

**ČELIČNE KONSTRUKCIJE**, nosivi sistemi objekata građevinarstva i strojogradnje sastavljeni pretežno od elemenata izrađenih od valjanih čeličnih proizvoda. Njihova primjena obuhvaća vrlo široka područja zgradarstva (hale, hangari, garaže, skeletne višetažne zgrade, krovista, dimnjaci, skele); mostogradnje (željeznički, cestovni, pješački i cjevovodni mostovi); hidrogadnje (zapornice, splavnice, cjevovodi pod pritiskom, kesoni); izrade transportnih postrojenja (dizalice, žičare, prenosnice, kranske staze); izgradnje spremišta (rezervoari za tekućine i plinove pod pritiskom, silosi, bunker); izrade rudarskih i metalurških postrojenja (bušaći i izvlačni tornjevi, skeleti visokih peći, podgrade); izrade stupova različite namjene (rasvjetni, dalekovodni, nosači napojnih vodova, radio-antenski, televizijski, radarski).

Primjena čelika kao materijal za nosive konstrukcije, u odnosu na druge građevinske materijale konstrukcija (drvo, beton, prirodni i umjetni kamen, plastični materijali itd.), osniva se na svojstvima koja on ima kao metal. U građevinarstvu i strojogradnji primjenjuju se za nosive konstrukcije od metala još i legure aluminija. Ove konstrukcije od lakih metala imaju s čeličnim konstrukcijama vrlo sličnu problematiku dispozicionih rješenja, tretmana kod dimenzioniranja, načina konstruktivnog oblikovanja i postupka izrade, te čine s njima oblast *metalnih konstrukcija*. Samo neke specifične mehaničke i metalurške osobine čelika koje imaju određeni utjecaj na izradu elemenata i nosivost konstrukcija u eksploataciji, odvajaju stanovitim razlikama čelične konstrukcije od ostalih metalnih konstrukcija i time uslovljavaju samo djelomično specifičnu problematiku kod tretmana pri proračunu nosivog sistema i kod konstruktivnog oblikovanja elemenata pri projektiranju.

Kao osnovni materijal za nosive čelične konstrukcije upotrebljavaju se gotovo isključivo valjani proizvodi od ugljičnih čelika s postotkom ugljika do 0,25% (v. *Čelik*). Mehaničke i metalurške osobine ovih čelika, poznatih pod uobičajenim nazivom građevinski čelici, propisane su standardima (Čelici za noseće konstrukcije prema JUS C B0.501; v. *Čelik*, Klasifikacija prema namjeni, Konstrukcioni čelici).

Glavna su svojstva na kojima se zasniva primjena ovih čelika u nosivim konstrukcijama: čvrstoća, elastičnost i plastičnost.

*Čvrstoća* (granica unutarnjih napona kod koje počinje razaranje, tj. dekohezija materijala) građevinskih čelika velika je u poređenju s čvrstoćom drugih građevinskih materijala i iznosi 3,7 Mp/cm<sup>2</sup> do 5,5 Mp/cm<sup>2</sup> (vrijednosti dobivene ispitivanjem na normiranoj epruveti pod polaganim opterećivanjem). Ovo svojstvo omogućuje kod izgradnje konstrukcija u čeliku relativno mali utrošak materijala.

*Elastičnost* (svojstvo materijala koje uvjetuje da po prestanku djelovanja sile naprezanjem deformirano tijelo poprma prvobitni oblik) građevinskih čelika osigurana je sve do visokog stepena naprezanja materijala (do veličine napona ~ 60% čvrstoće pri homogenom jednoosijalnom naponskom stanju). Osim toga u tom području naprezanja čelik zadržava praktički konstantni modul elastičnosti, i to relativno vrlo visok (2,1 · 10<sup>8</sup> Mp/cm<sup>2</sup>). Zahvaljujući ovom svojstvu čelične konstrukcije imaju, u granicama eksploatacionih naprezanja, vrlo male i praktički povratne deformacije.

