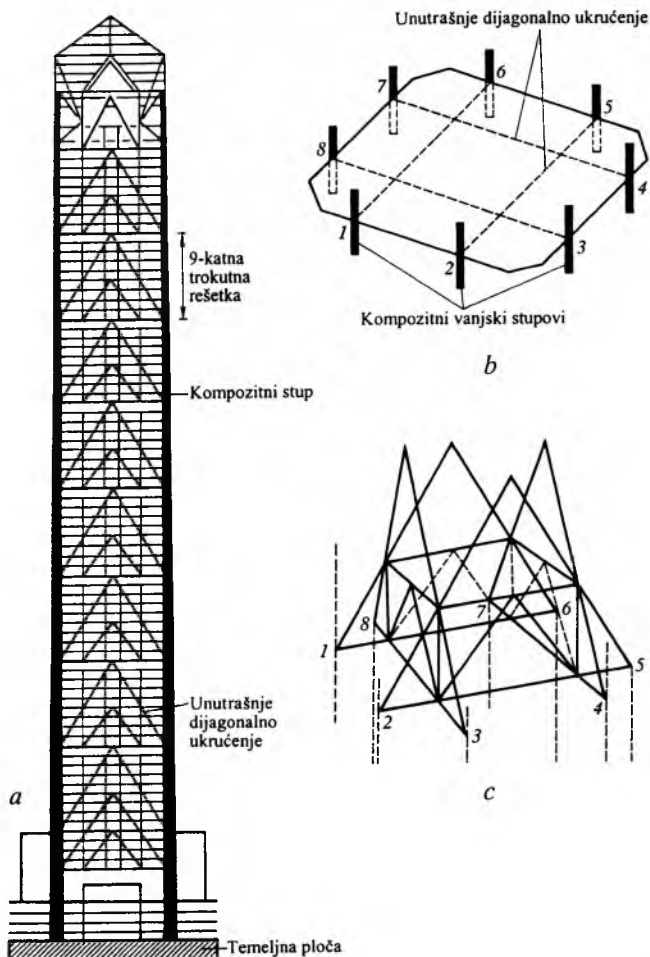


Sl. 58. Zgrada Sears Tower u Chicagu. Aksonometrija s horizontalnim presjecima (a) te dijagram produljenja stupova u kritičnom presjeku na donjem kraju cijevi pri bočnom opterećenju (b)

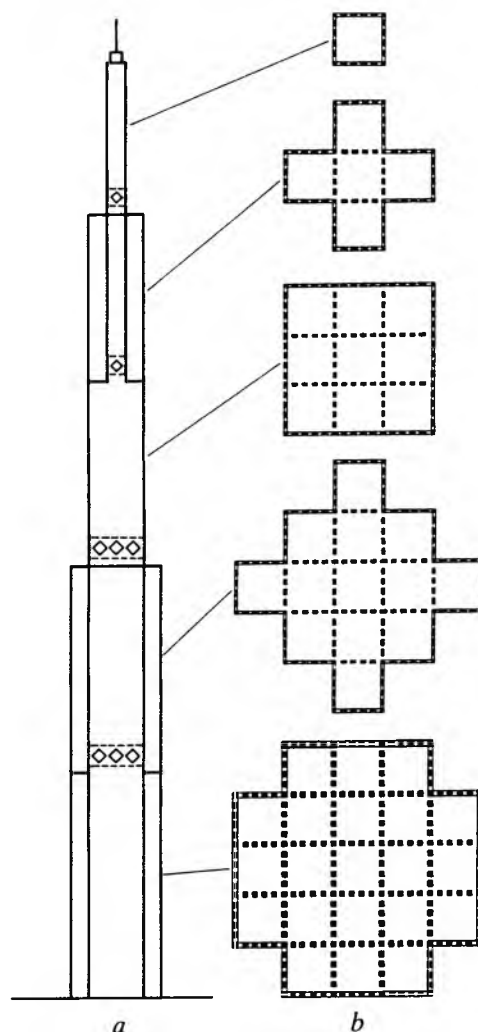
stupova te da momente prevrtanja od bočnih opterećenja uvode preko 4 para vertikalnih sila u bočne stupove. Pritom, zbog prostornog djelovanja rešetaka, uvijek sudjeluju svi stupovi. Važna je arhitektonska prednost tog sustava što uzduž vertikalnih bridova zgrade nema stupova, a u pobočkama nema kosnika.

Toranj zgrade budućnosti. Pretpostavlja se da će u toranjskim zgradama u budućnosti prevladavati megastrukture, pa već ima više takvih projekata.

