

Na istom principu zasniva se i tzv. depot djelovanje nekih mikrokapsulanih lijekova, te kontrolirano djelovanje mikrokapslovanih insekticida i herbicida. Tako se npr. mikrokapslovanjem produžava inače neznačajna perzistencija metilparonata (od nekoliko sati na nekoliko dana). Ujedno se smanjuje i njegova opasna visoka toksičnost (na devetinu).

Membrane mikrokapsula s kontroliranim djelovanjem tvari njihovih jezgara ne smiju biti propusne za otapalo (uglavnom vodu), barem ne toliko da bi osmozom tlak u njima narastao iznad dozvoljenog naprezanja njihova materijala. Inače bi se kapsule rasprsnule, pa bi prestalo kontrolirano djelovanje.

Mikrokapsule s membranama nepropusnim za tvari njihove jezgre prikladne su i za neke separacijske operacije. Tako se, npr., na taj način mikrokapslovani aktivni ugljen uspješno upotrebljava za dobivanje i čišćenje enzima i antibiotika. Mikrokapslovan enzimi stabilniji su nego slobodni: Među najvažnije preparate te vrste ubraja se mikrokapslovana ureaza. Uz ostalo oni su omogućili napredak u konstrukciji umjetnih bubrega do suvremenog stanja, kojim je obrada pacijenata skraćena sa 6–12 h na 2 h. Membrane tih kapsula moraju biti propusne za vodu, ali ne toliko da osmozom tlak u njima naraste toliko da imobilizira enzime.

Membrane za elektrodijalizu isključivo su jednog tipa od tipova membrane za transport iona. Za njihovu funkciju najvažniji su njihov sadržaj izmjenjivih protuionera (kapacitet membrane) i njihov električni otpor.

Prvo se lako može odrediti potpunim zasićivanjem, pa eluiranjem i određivanjem količine izdvojene ionske vrste u eluat. Rezultati se prikazuju množinom ekivalentnih jedinki u masi suhe membranske tvari (mmol/g). Tako određeni kapaciteti membrane za elektrodijalizu obično su 0,8–2,8 mmol/g.

Osim od prirode izmjenjivača iona, ili još i veziva, električni otpor tih membrana u pogonu zavisi još i od njihove moći bubreњa (obično ih proizvođači isporučuju sa sadržajem vode 20–50%) i od prirode i koncentracije elektrolita koji se separira operacijom. Obično se određuje u otopinama natrij-klorida koncentracije 0,1 mol/dm³, ali često i druge, pa nisu svi podaci usporedljivi. Izgleda da električni otpor tih membrana mjerjen u otopini 0,1 mol/dm³ NaCl iznosi 5–23 Ωcm.

Osim tih karakteristika, proizvođači navode i druga svojstva njihovih membrana za elektrodijalizu, koja su važna za pogon, npr. dopušteni radni tlak, postojanost prema kemikalijama i oksidaciji.

Membrane za plinsku permeaciju načelno mogu biti od bilo kojeg polimera, jer su svi oni manje ili više permeabilni za plinove, a selektivitet njihove permeacije veći je za plinove s nižom kritičnom temperaturom i manjim dimenzijama molekula. Ipak, u izboru materijala za te membrane služe neki kriteriji. Tako su polimerni materijali to povoljniji za te membrane što im je struktura više amorfna (jer su kristalna područja impermeabilna), i što su manje umreženi (jer to smanjuje brzinu difuzije). Osim toga, svojstva se tih materijala mogu modificirati tokom izradbe membrane. Tako im se može povećati permeabilitet obradom plastifikatorima ili otapalima, i termičkom obradom.

Za plinsku permeaciju najviše se upotrebljavaju šuplja vlakna, ali i plosnati proizvodi od gustih i od poroznih membrana. Osobito su važne membrane bez strukturnih pogrešaka i asimetrične membrane. Od materijala za gустe membrane za plinsku permeaciju osobito su prikladni guma i silikonska guma, etilceluloza, polisulfoni, poliakrilnitrili i kopolimeri politetrafluoretilena. Od materijala za porozne membrane za plinsku permeaciju osobito su prikladni anorganski, npr. legure paladija sa srebrom, keramički materijali, Vycor staklo, kojima su promjeri pora 5–30 nm. Osim od tih materijala, porozne membrane za plinsku permeaciju izrađuju se i od polipropilena i polikarbonata.

LIT.: Ju. I. Dytner斯基, Rozdielanie mieszanin ciektych za pomocia membran z polimerow. WNT, Warszawa 1970. — R. E. Kesting, Synthetic polymeric membranes. McGraw-Hill, New York 1971. — R. E. Lacey, S. Loeb, Industrial processing with membranes. Wiley-Interscience, New York 1972. — S. Hwang, K. Kammermeyer, Membranes in separation. Wiley-Interscience, New York 1975. — Ю. И. Дытнерский, Мембранные процессы разделения жидкок смесей. Химия, Москва 1975. — М. Г. Лейбовский, Современное оборудование для мембранных методов разделения смесей. ЦИНТИХимнефтехим, Москва 1975. — P. Meares, Membrane separation processes. Elsevier, Amsterdam 1976. — S. Sourirajan, Reverse osmosis and synthetic membranes. National Research Council Canada, Ottawa 1977. — Ю. И. Дытнерский, Обратный осмос и ультрафильтрация. Химия, Москва 1978.

METALNE KONSTRUKCIJE su sklopovi i konstrukcije u obliku metalnih štapova, ploča, skeleta, sfernih elemenata i drugih konstrukcijskih oblika koji nešto nose, pokrivaju, uskladištuju ili služe drugim potrebama. To su npr. industrijske građevine, hale i hangari (v. Hale i hangari, TE 6, str. 335), visoke građevine, rezervoari, silosi i bunkerji, cevovodi (npr. v. Hidroelektrane, TE 6, str. 370), dalekovodi (v. Dalekovodi, TE 3, str. 136), antene (v. Elektronika, sistemi i uredaji, Antene, TE 4, str. 603), tornjevi za duboka bušenja (v. Bušenje na veliku dubinu, TE 2, str. 552; v. Nafta), dizalice, pretovarni kranovi (v. Prenosila i dizala), reaktorski sudovi za nuklearne reaktore (v. Nuklearna energetska postrojenja) i u hemijskoj procesnoj industriji (v. Procesna aparatura) i dr. Za preuzimanje velikih zateznih sila upotrebljava se i čelična užad sastavljena od žica visokovrednog čelika.

Kao materijal za metalne konstrukcije upotrebljavaju se danas čelik i aluminijumske legure. Svaki od tih materijala ima svoje područje primene na kojemu imaju konstrukcijske ili ekonomске prednosti. Čelik je, prema upotrebljenoj količini, glavni materijal za izradu metalnih konstrukcija.

Prve metalne, gvozdene, konstrukcije izradene su u drugoj polovini XVIII v., a prvi most od liveogn gvožđa izgrađen je u Engleskoj 1776. godine. Početkom XIX v. gradenje mostova doživljava velik polet kombinacijom liveogn gvožđa, drveta i gvoždenih štapova zglobovasto vezanih u lančanice i vesaljke (v. Lančani mostovi, TE 6, str. 462). Međutim zbog rušenja takvih mostova u Evropi i Severnoj Americi, koji nisu bili stabilni pri jačim vetrovima, brzo je napušteno njihovo dalje građenje. Oko polovine XIX v. već se grade rešetkasti mostovi raspona većeg od 100 m i puni limeni mostovi sa rasponima do 140 m. Materijal je pudlovano gvožđe koje se kovanjem prečišćavalo od troske, a zatim valjalo. Od kraja sedamdesetih godina XIX v. počinje primena Thomasova postupka za proizvodnju čelika (v. Čelik, TE 3, str. 43), što će omogućiti valjanje većih profila i većih tabli limova ravnometernjeg kvaliteta. U to vreme gradi se most Garabit u Francuskoj (raspon dvozglobnog luka 165 m, niveleta 123 m iznad reke) i most preko moreuza Firth of Forth (tabl. 6), između Engleske i Škotske. Taj rešetkasti most, sa dva srednja otvora od po 520 m i dva bočna od po 210 m, sa visinom iznad stubova od 120 m, značajan je uspeh u građenju čeličnih konstrukcija. Pored raspona, od značaja je obim radova (masa ugraviranog čelika 54 160 t, 6,5 miliona zakivaka, 5000 ljudi u tri smene u toku od 7 godina, 1882–1889). U to doba izgrađena je Kristalna palata u Londonu i Eiffelova kula u Parizu.