*Plastičnost* (svojstvo da materijal prije razaranja pri postepenom povećanju naprezanja pretrpi trajne deformacije) građevinskih čelika vrlo je velika u poređenju s plastičnošću čelika za druge primjene: izražena relativnim izduženjem normirane epruvete iznosi ~ 30%. Osim toga pojava trajne deformacije, kao što je prije spomenuto, nastupa tek nakon što materijal biva podvrgnut visokom stepenu naprezanja (napon ~ 60% čvrstoće), i to kao jasno izražena granica između elastičnog i plastičnog područja napona (granica razvlačenja). Plastičnosti čelika treba pripisati što se traženi stepen sigurnosti čelične konstrukcije postiže i uz visok stepen iskorištenja materijala, i to uz mogućnost dimenzioniranja elemenata konstrukcije pojednostavnjenim tretmanom, koji ni ne mora biti potpuno adekvatan konstruktivnom oblikovanju, načinu izrade i uslovima eksploatacije (npr. uz zanemarivanje krutosti čvorova u rešetkastim nosačima i ostalih uzroka koncentracija napona, dopuštanje nekontrolirane pojave vlastitih napona, svođenje u proračunu dinamičkog opterećenja na statičko).

Općenito građevinski čelik ima elastoplastična svojstva koja su vrlo bliza svojstvima idealno elastično-plastičnog materijala, te se na pretpostavci da je on idealno elastično-plastični materijal uglavnom zasniva tretman dimenzioniranja i oblikovanja čeličnih nosivih konstrukcija. Npr. granicu razvlačenja usvajamo kao kritični napon, tj. napon pri kojem materijal gubi sposobnost da se dalje suprotstavlja deformaciji, a tek kad se pojavi plasticitet u čitavom ili bar većem dijelu nekog presjeka promatranog elementa u konstrukciji, smatramo da dolazi do otkazivanja njegove nosivosti. Pri tom pretpostavljamo također da ni u jednoj tački presjeka napon nije dosegao graničnu vrijednost čvrstoće, tj. da nema pojave dekohezije materijala. (Jedino je postupak dimenzioniranja protiv zamora nešto različit jer se zasniva na sigurnosti protiv pojave dekohezije materijala.) Iz ovog razloga gubitak plastičnih svojstava čelika koji bi nastao ili u toku produkcije valjanih proizvoda (segregacija, nepodesan termički režim), ili u toku izrade konstrukcije (nasilne deformacije, nepoželjne termičke pojave u postupku zavarivanja), ili u toku eksploatacije objekta (niske temperature, nepodesna superpozicija višeosijalnih naponskih stanja, udarci), može ugroziti sigurnost nosive konstrukcije (*krti lom*). Prema svojim metalurškim osobinama nije svaki čelik jednako osjetljiv na gubitak plastičnosti kod nepovoljnih uslova izrade i eksploatacije. Građevinski čelici jednakih graničnih vrijednosti čvrstoće i plastičnosti dobivenih obično propisanim ispitivanjima normiranih epruveta ne moraju i u jednakoj mjeri gubiti svojstva plastičnosti kod uslova izrade i eksploatacije, koji su različiti i nepovoljniji od laboratorijskih uslova. Sposobnost čelika da i kod nepovoljnih uslova izrade i eksploatacije zadrži svojstvo plastičnosti mjeri se njegovom žilavošću. Mjera za žilavost je prelomni rad nastao udarom na normiranoj epruveti sa zarezom pri određenoj temperaturi ispitivanja. Prema veličini ovog prelomnog rada i temperature ispitivanja, građevinski čelici istih osnovnih mehaničkih osobina (čvrstoće i plastičnosti) razvrstavaju se u kvalitetne grupe (prema JUS C B0.501 «Čelici za noseće konstrukcije» u grupe A, B i C). Osim uobičajenog tretmana kod dimenzioniranja na temelju dokaza čvrstoće i stabilnosti, gdje se utvrđuje da računski naponi ostaju u dopuštenim granicama manjim od kritičnih napona za koje se smatra da dovode do stanja u kome bi promatrani element otkazao nosivost, potrebno je za dovoljnu sigurnost konstrukcije odabrati i kvalitetnu grupu čelika adekvatnu namjeni objekta, odnosno uslovima eksploatacije (udarci, niske temperature, višeosijalno naprezanje) i načinu izrade konstrukcije (termički i mehanički procesi u toku izvedbe konstrukcije, a posebno zavarene izrade). Ovaj postupak odabiranja odgovarajuće kvalitetne grupe u svojoj biti je dokaz dovoljne sigurnosti protiv pojave krkog loma i kvalitativno je potpuno različit od uobičajenog dokaza čvrstoće i stabilnosti koji se provodi numeričkim pokazateljima, funkcijama opterećenja konstrukcije. Danas još nismo u mogućnosti i dokaz sigurnosti protiv pojave krkog loma egzaktno kvantitativno obuhvatiti, pa se ovaj dokaz provodi metodom vrednovanja po različitim postupcima (postupak prof. Bonhommea korišten i u JUS C B0.501; postupci prof. Klöppela, prof. Bieretta i dr.).