Projekt armiranobetonske zgrade, tzv. tornja visokog jednu milju (sl. 60) arhitektonski je 1956. razradio F. L. Wright, a konstruktivno 1986. J. Colaco. Zgrada bi prema projektu bila visoka



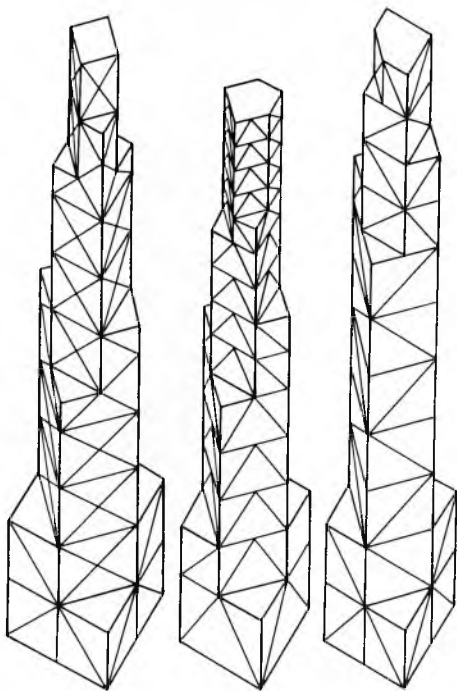
Sl. 59. Vertikalni presjek (a), isječak (b) i jedna od 8 prostornih rešetaka (c) koje povezuju bočne stupove toranj zgrade Bank of Southwest u Houstonu



Sl. 60. Projekt tzv. Zgrade visoke jednu milju. a nacrt, b tlocrti

1600 m i imala bi 528 katova. Vertikalna nosiva konstrukcija je višestruki cijev koja u najnižem dijelu ima 21 kvadratni modul, a naviše po 13, 9, 4 i u najvišem dijelu samo 1 kvadratni modul. U svim je područjima presjek četverostruko osno i zrcalno simetričan. Tlocrtne su stranice jednog modula duge 30,5 m, pa je duljina stranica zgrade na donjem dijelu 152,5 m. Osnovi je razmak stupova 6,1 m, a presjek se stupova naviše smanjuje. U vanjskim se pobočkama zgrade nalaze vertikalne rešetke. Stropovi su dvosmjerne rebraste ploče s rasponom od 30,5 m u oba smjera. Temeljna je ploča kvadratna, sa stranicom duljine 168 m, a debljina je ploče 5,5 m. Neposredno su iznad razina gdje se mijenja presjek zgrade horizontalne rupe radi protoka vjetra, tj. radi smanjenja bočnog opterećenja zgrade. U strukturi pobočke zgrade dominantni su dvostruki kosnici, pa su prozori rombični. Perioda je slobodnih bočnih vibracija unatoč velikoj bočnoj krutosti zgrade ekstremno duga, čak 25 sekundi.

Slika 61 prikazuje još tri projekta toranjskih zgrada budućnosti.



Sl. 61. Projekti triju toranjskih zgrada budućnosti

LIT.: W. Drechsel, Turmbauwerke. Bauverlag, Wiesbaden 1967. – R. Rosman, Statik und Dynamik der Scheibensysteme des Hochbaues. Springer-Verlag, Berlin 1968. – B. Taratnath, Structural Analysis and Design of Tall Buildings. McGraw-Hill, New York 1988. – G. Franz, K. Schäfer, Konstruktionslehre des Stahlbetons. Springer-Verlag, Berlin 1988. – P. Dubas, E. Gehri, Stahlbau. Springer-Verlag, Berlin 1988. – E. Heinle, F. Leonhardt, Türme. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1990. – R. Graefe, Vladimir Suchov. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1990.

R. Rosman

TRANSFORMATOR, statički elektromagnetski uređaj u kojem se električna energija iz jednog ili više izmjeničnih krugova, koji napajaju primarne namote transformatora, prenosi u jedan ili više izmjeničnih krugova napajanih iz sekundarnih namota transformatora, s izmijenjenim iznosima struja i napona i nepromijenjenom frekvencijom.

Prema namjeni i izvedbi razlikuje se više vrsta transformatora: energetski transformator namijenjen je prijenosu i pretvorbi električne energije, mjerni transformator primjenjuje se za električna mjerenja (v. *Mjerni transformatori*, TE 8, str. 610), a transformatorom impedancije u visokofrekvencijskoj se tehnici prilagođavaju impedancije dvaju strujnih krugova (v. *Transformatori impedancije*). Mnoge su podvrste energetskih transformatora: generatorski, mrežni, distribucijski, ispravljački, pećni i dr. U elek-

troničkoj se industriji uz energetske primjenjuje niz specijalnih malih transformatora kao što su niskofrekvencijski ili tonski transformator, međufrekvencijski, visokofrekvencijski, antenski i sl. (v. *Elektronika, sastavni dijelovi*, TE 4, str. 450). Poseban visokofrekvencijski transformator velikoga prijenosnog omjera naziva se *Teslinim transformatorom*.