Od devedesetih godina u opštjoj je upotrebni topljeni čelik koji ima ravnomernija i bolja svojstva od pudlovanih gvožđa. Topljeni čelik, proizведен usavršenijim postupcima, i danas se upotrebljava. Za čelične konstrukcije upotrebljava se tzv. konstrukcijski čelik, i to: čelik ČN 24 (broj predstavlja merodavnu veličinu za proračun konstrukcija, a to je granica velikih izduženja u kp/mm² (~240 N/mm²), i čelik ČN 36, kao visokovredni čelik za značajnije građevine.

Za savlađivanje sve većih i težih zahteva u probnoj su fazi novi niskolegirani, i sitnozrnji čelici još boljih mehaničkih kvaliteta. Tako je u SAD uveden čelik T1, sa granicom velikih izduženja $\sigma_v \geq 700 \text{ N/mm}^2$ i u Japanu čelik sa $\sigma_v = 800 \text{ N/mm}^2$, a u Evropi (Francuska, Nemačka) čelik E 460 sa $\sigma_v \geq 460 \text{ N/mm}^2$; u Jugoslaviji Železarnice Jesenice proizvodi tzv. Niobel čelik sa $\sigma_v \geq 450 \text{ N/mm}^2$. Od čelika T1 izgrađen je (1966) viseci most u Lisabonu (72 000 t čelika), a od japanskog čelika most u Osaki (1974). U Evropi je npr., most u Rouenu izgrađen 1975. godine od čelika E 460. Takvim čelicima, zajedno sa povećanjem jačine, ostvaren je napredak i u kvalitetu materijala, meren zavarljivošću i otpornošću prema krtom lomu.

Građenje velikih mostova na novim železničkim prugama doprinelo je u drugoj polovini XIX v. razvoju teorije konstrukcija. Osim toga, posle velikih nesreća uvek su revidirane dotadašnje saznanja. Tako je, npr., rušenje 19 čeličnih konstrukcija u Švajcarskoj, između 1882. i 1892. godine, zbog izvijanja pritisnutih štapova, diktiralo (1892) reviziju dotadašnjih propisa za proračun takvih konstrukcija. U istom periodu ruši se (1892), za vreme montaže, železnički most preko reke Morave kod Ljubičeva. Sličnu posledicu (1907) imalo je i rušenje montiranog dela velikog mosta preko reke St. Lawrence kod Quebeca u Kanadi, kada se srušilo 15 000 t montiranog čelika (sl. 1.).



Sl. 1. Rušeni bočni otvor mosta preko reke St. Lawrence, Kanada (1907)

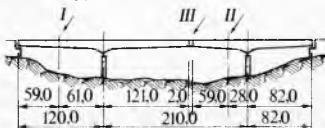
Primena zavarivanja daje posle prvoga svetskog rata novi impuls mostogradnji i građenju čeličnih konstrukcija. U tom periodu je građen i kolni most preko Save u Zagrebu (1939). Taj je most ušao u istoriju mostogradnje jer je to bio prvi most sagrađen kao spregnuta konstrukcija čelik-beton, i prvi most sa uspešno zavarenim lamelama debljine 95 mm od teško zavarljivog čelika, bez ikakvih štetnih pojava za više od 40 godina eksploracije. Međutim, u istom periodu ruši se nekoliko zavarenih mostova u Belgiji i Nemačkoj (1937—1938) usled konstrukcijskih grešaka i slabе zavarljivosti materijala. Te su havarije nametnule uvođenje novih odredaba u propise, ali nisu donele dalji napredak zbog ratnih prilika. Prelamanje i potapanje američkih brodova tipa Liberty (1942—1945) iniciralo je posle završetka drugoga svetskog rata istraživanja da se iznadu nepoznata dejstva zavarivanja na neke nedovoljno žilave materijale (neposredna korist: unifikacija proba za određivanje udarne žilavosti Charpy-V).

Potkraj pedesetih godina ovoga veka rada se novi konstruktivni oblik u mostogradnji. To su gredni nosači sa kosim zategama. I u Jugoslaviji su zabeleženi uspesi na ovom polju. Godine 1980. pušten je u saobraćaj železnički dvokolosečni most preko Save u Beogradu, raspona 254 m, koji je prvi dvokolosečni železnički most toga tipa u svetu. Postojeći most u Argentini preko Brazzo Largo (1976) ima široki, armiranobetonski drumski kolovoz i jedan železnički kolosek. Armiranobetonska ploča ima pozitivan uticaj na krutost i deformacije mosta, što olakšava problem projektovanja i eksploracije mosta.

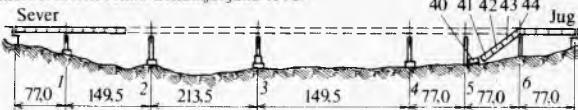
U gradnji je kolni most preko Dunava u Novom Sadu (rok završetka 1981). Sa svojim srednjim rasponom od 351 m to će biti najduži most na svetu sa grednim nosačima sa zategama.

Rušenje četiri velikih sandučastih mostova (1969—1971) (sl. 2) zbog nedostatka u proračunu zbog upotrebe pritisnutih elemenata sandučastih delova mosta (problem stabilnosti) izazvali su produbljeno teorijsko i eksperimentalno izučavanje te unapređenje pravila za proračun takvih konstrukcija i promenu propisa. Taj proces nije završen.

Beč, Austrija, novembra 1969.



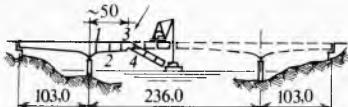
Milford, Hafen, Velika Britanija, juna 1970.



Melburn, Australija, oktobra 1970.



Koblenz, SR Nemačka, novembra 1971.



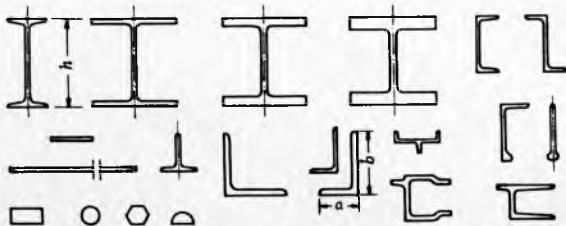
Sl. 2. Srušeni sandučasti mostovi u periodu od 1969. do 1971.

U drugoj kritičnoj oblasti, pojavi krtih lomova, otkrivanjem pravog po-kazatelja žilavosti materijala K_{IC} , stvar za konstruktoare ni izdaleka još nije rešena, jer se taj pokazatelj može bez ograničenja primeniti samo za ultrajake čelike. Za konstrukcijske čelike još nema pravilo rešenja i poređ mnogih po-moćnih koji se nude za praksu. Konstruktori se moraju navići na pojavu prslina u konstrukciji, koje nisu opasne sve dok ne dostignu kritičnu veličinu.

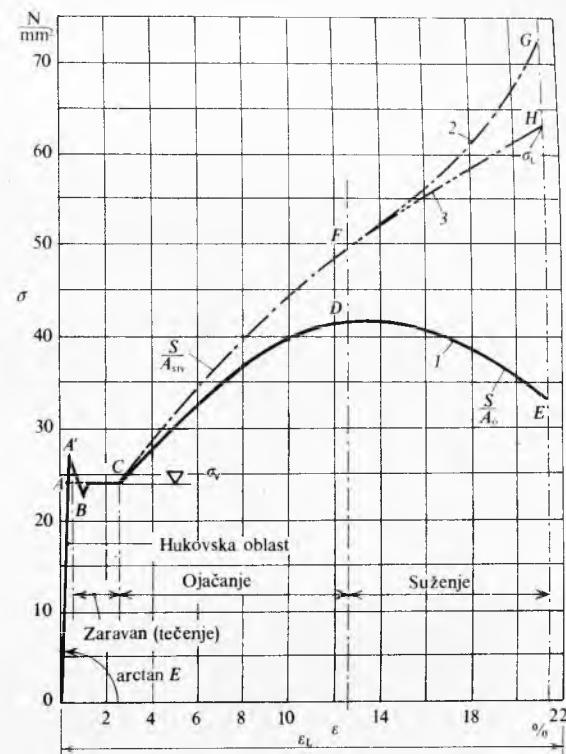
Međutim, ni tu još nema rešenja, jer sredstva za ispitivanje bez razaranja (poglavito ultrazvuk koji jedini tom zadatu odgovara) nisu još u stanju da odrede konturu prsline, bez koje se ne može ustanoviti njezina kritična veličina.