Ishodišni materijal za izradu elemenata čeličnih konstrukcija čine pretežno čelični valjani proizvodi: nosači, štapovi, lamele, limovi, cijevi i ostali specijalni profili (v. *Čelik*, Klasifikacija vučinih i valjanih proizvoda).

Kao minimalne dimenzije profila obično se usvajaju širine (odn. krakovi) od 30 mm i debljine stijenke od 4 mm, a za zatvorene profile debljine i od 2,5 mm. Kod posebnih tzv. lakih čeličnih konstrukcija koriste se i profili s tanjim stijenkama, čak i od 1,5 mm.

Sastavljanje ishodišnog materijala (čeličnih valjanih proizvoda) u cjelinu provodi se posebnim spojnim sredstvima i postupcima pri izgradnji konstrukcije. Izgradnja konstrukcije obično obuhvaća izvedbu pojedinih elemenata, tzv. montažnih dijelova, u radionici (tvornička izrada), i njihovo spajanje u konstrukciju kao cjelinu na gradilištu odn. mjestu eksploatacije (montaža).

Raspoloživi čelični proizvodi, načini njihovog spajanja, zahtjevi ekonomičnosti i funkcionalnosti konstrukcije s obzirom na namjenu objekta uslovljavaju konstruktivne i statičke sisteme čeličnih konstrukcija koji se većinom izvode kao štapaste konstrukcije i to bilo kao rešetke (štapovi su napregnuti pretežno samo aksijalnim

silama) bilo kao okvirni sistemi i gredni nosači (na štapove djeluju i druga, većinom kombinirana naprezanja: savijanje, torzija, smicanje). Mnogo se rjeđe primjenjuju statičko-konstruktivni sistemi sastavljeni od ploča (kolovozi mostova), ljusaka (rezervoari) i visokostijernih nosača (silosi i bunker). Specijalne sisteme čine viseće, spregnute i prednapregnute konstrukcije.

Razlikuju se dvije osnovne vrste izvedbe čeličnih konstrukcija: zakivana izvedba i zavarena izvedba.

Zakivanom smatra se konstrukcija u kojoj se svi elementi čelične konstrukcije, ili bar njihov pretežni dio, izvode tako da se čelični valjani proizvodi spajaju u cjelinu zakivanjem. Zavarenom smatra se konstrukcija u kojoj se ti spojevi izrađuju zavarivanjem. Na taj način izrađeni elementi spajaju se među sobom u konstrukciju kao cjelinu obično na gradilištu ili drugom mjestu eksploatacije izvedbom priključaka i nastavaka, tzv. montažnim zakovicama odn. montažnim varovima, s time da zavarene konstrukcije mogu u cijelosti ili djelomično imati i zakivane montažne spojeve. Ovi montažni spojevi često se izvode, iz ekonomskih i tehničkih razloga, i vijčanom vezom od obradenih i neobrađenih vijaka, a također — u novije vrijeme — vezom od vijaka s visokom silom pritezanja koja osigurava tarni spoj. (V. Zakivanje i Vijci u članku *Elementi strojeva* i članak *Zavarivanje*.)