U ovom se članku detaljno opisuju energetski transformator.

P. N. Jabločkov je 1877. godine konstruirao uređaj od serijski spojenih zavojnica (primarni namot) namotanih oko štapnih željeznih jezgara, od kojih je svaka imala još po jednu zavojnicu s manjim brojem zavoja (sekundarni namoti). Na sekundarne je namote priključio paralelne elektrode, tzv. *Jabločkovljeve svijeće* (v. *Električno osvijetljenje*, TE 4, str. 263) i tako postigao da se pregaranjem jedne od svijeća ne prekida strujni krug. Mnogi taj uređaj smatraju prvim transformatorom. Svrha je toga transformatora bila da se relativno visok napon izmjeničnoga generatora prilagodi naponu svijeća koje su se do tada spajale u seriju.

Prvi transformator sa zatvorenim jezgrom prikazan je na izložbi inovacija u Budimpešti 1885. godine, a konstruirali su ga K. Zipernowsky, M. Déry i O. T. Bláthy, inženjeri u tvornici Ganz. Taj se transformator sastojao od dvaju prstenastih namota podjednake izmjere, ali s različitim brojem zavoja. Namoti su bili postavljeni koaksijalno, jedan iznad drugoga, te kroz otvor prstena i oko oboda omotani čeličnom žicom. Tako je nastao transformator sa željeznom jezgrom u obliku šupljeg torusa (sl. 1) s omjerom napona jednakim omjeru brojeva zavoja. Omjer brojeva zavoja odabran je tako da se generatorski napon snizio i prilagodio naponu žarulja koje su osvijetljavale deset izložbenih paviljona. Tada je prvi put u praksi ostvareno paralelno spajanje žarulja u izmjeničnome strujnom krugu.



Sl. 1. Prvi transformator sa zatvorenim željeznom jezgrom

U stotinu godina od izuma transformatora nije bilo većih promjena u njegovoj koncepciji. Napredak je bio u tehničkim karakteristikama transformatora: povećane su nazivne snage i naponi, smanjene mase i gubitci po jedinici nazivne snage, smanjeni dodatni gubici i ograničeno lokalno ugrijavanje, povećana je otpornost na električna i mehanička dinamička naprezanja te povećana učinkovitost hlađenja. Uz sve se to i bolje poznaju pojave u transformatorima za vrijeme pogona. Glede ugradbenih materijala, najviše je postignuto na poboljšanju svojstava magnetskih limova od kojih se izrađuju transformatorske jezgre.

Proizvodnja transformatora u Hrvatskoj započela je 1946. u tvornici »Rade Končar« u Zagrebu. Danas su to tri tvornice: »Končar« – Energetski transformatori d.d., koja proizvodi generatorske i mrežne transformatore snaga 20...1000 MVA za napone do 500 kV, s najvećom isporučenom trofaznom jedinicom snage 725 MVA; »Končar« – Distributivni i specijalni transformatori d.d., koja proizvodi uljne energetske transformatore od 30 kVA...35 MVA za napone do 145 kV, suhe transformatore do 5 MVA te razne specijalne transformatore kao što su pećni, ispravljački, lokomotivski i sl., te »Končar« – Mjerni transformatori d.d., koja u svojem proizvodnom programu ima naponske i strujne transformatore za mjerenje i zaštitu, izolirane uljno-papirnom izolacijom ili plinom sumpornim heksafluoridom, za napone do 500 kV, te epoksidnom ili sličnim smolama izolirane mjerne transformatore nazivnih napona do 50 kV. Izvoz, već prema proizvođaču i potrebama domaćeg tržišta, iznosi 50...80% godišnje proizvodnje.

Osim u navedenim specijaliziranim tvornicama, manji, osobito suhi transformatori specijalne namjene proizvode se u manjim tvornicama i radionicama širom Hrvatske.

Transformacija se zbiva u tzv. aktivnom dijelu transformatora koji se sastoji od jezgre i namota. Energija ulazi u transformator kroz *primarni namot*, te se posredstvom magnetskog toka u jezgri seli u *sekundarni namot* s iznosima struje i napona različitim od primarnih, a iz njega nastavlja put k potrošaču. Smjer je energije dakle od primara prema sekundaru, pa isti namot, već prema smjeru energije na mjestu ugradnje, može biti primarnim ili sekundarnim namotom. Zato je namote bolje prepoznavati po relativnoj razini napona. Razlikuju se obično namoti višeg, VN, srednjeg, SN, i nižeg napona, NN. Omjer napona u transformatoru naziva se *omjerom transformacije*. U transformatoru omjera transformacije 400 kV/110 kV/33 kV namot 110 kV je SN namot, dok mu u transformaciji 110 kV/20 kV pripada oznaka VN.