VRSTE MATERIJALA

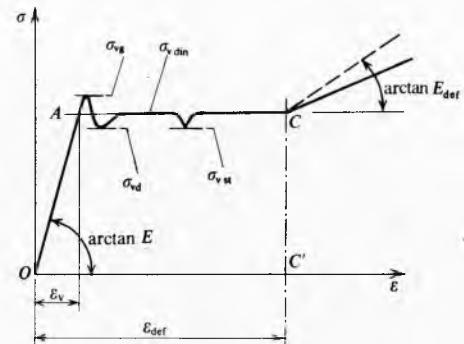
Čelik. Valjaonički proizvodi (limovi, štapovi, profilisani nosači, sl. 3) osnovni su materijali za čelične konstrukcije. Savremena je tendencija sve veća primena limova (zbog lakšeg spa-



Sl. 3. Vrste valjanih čeličnih profila, štapova, traka i limova



Sl. 4 a. Ponašanje čelika pri istezanju do kidanja. Linija 2 pokazuje odnos σ , ϵ u cilindričnom štalu za vreme naprezanja do loma; OA hukovski deo odnosa σ , ϵ ; AC zaravan tečenja, CF deo ojačanja do pojave kontrakcije u zateznoj epruveti, u preseku u kojem će se javiti lom; FG je deo u kojem je epruveta izložena višeosnom naponskom stanju sa stalnim smanjenjem merodavnog preseka i povećanjem napona u merodavnom preseku do tačke G. Linija 3 je korigovana linija zbog višeosnog naponskog stanja na mestu kontrakcije; merodavna je tačka H(σ_L). Linija 1 predstavlja zapravo dijagram $P-40$ pretvoren u »uprošćen« dijagram σ , ϵ , dobijen pod pretpostavkom da ne nastaje kontrakcija i da je površina loma jednaka prvobitnoj površini epruvete. Ta se linija ne može upotrebiti za analizu i daje se samo radi upoređenja sa pravim dijagramom σ , ϵ .



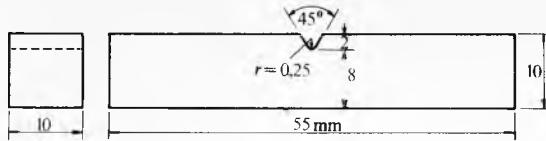
Sl. 4 b. Detalj dijagrama σ , ϵ konstrukcijskih čelika (deo velikih izduženja AC sa sl. 4 a). σ_{vg} gornja granica velikih izduženja (= A' iz sl. 4 a), σ_{vd} donja granica velikih izduženja pre stabilizacije (= B iz sl. 4 a), σ_v granica velikih izduženja pri normalnom režimu brzine povrešina naprezanja, σ_{vst} granica velikih izduženja pri brzini naprezanja nula, tj. merodavne vrednosti pri statičkom naprezanju. Od tačke C počinje oblast ojačanja sa karakterističnim modulom ojačanja E_{def} . Podatci koji daju ležezer je zapravo σ_{vg} (= A' iz sl. 4 a). Pri C' završava se zaravan velikih izduženja, pa i odgovarajuće specifično izduženje ϵ_{def}

janja zavarivanjem i prelaska na površinske sisteme konstrukcija. Limovi se valjaju u debljinama od 40, 100 pa i do 300 mm, u velikim tablama širine do 4 i 6 m i dužine 10 do 15 m. Za posebne potrebe upotrebljava se čelični liv, kovani čelik i sivi liv.

Valjaonički su proizvodi uglavnom od niskougljeničnog čelika koji mehanička svojstva dobija određenim sadržajem ugljika i mangana. Za čelične konstrukcije upotrebljavaju se sle-

deci čelici: ČN 24 (Č.0361-0363), ČN 26, ČN 29 i ČN 36 (Č.0561-0563). Oznake su prema JUS C.B0.500.70. Značenje brojke iza ČN već je navedeno, a o značenju brojaka u zagrada v. Čelik, TE 3, str. 101.

Mehanička svojstva materijala za metalne konstrukcije jesu: modul elastičnosti E , grupa svojstava tvrdoće i grupa svojstava žilavosti. Modul elastičnosti za sve čelične materijale u elastičnom području iznosi 210 kN/mm^2 (sl. 4a i 4b). U grupu svojstava tvrdoće spadaju jačina, tvrdoća i krtost, a u grupu svojstava žilavosti izduženja, udarna žilavost (Charpy-V) i savijanje oko određenog trna. Merodavni konvencionalni pokazatelji jačine čelika za proračun otpornosti elementa ili dimenzija poprečnog elementa neke konstrukcije dejstvuju spoljnih sile, jesu granica velikih izduženja σ_v (dimenzija N/mm^2), jačina materijala σ_L , jačina zamora σ_D ; a pokazatelji tvrdoće, u užem smislu, jesu vrednosti otpora prodiranju u materijal prema Brinellu, Vickersu i Rockwellu. Pokazatelji žilavosti su dilatacije (specifično izduženje) pri lomu ϵ_L i pri dostizanju granice velikih izduženja ϵ_v (dimenzija mm/mm), pokazatelj žilavosti (udarna žilavost) k_v je specifičan rad potreban za lom udarom propisane epruvete sa određenim zarezom na tzv. Charpy-V epruveti (sl. 5) sa poluprečnikom krivine u korenu žleba od $0,25 \text{ mm}$ (dimenzija J/cm^2).



Sl. 5. Epruveta za određivanje žilavosti materijala nazvana Charpy-V, prema JUS i ISO. Žilavost se meri utrošenim radom za lom epruvete. Rad loma se ostvaruje klatnom; meri se kao specifičan rad na jedinicu površine radnog dela epruvete (J/cm^2). Zarez se ostvaruje blanjanjem

U novije vreme uvedena je veličina K_{Ic} (dimenzija u $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$) — pokazatelj intenziteta napona, odnosno COD (Crack Opening Displacement) — pomeranje otvora prsline (δ , dimenzija u mm) prema mehanički loma, kao materijalna konstanta.

Prva od tih veličina, žilavost Charpy-V, unificirana posle drugoga svetskog rata, uveliko je unapredila proizvodnju konstrukcijskih čelika i navodi se kao pokazatelj žilavosti materijala u atestu o mehaničkim svojstvima isporučenog materijala iz valjaonice. Ispituje se pri različitim temperaturama, od sobne pa do -50°C i niže, po potrebi. Za različite kvalitete čelika propisane su vrednosti rada pri lomu epruvete pri određenoj temperaturi. Druga veličina, K_{Ic} , smatra se danas da predstavlja materijalnu konstantu u oblasti žilavosti: zasad je važna u oblasti linearne mehanike loma, ali se radi na produbljivanju ovog znanja i u proširenju i na obične konstrukcijske čelike (COD-postupak); primena je već dala neke pozitivne rezultate.

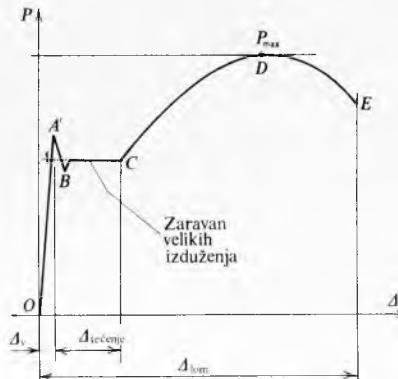
U literaturi se često sreće dijagram P, Δ (sl. 6). Veličine označene u dijagramu P, Δ služe samo pri prijemu materijala i upoređenju dvaju materijala, jer ne vode računa o pojavi kontrakcije epruvete za vreme opita kidanja i kontrakciji na mestu loma, što znači da ne vode računa o stvarnom preseku pri lomu, te ne daju realni napon loma, nego neki zamišljeni napon kao kvocijent najveće dostignute sile i početne površine epruvete. Taj se dijagram može upotrebiti samo u koordinatnom sistemu sila/izduženja, a ne može (kao što se to ponekad čini) i u sistemu napon/dilatacija.