Do prije tridesetak godina gotovo se isključivo primjenjivala zakivana izvedba nosivih čeličnih konstrukcija. Taj način izvedbe diktirao je također asortiman profila valjanih proizvoda i konstruktivno oblikovanje elemenata i spojeva, i postavljao je određene zahtjeve na standardizirane kvalitete čeličnog materijala. Tretman dimenzioniranja, prilagođen zakivanoj izvedbi, dosegao je praktičku granicu potrebe daljnjeg usavršavanja. Sve jačim prodiranjem zavarene izvedbe u posljednjih tridesetak godina postepeno je eliminirana zakivana izvedba, te se može ustvrditi da se danas sigurno daleko preko 90% svih nosivih čeličnih konstrukcija izgrađuje u zavarenoj izvedbi. Ovo širenje zavarene izvedbe i usavršavanje postupaka zavarivanja prati postepeno i proizvodnja novih oblika valjanih profila prilagođenih potrebama konstruktivnog oblikovanja i izvedbe zavarenih elemenata (zatvoreni profili, lamele s nosom itd.), kao i proizvodnja čelika s posebno garantiranim osobinama (žilavosti). Tretman kod dimenzioniranja zavarenih konstrukcija već dobiva jasne konture kroz niz laboratorijskih ispitivanja i teoretskih obrada rezultata kao podloga za nove propise i uputstva.

Tendencija razvitka nosivih čeličnih konstrukcija usmjerena je prema: potpunom eliminiranju zakivane izvedbe; usavršavanju postupka zavarivanja; širokoj primjeni vijaka s visokom silom pritezanja; daljnjoj primjeni lakih konstrukcija uz upotrebu hladno valjanih profila koji se lako proizvode u širokom asortimanu; proizvodnji visokovrijednih čeličnih materijala koji bi uslovlili i širu primjenu prednapregnutih konstrukcija.

S tom tendencijom razvitka postavljaju se međutim iz razloga ekonomičnosti i sigurnosti čeličnih konstrukcija sve strožiji zahtjevi na tretman kod dimenzioniranja, i to kako zahtjevi za tačnijim metodama proračuna uz egzaktnu obradu problema stabilneta, zamora materijala i dinamičkog proračuna konstrukcije, tako i za neophodnim utvrđivanjem kriterija za osiguranje protiv pojave krto g loma.

Velika prednost čeličnih konstrukcija s obzirom na zahtjeve savremenog građevinarstva je tvornička izrada laganih elemenata s mogućnošću sigurne provedbe montaže i kod loših atmosferskih prilika, kao i jednostavna mogućnost eventualno potrebnog naknadnog ojačanja ili adaptacije pri promjeni uslova eksploatacije objekta.

Nedostatak čeličnih konstrukcija je potreba antikorozijske i eventualno protupožarne zaštite.

Gubitak čeličnog materijala uslijed rđanja nezaštićene površine zavisi od količine vlage i zagađenosti atmosfere. Ovaj gubitak može iznositi, izražen srednjom dubinom izjedanja jednog lica rđom, od 0,3 mm za 100 godina u pustinjskoj klimi do 17 mm za 100 godina u zagađenoj atmosferi industrijskih predjela. Zaštita čeličnih konstrukcija od korozije vrši se premazima i metalnim zaštitnim slojevima (v. *Korozija metala*).

Protupožarna zaštita čeličnih konstrukcija potrebna je samo tamo gdje se može očekivati dulji i intenzivniji požar koji bi uzro-

kovao zagrijavanje elemenata čelične nosive konstrukcije preko 300 °C. Do ove granične temperature mehaničke osobine čelika ostaju približno konstantne, a kod zagrijavanja preko nje čvrstoća, granica razvlačenja i modul elastičnosti naglo opadaju tako da se npr. na 600 °C čvrstoća čelika smanjuje ispod 50% prvobitne vrijednosti. Protupožarna zaštita elemenata čelične konstrukcije provodi se u zavisnosti od požarnog opterećenja (količine sagorivog materijala preračunate po kaloričnoj vrijednosti u kilograme drvene mase po četvornom metru tlocrta prostorije) i efikasnosti protupožarnih mjera (ugradbe protupožarnih alarmnih uređaja, brzine intervencije vatrogasne službe, ugradbe automatskih uređaja za suzbijanje požara, brzine evakuacije objekta itd.). Sama zaštita provodi se nanošenjem sloja materijala termički loše provodljivosti oko čeličnog elementa. Efikasnost ove zaštite izražava se vremenom potrebnim da se čelični element izložen vatri normiranog intenziteta zagrije do kritične temperature. Noviji propisi za protupožarnu zaštitu čeličnih konstrukcija utvrđuju vrednovanjem (bodovanjem) požarnog opterećenja i efikasnosti protupožarnih mjera potrebu odgovarajućeg zaštitnog sloja. Smatra se da do veličine požarnog opterećenja od 25 kg/m<sup>2</sup> čelična konstrukcija može ostati nezaštićena.