Za analizu stanja koja se pojavljuju u materijalu od početka naprezanja cilindričnog štapa (linearno naponsko stanje) pa do loma, služi dijagram σ/ϵ (sl. 4a); karakteristične oblasti jesu: hukovska oblast OA , oblast tečenja (oblast velikih izduženja) AC , oblast ojačanja AF i oblast loma FH . Brojčane veličine u tom dijagramu su karakteristične za linearno naponsko stanje. Zavisne su i od brzine nanošenja naprezanja te pri većim brzinama iskazuju više vrednosti. Stoga je normirana brzina povišenja naprezanja od 10 N/mm^2 u sekundi. Ranije isticana tačka proporcionalnosti u hukovskoj oblasti danas nije više interesantna jer se ne može tačno odrediti usled postojanja

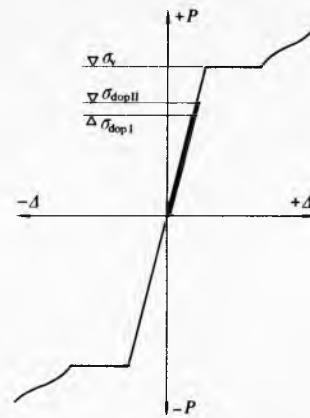
sopstvenih napona i početnih nesavršenosti epruvete; prema tome, usvaja se hukovska oblast od nule do granice velikih izduženja. Sl. 4b prikazuje različite razine zaravnih σ/ϵ dijagrama u oblasti velikih izduženja. Za statičko naprezanje merodavna je veličina σ_{vst} .

Prema JUS, svaki proizvod koji izlazi iz žlezare dobija atest sa označenim vrednostima za: σ_L (jačina materijala), σ_v (granica velikih izduženja), δ_5 (specifično izduženje posle loma na bazi $l_0 = 5$ prečnika epruvete), žilavost k_v (Charpy-V) pri određenoj temperaturi i savijanje oko propisanog trna (α).

Upotreba vrednosti σ_v je višestruka. Pri proračunu konstrukcija prema dopuštenim naponima vrednost σ_{dop} određuje se prema važećim Tehničkim uslovima kao deo vrednosti σ_v . Pri proračunu prema graničnim stanjima granica nosivosti se određuje prema granici velikih izduženja materijala konstrukcije.



Sl. 6. Dijagram sila-izduženja (P, Δ). Δ_v izduženje između repera epruvete pri dostizanju sile koja pobudi tečenje materijala, Δ_{lom} izduženje između određenih repera posle loma epruvete i saставljana delova epruvete. U tački D sila opita dostiže svoju najvišu vrednost, a u tački E vrednost je sile opita pri lomu epruvete



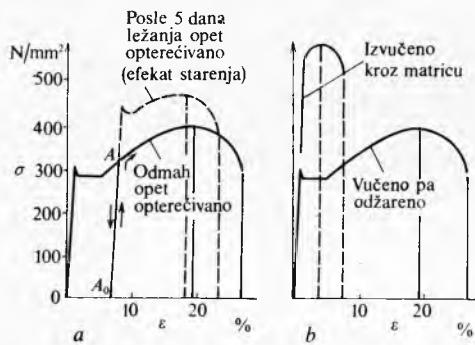
Sl. 7. Dijagram P, Δ u oblasti zatezanja i pritiska

Te se vrednosti (dopuštena naprezanja i granica nosivosti) određuju iz statističke obrade rezultata redovnih ispitivanja materijala; one se određuju na osnovu zahtevane verovatnoće da neće biti manjih vrednosti. U međunarodnoj praksi (ISO) uobičajen je drugi put, nešto strožiji od opisanog: propisana je nešto niža vrednost σ_v , ali se pri ispitivanju manja vrednost ne sme pojaviti. Ako se ona pojavi, materijal se pri prijemu odbija. Ni te vrednosti nisu konstante za istu kvalitetu materijala. Iskustvo pokazuje da usled različitog stepena provaljivosti materijala proizvodi valjanja različitih debeljina ne mogu zadovoljiti navedene uslove merodavne za materijal debeljine do 16 mm ; za debli materijal te vrednosti se, prema JUS, snižavaju, to više što je veća debeljina. Tako se vrednosti razlikuju za sledeća područja debeljina $16 < \delta \leq 40$, $40 < \delta \leq 100 \text{ mm}$ i za debeljine $> 100 \text{ mm}$. Takve odredbe sadrže i međunarodne norme.

Za današnje topljene čelike uzima se da su grane dijagrama P, Δ za zategnutu (prvi kvadrant) i pritisnutu zonu (drugi kvadrant) jednake (sl. 7). Pritisnuti deo dijagrama vredi kad se dimenzionisu pritisnuti štapovi.

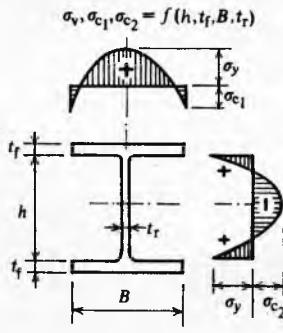
Svi navedeni dijagrami (sl. 4...7) dobiveni su za linearno naponsko stanje. Vrednosti naprezanja menjaju se u dvoosnom i troosnom naponskom stanju, što treba uzeti u obzir jer se sa kompleksnijim naponskim stanjem povećava vrednost granice velikih izduženja (σ_v).

U fazu izrade konstrukcije, u radionici, mogu nastati, npr. prilikom ispravljanja ili savijanja delova, vrlo velike deformacije koje prelaze vrednost zaravni niskougljeničnih čelika (dilatације veće od 2...4%, koje ulaze u zonu ojačanja, sl. 4). Pojave koje se tada javljaju nazivaju se J. Bauschingerov efekt. Ako se pri naprezanju dođe do tačke A (sl. 8), pa se naprezanje smanji na nulu (tačka A_0) i neposredno nastavi ponovno naprezanje, materijal će se ponašati kao da je hukovska oblast podignuta do tačke A. Kad između smanjenja naprezanja i ponovnog opterećivanja prođe neko vreme, nastupiće promena svojstava materijala. Granica velikih izduženja će se povisiti, a mogućnost deformacija smanjiti. Nastalo je *starenje* materijala, tj. povećanje krtosti (sl. 8a). Značajno je da se ta pojava može potpuno otkloniti, materija rehabilitovati, posle toplotnog postupka normalizacije. Time se postiže rekristalizacija, pa se ponisti efekt starenja i ponovo se uspostavljaju prvobitna elastična svojstva čelika (primer na sl. 8b).



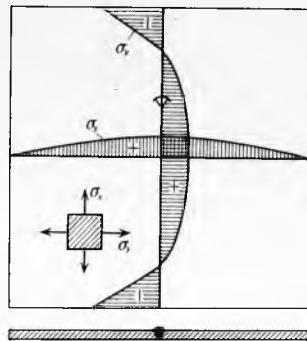
Sl. 8. Prikaz Bauschingerova efekta u dijagramu σ, ϵ

Zaostali naponi. Posle valjanja svi proizvodi sadrže zaostale (sopstvene) napone usled lokalnog zagrevanja i neravnomernog hlađenja. Ta je pojava najjače izražena u valjanim nosačima zbog neravnomernog zagrevanja i hlađenja rebara i pojaseva, jer se rebara brže hlađe od pojaseva. Veći deo pojaseva je zategnut, a veći deo rebara pritisnut (sl. 9).

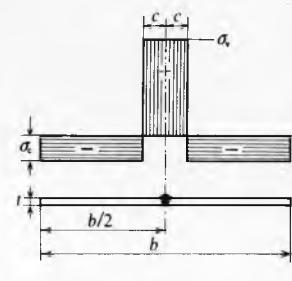


Sl. 9. Zaostali naponi u valjanom profilu

Zavarivanje takođe unosi visoke zaostale napone. Sl. 10 prikazuje zaostale napone pri zavarivanju dvaju limova. Zaostali naponi u svakom preseku moraju biti u ravnoteži, pa se zbog zatežućih napona u zoni šava javlja pritisak na ivicama ploče (sprečeno skupljanje pri hlađenju). Za praktičan proračun uticaja zaostalih napona na ponašanje konstrukcijskih delova naponski se dijagrami uprošćavaju. Primer takva dijagrama za dva



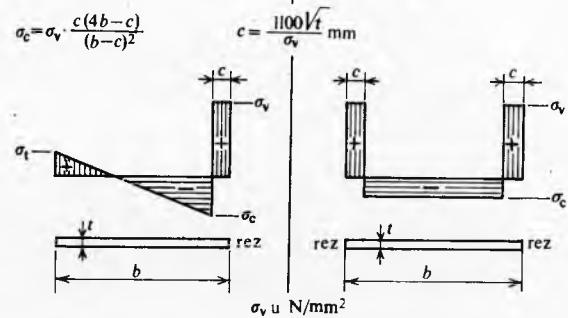
Sl. 10. Zaostali naponi nakon zavarivanja ploča



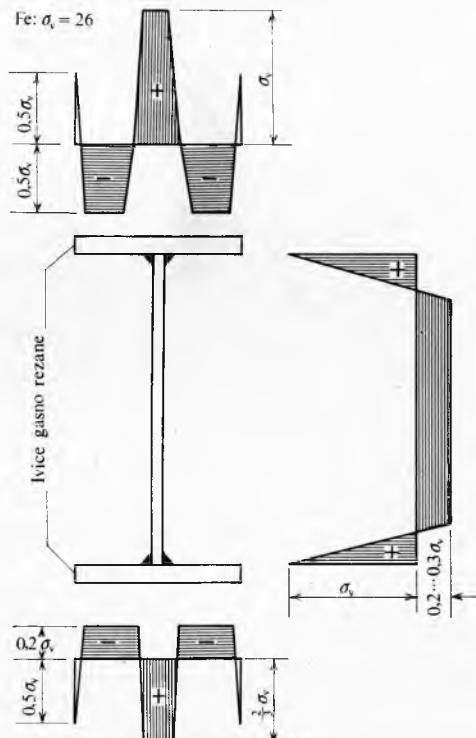
Sl. 11. Generalisana shema zaostalih napona nakon zavarivanja limova

$$\sigma_t = \sigma_y \cdot \frac{c(2b+c)}{c(b-c)^2}$$

$$\sigma_c = \sigma_y \cdot \frac{c(4b-c)}{(b-c)^2}$$



Sl. 12. Generalisana shema zaostalih napona nakon termičkog rezanja

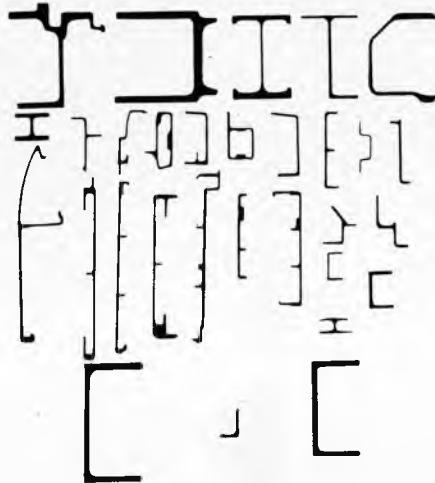


Sl. 13. Generalisana shema zaostalih napona I-nosača sa termički rezanim pojasevima

zavarena lima vidi se na sl. 11. Na sl. 12 su rasporedi i vrednosti zaostalih napona koji nastaju usled termičkog rezanja limova, a na sl. 13 zaostali naponi posle zavarivanja I-nosača, koji je sastavljen od gasno rezanih pojasa. Zaostali naponi vrlo brzo dostižu vrednost granice velikih izduženja σ_v , pa su zato preostali naponi na sl. 11...13 prikazani kao delovi od σ_v .

Treba spomenuti da zbog različitih materijala absolutna vrednost zaostalih napona nije jednaka, ali je njihov odnos prema σ_v pri istim geometrijskim uslovima stalan.

Aluminijumske legure za zavarene konstrukcije. Mehanička svojstva aluminijumskih legura koje se upotrebljavaju za konstrukcije zavise od hemijskog sastava i tehnologije prerade (način oblikovanja i topotne obrade). Te se legure uglavnom oblikuju gnećenjem, pri čemu se pritiskom daje oblik proizvodu (sl. 14). To može biti valjanje (toplo ili hladno) za dobijanje limova i traka, presovanje kroz maticu za proizvodnju šipki, profila i cevi ili izvlačenje za dobijanje šipki i cevi.



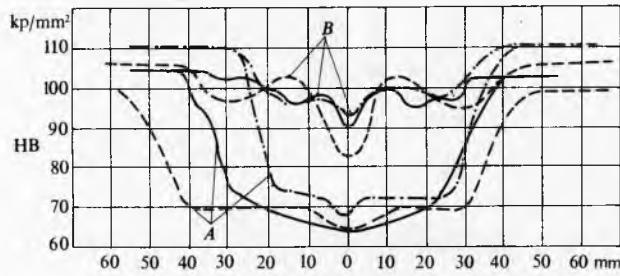
Sl. 14. Gnećeni profili aluminijumskih legura

Za povišenje jačine aluminijumskih legura služe dodaci: Cu, Mg, Si, Mn i Zn, a za povišenje hemijske otpornosti, najefikasniji su dodaci Mg i Mn (v. *Aluminijum*, TE 1, str. 230).

Poстојe tri vrste zavarljivih aluminijumskih legura: a) legure koje se termički ne mogu ojačati, b) legure koje se termički mogu ojačati i c) legure koje se termički ojačavaju, ali svoje fizičke karakteristike mogu popraviti i pri okolnoj temperaturi taloženjem u čvrstom stanju.

Za spajanje zakivcima mogu se upotrebiti sve tri vrste legura.

Za spajanje zavarivanjem pogodne su samo legure pod b) i c), a naročito pod c), jer termički otpuštena mesta pored šava posle izvesnog vremena restauriraju svoju jačinu (sl. 15).

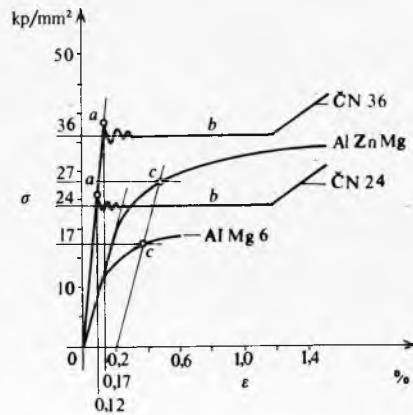


Sl. 15. Jačina zavarenog spoja legure AlZnMg neposredno posle zavarivanja (A) i posle 30 dana (B)

Legure AlMg, AlMgSi i AlZnMg jesu zavarljive aluminijumske legure. Legure AlCuMg i AlZnMgCu imaju odlična mehanička svojstva, ali nisu pogodne za zavarivanje, jer se povišenjem procenata Cu i Zn smanjuje zavarljivost legura. Legure AlMgMn i AlMg4,5Mn dobro su zavarljive, a najboljom se pokazala legura AlZn4,5Mg1 kojoj odgovara dijagram na sl. 15.

Aluminijumske legure nemaju izraženu granicu velikih izduženja u obliku zaravnji u dijagramu σ, ε (sl. 16) kao npr. konstrukcijski čelici, pa se ta granica određuje kao naprezanje pri kojemu ostaje trajna deformacija od 2% (obeležava se sa 0,02). Ta granica u zavarljivim legurama dostiže 30 kp/mm^2 (300 N/mm^2), što znači da je viša nego za ČN 24. Iz dijagrama se

vidi da je modul elastičnosti mnogo manji od onoga koji vredi za čelik (iznosi tek $1/3$ modula elastičnosti za čelik, tj. 70 kN/mm^2), što pokazuje da su aluminijumske konstrukcije mnogo *mekše* od čeličnih i da za izjednačenje krutosti treba momenat inercije konstrukcije od aluminijumskih legura povećati za tri puta.



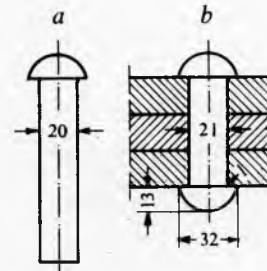
Sl. 16. Dijagrami σ, ε za čelike ČN 24 i ČN 36, te za dve vrste aluminijumskih legura

Dimenzionisanje spojeva od aluminijumskih legura komplikovanije je od dimenzionisanja čeličnih spojeva, jer postoji slabljenje pri zavarivanju i za sućeone i za ugaone šavove. Dimenzijsku se prema obrascu $\sigma_{\text{zadop}} \leq k \cdot \beta \cdot \alpha \cdot \sigma_{\text{dop}}$, pa je potrebno poznavati ponašanje legure pod uticajem topline zavarivanja da bi se ti koeficijenti odredili.

SPAJANJE KONSTRUKCIJA

Spajanje igra značajnu ulogu u oblikovanju i ostvarenju metalnih konstrukcija. Valjaonički proizvodi koji se isporučuju određenih dimenzija skraćuju se ili se sastavljaju u radionicu, pa se spajaju u oblike predviđene projektom. Spajaju se spojnim sredstvima kojima je zadatak da spojeni delovi deluju kao celina i da su u stanju da sigurno prenesu naprezanja koja mogu nastati između pojedinih delova. Spojna sredstva koja se primenjuju u metalnim konstrukcijama jesu zavrtnji, zakivci, šavovi i visokovredni zavrtnji. Za stalne konstrukcije ne primenjuju se zavrtnji.