Regulativ opterećenja, proračuna, konstruiranja, izrade, montaže, održavanja i eksploatacije čeličnih nosivih konstrukcija obuhvaćen je u tehničkim propisima koje izdaje nadležni državni organ kako bi osigurao određeni stepen sigurnosti konstrukcije i standardnost izvedbe. (U SFRJ »Tehnički propisi za noseće čelične konstrukcije« — do sada samo djelomično obrađeni — Sl. list 41/1964 i 6/1965). U okviru Evropske konvencije za metalne konstrukcije obrađuju se opći prijedlozi iz područja ovog regulativa koji služe kao podloge nacionalnim tehničkim propisima.

Ostala problematika dispozicionih rješenja, konstruktivnih sistema, tretmana kod dimenzioniranja, konstruktivnog oblikovanja, izvedbe i montaže čeličnih nosivih konstrukcija poklapa se s općom problematikom metalnih konstrukcija (v. *Metalne konstrukcije*).  
V. Milčić

**ČELIK**, opšti naziv za vrlo velik broj složenih (višekomponentnih) legura željeza s ugljikom i nizom drugih elemenata. Svi čelici sadrže ugljika manje od 2,0%, samo čelici bogati hromom iznimno ga sadrže nešto više. Pored ugljika u čeliku se redovno nalaze u većim ili manjim količinama metali kao što su mangan i bakar, ili drugi elementi kao što su silicijum, fosfor, sumpor, azot i kisik. Ovi elementi, koji se nazivaju pratiocima željeza, pridružuju se željezu u toku procesa dobijanja čelika. Sadržaj nekih od ovih elemenata, kao npr. mangana, silicijuma i ugljika, namjerno se povišava na kraju procesa dobijanja čelika, dok je sadržaj fosfora, sumpora, kisika i azota u čeliku redovito štetan i stoga nepoželjan, a uslovljen je upotrijebljenim sirovinama i primijenjenim tehnološkim procesom dobijanja čelika. (Rijetko se i izuzetno fosfor, sumpor i azot namjerno dodaju čeliku radi postizanja specijalnih osobina.) Pored napred navedenih elemenata, čelicima se namjerno dodaju još i elementi hrom, nikal, molibden, vanadijum, volfram, aluminijum, bor i još neki drugi.

Čelik posjeduje niz izuzetno dobrih mehaničkih osobina koje se promjenom sadržaja ugljika od najnižih iznosa do 2,0%, pa mijenjanjem vrste i količine namjerno dodatih legirajućih elemenata i primjenom različitih postupaka proizvodnje i prerade, mogu mijenjati u vrlo širokom opsegu.

Jedna od najvažnijih mehaničkih osobina čelika jest njegova velika čvrstoća koja je gotovo jednaka u svim pravcima. Zatezna čvrstoća čelika iznosi od 20 do 400 kp/mm<sup>2</sup>; i srednje čvrsti čelici su, dakle, čvršći nego ostali konstrukcijski materijali. Pored velike čvrstoće čelik je i elastičan, pa njegov modul elastičnosti može iznositi i do 21 000 kp/mm<sup>2</sup>, što znači da je i vrlo otporan na izvijanje. Tvrdoća čelika može varirati unutar širokih granica: HB = 50–950 kp/mm<sup>2</sup>; tvrdi čelik je pogodan za izradu reznih i drugih alata. Livenjem, kovanjem, valjanjem, vučenjem, presovanjem, previjanjem i sl. mogu se izrađivati čelični predmeti najrazličitijih oblika, a pored toga dijelovi od čelika mogu se vrlo efikasno spajati zavarivanjem, lemljenjem, zakivanjem i s pomoću vijaka. Neke vrste čelika nisu otporne prema koroziji, ali i potpuno nezaštićena površina običnog čelika izloženog atmosferilijama ne korodira dublje od 0.01–0.02 mm godišnje. Inače, korozija se