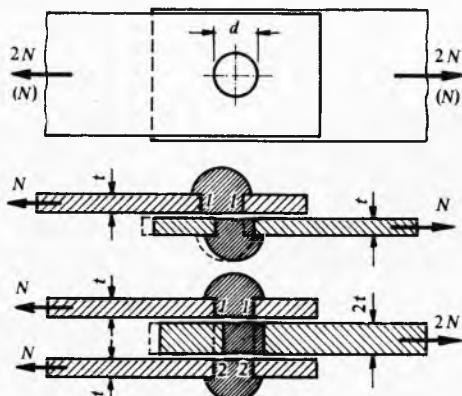
Zakovane veze (v. *Elementi spojeva, zakovice*, TE 5, str. 200) bile su osnovno spojno sredstvo više od 100 godina u početku primene čeličnih konstrukcija. Zakivak je poluproizvod sa vratom sa jedne i polukružnom glavom sa druge strane. Zakivak



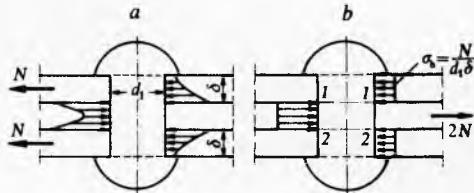
Sl. 17. Zakivak kao sredstvo spajanja. a) sirov zakivak, b) izrađeni zakivak sa polukružnom glavom

se u zagrejanom stanju stavlja u prethodno izbušenu rupu, pa se posle toga pneumatskim kovanjem, dok je još u crvenom usijanju, deo vrata, za koji je zakivak duži od debljine limova koji se spajaju, oblikuje u drugu glavu (sl. 17). Tim je postupkom rupa ispunjena zbijanjem dela vrata kovanjem, a limovi stegnuti pri hlađenju skupljanjem zagrejanog materijala zakivka posle kovanja. Rupe se buše u skrojenom paketu limova prema

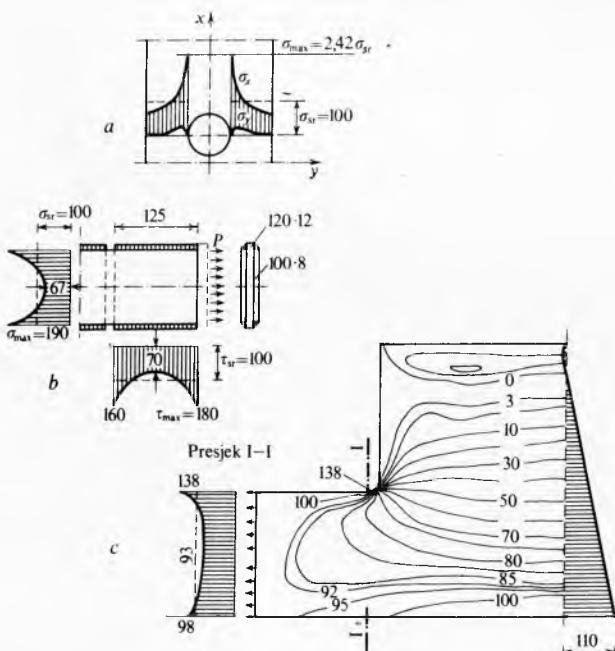
određenom planu. Delovanje zakivka je prikazano na sl. 18 i 19. Zakivak prenosi sile smicanjem vrata i pritiskom vrata na omotač rupe. Rupa za zakivak slabiji elemenat koji se spaja, jer



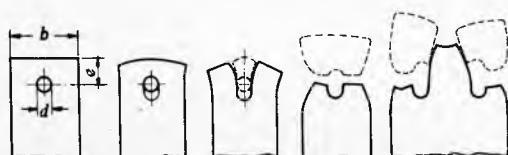
Sl. 18. Rad zakivka u jednosečnom i dvosečnom spoju: smicanje i pritisak u omotaču rupe



Sl. 19. Pritisak u omotaču rupe, a stvarna, b računska raspodela

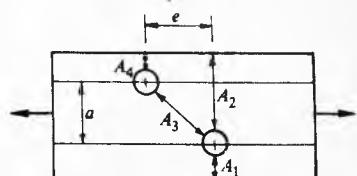


Sl. 20. Primeri računskog i stvarnog naprezanja u konstrukcijskim elementima pri skretanju linije sila. a štap sa rupom, b preklonjeni zavareni spoj, c zategnuti štap proširen u čvorni lim

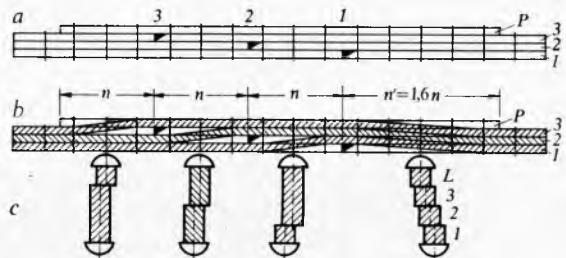


Sl. 21. Lom preseka sa jednom rupom zbog prekoračenja otpornosti prema smicanju ili prema kidanju u oslabljenom preseku

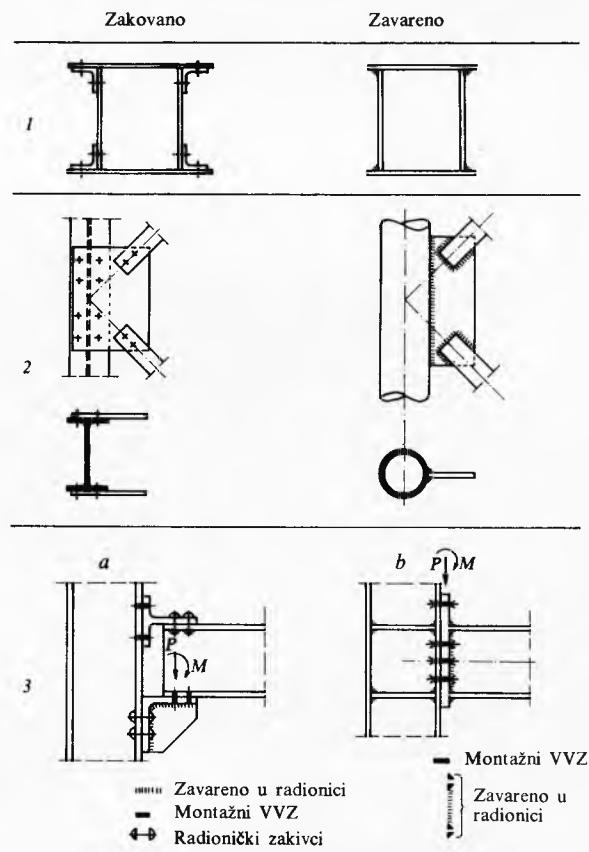
Sl. 22. Lom zategnutog štapa sa rupama u zavisnosti od razmaka a i e . Merodavni presek je onaj koji ima manji zbir delimičnih površina: $A_1 + A_2$ ili $A_1 + A_3 + A_4$



Sl. 23. Jednostrani, direktni stepenasti nastavak paketa lamela. a raspored podvezica za nastavak lamela, b tok linija sila u prelazu (uz jednak debjinu lamela jednak je broj zakivaka n u svakom delu)



Sl. 24. Jednostrani, indirektni stepenasti nastavak paketa lamela. a raspored podvezica za nastavak lamela, b tok linija sila u prelazu, c ravni smicanja zakivaka u pojedinim grupama nastavka (najnepovoljnija je poslednja desna grupa, te se zbog toga povećava broj zakivaka, $n' = 1,6n$)



Sl. 25. Upoređenje oblikovanja zakivanjem, zavarivanjem i visokovrednim zavrtanjima

skreće tok sila oko rupe u elementu. Raspoloživo naprezanje u zategnutom štalu sa jednom rupom vidi se na sl. 20. Crtkano

prikazuje srednju računsku vrednost naprezanja u oslabljenom preseku, prema važećim Tehničkim uslovima za proračun konstrukcija spojenih zakivcima. Pri prekoračenju jačine materijala, bilo u posledicu smicanja, bilo u oslabljenom preseku, nastaje lom (sl. 21). Merodavni presek za ceo zategnuti spoj zavisi od međusobnog rastojanja zakivaka. Sl. 22 prikazuje oslabljeni presek sa dve rupe. Postoje praktična pravila za raspored zakivaka. Raspored sila duž zakovanog spoja nije ravnomern; neravnomernost je to veća što je veza dulja. Zbog toga se broj redova zakivaka po dužini ograničava. Kad nastupe plastične deformacije, sile se izjednačuju, pa se zbog toga u proračunu zakovanih veza prema Tehničkim uslovima računa sa ravnomernom podjelom sile i u stadijumu dopuštenih naprezanja. Ako u paketu koji se spaja ima više od dva elementa, tj. više od jedne smiče ravni, u nastavku se ne presecaju svi elementi na jednom mestu, već je nastavak stepenast. Postoje dva tipa tog nastavka: direktni i indirektni (sl. 23 i 24). U direktnom nastavku svaka je grupa zakivaka smicana u po jednom preseku, a u indirektnom nastavku, koji je kraći (desni deo sl. 24), postoji grupa zakivaka koji su smicani u više preseka. Zato se na tom delu povećava broj zakivaka od n na n' .

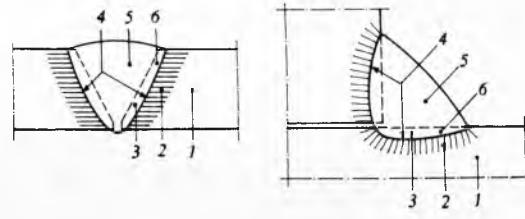
Spajanje delova pod pravim uglom može se zakivcima ostvariti jedino preko posebnih profila, ugaonika (sl. 25). To ograničava oblikovanje ne samo pravougle veze: veze pod pravim uglom, npr., sa cevima nisu moguće tim spojnim sredstvom, pa ni spajanje delova pod proizvoljnim uglom.

Primena spajanja zakivcima u čeličnim konstrukcijama je u opadaju zbor uslova rada zakivača (velika buka pri kovanju), te zbog ekonomskih i organizacijskih prednosti drugih postupaka spajanja; u radionici to je zavarivanje, a na gradilištu primena visokovrednih zavrtnja.

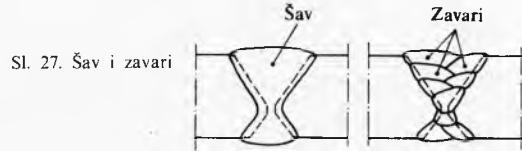
Zavarivanje je danas najšire primjeno sredstvo spajanja metalnih konstrukcija; ono je u isto vreme i kvalitetno i efikasno. Uvedeno je u opštu praksu izrade čeličnih konstrukcija posle 1920. godine. Tri su osnovne karakteristike zavarivanja kao spojnog sredstva, u odnosu na zakivke i zavrtnje: prva, sile se sa jednoga na drugi deo ne prenose diskontinuirano, od jednog zakivka ili zavrtnja do drugoga, već preko kontinualnog metalnog spoja; druga, veza se ne može prekinuti bez

Tablica 1
NAZIV I OZNAKA SPOJA

Naziv spoja		Prikaz	Oznaka
1	Sučevni		S
2	Preklopni		P
3a	T-spoj (kosi T-spoj)		T
3b	Ugaoni		I
3c	Krstasti (ukrsni)		K
4a	Naležni		N
4b			



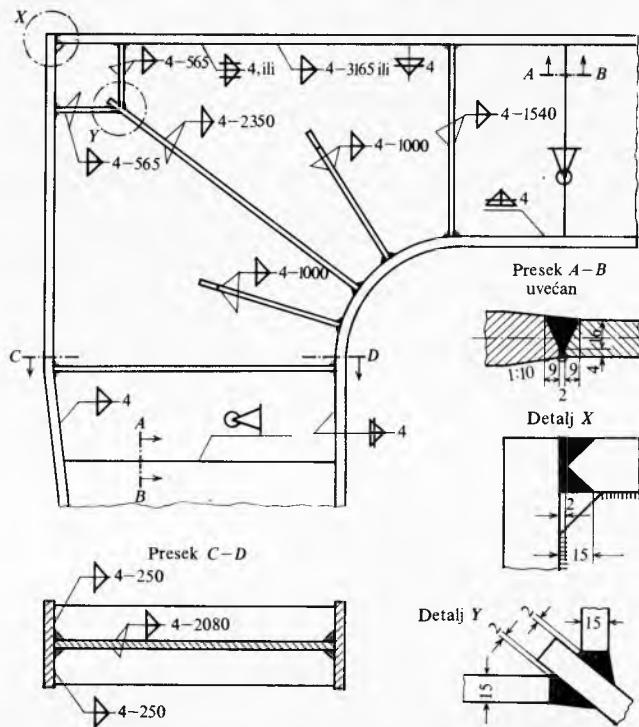
Sl. 26. Poprečni presek šava. 1 osnovni materijal, 2 zona uticaja topline, 3 rastopljeni osnovni materijal, 4 granica topljenja osnovnog metal, 5 dodatni metal, 6 uvar (rastopljeni osnovni metal izmešan sa dodatnim metalom)



Sl. 27. Šav i zavari

razaranja; treća, dok izrada spoja sa zakivcima i zavrtnjima ne utiče na mehanička i metalurška svojstva materijala u njihovoj okolini, jer je potrebna samo mehanička obrada za izradu rupa, zavarivanje, zbog svojih osobenosti, bitno utiče, usled povlačenja temperature pri izvršenju zavarenog spoja do Ac_1 , odnosno i preko Ac_3 , na svojstva osnovnih materijala delova koji se spajaju. U zoni uticaja topline (zona oko šava), materijal prolazi sve metalurške promene koje se pojavljuju pri temperaturi od $\sim 700 \dots 1500^\circ\text{C}$. U srednjoj zoni, u oblasti pripremljenog žleba, dodatni materijal se topi, i posle očvršćivanja ostvaruje materijalni kontinuitet, dakle spoj (sl. 26). Osnovni je uslov za kvalitetno zavarivanje da izvedeni spoj, na celoj svojoj širini, ima što ravnomernija tražena svojstva (to su najčešće svojstva jačine i žilavosti, otpornosti prema habanju i koroziji i dr.).

Naziv *spoj* upotrebljava se i za preciziranje položaja delova koji se spajaju (tabl. 1). *Žleb* je rezultat pripremne obrade sučeljavajućih ivica dvaju komada koje treba zavariti. Za oblike žlebova postoje preporuke, iskustveni podaci i delimično odredbe JUS. Kada se žleb popuni dodatnim materijalom, nastaje materijalizovan spoj, nazvan *šav*; šav se obično dobija iz više zavora (koji su rezultat topljenja elektrode ili žice za zavarivanje,



Sl. 28. Primer obeležavanja šavova osnovnim i dopunskim znacima (u crtežu su unete samo mere u vezi sa vrstom i dimenzijama šavova)

METALNE KONSTRUKCIJE

sl. 27). Od oblika žleba zavisi i naziv šava (tabl. 2 i 3). Šavovi se u planovima obeležavaju propisanim oznakama (tabl. 4); primer obeležavanja šavova dat je na sl. 28.

Tablica 2
VEZA IZMEĐU ŽLEBA I ŠAVA SUČEONOG SPOJA

Red. broj	Žleb		Šav	
	Opis	Izgled	Izgled	Naziv
1	Bez obrade ivica			I-šav
2	Žleb oblika $\frac{1}{2}V$			$\frac{1}{2}V$ -šav
3	Žleb oblika V			V-šav
4	Žleb oblika K			K-šav
5	Žleb oblika X			X-šav
6	Žleb sa velikim zatupljenjem; oblik Y			Y-šav nesimetrični X-šav
7	Žleb oblika U			U-šav
8	Žleb oblika U sa obe strane; dvostruki U			Dvostruki U-šav

Tablica 3
ŽLEBOVI I ŠAVOVI SPOJEVA T-PRESEKA

Red. broj	Žleb		Šav		Napomena
	Opis	Izgled	Izgled	Naziv	
1	Bez žleba			Dvostrani ili jednostrani bočni ugaoni šav	Koren neprovaren
2	Žleb oblika $\frac{1}{2}V$			$\frac{1}{2}V$ -šav	Koren provaren
3	Žleb oblika $\frac{1}{2}V$			$\frac{1}{2}V$ -šav	Koren neprovaren
4	Žleb oblika K			K-šav	Koren provaren
5	Žleb oblika J			J-šav	Koren neprovaren

Tablica 4

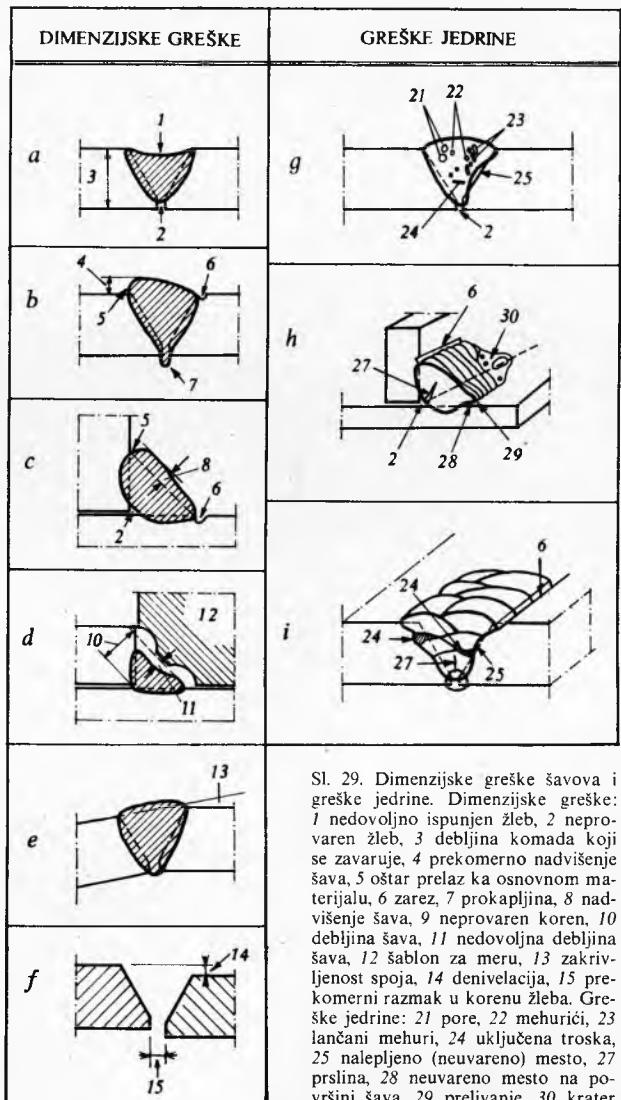
OSNOVNI I DOPUNSKI ZNACI ZA OBELEŽAVANJE ŠAVOVA

Osnovni znaci		Dopunski znaci	
Naziv šava	Znak	Opis	Znak
I-šav		Provaren koren	
$\frac{1}{2}V$ -šav		Obrađeno: lice ili koren šava	
V-šav sa potkorenom trakom		Kontinualan ugaoni šav	
Y-šav		Isprekidan ugaoni šav	
X-šav		Ravno lice ugaonog šava	
U-šav		Ispupčeno lice ugaonog šava	
Dvostruki U-šav		Udubljeno lice ugaonog šava	
$\frac{1}{2}$ V-šav		Ugaoni šav zavaren po celoj konturi	
K-šav			
J-šav			
Ugaoni šav			
Dvostruki ugaoni šav			
Šav na uglu			

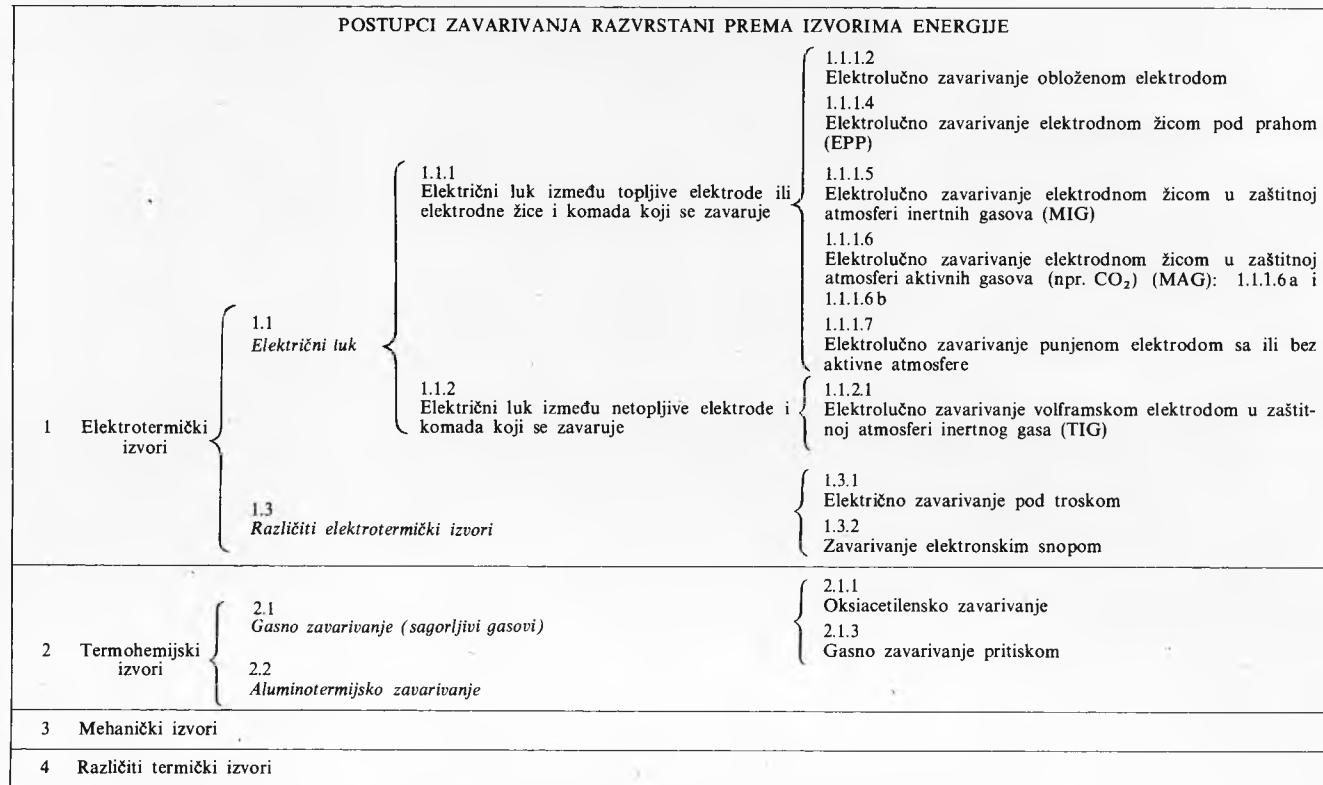
Kontrolom kvaliteta šavova postižu se dva cilja: utvrđuje se kvalitet, a time i ugovorna obaveza izvođača, i dobija se osnov za procenu sigurnosti konstrukcije u eksploataciji. Prema važnosti u pogledu sigurnosti od rušenja i time odgovornosti, šavovi se dele prema našim Tehničkim uslovima za kvalitet zavarenih spojeva u tri klase: specijalna, prva i druga klasa (prema novom predlogu treba da bude I, II i III klasa). Za svaku klasu propisuju se zadaci koji se šavu postavljaju, uslovi koji se za vreme izrade moraju ispuniti i dokazi koji se traže da se utvrdi da su ispunjeni postavljeni uslovi. Sl. 29 prikazuje greške šavova.

Postupci zavarivanja kojima se postiže metalni kontinuitet dele se prema izvorima toplotne energije upotrebljene za zavarivanje. Na sl. 30 je izvod iz punog pregleda postupaka zavarivanja, i to samo onih potupaka koji se redovno primenjuju za spajanje konstrukcijskih čelika (niskougljeničnih i niskolegiranih) i aluminijumskih legura koje se upotrebljavaju za metalne konstrukcije. Primenom svih tih postupaka tope se ivice žlebova, pa se pomoću dodatnog metala, i uvarivanja ovih dvaju metala (osnovnog i dodatnog), ostvaruje spoj. Navedeni postupci se obeležavaju simbolima (tabl. 5). Svaki od navedenih postupaka ima svojih prednosti. Te prednosti određuju područje primene kad se postiže bilo najpovoljniji kvalitet zavarenog spoja, bilo pak najpovoljniji ekonomski uslovi.

Tako se, npr., čelične konstrukcije zgrada, raznih vrsta stubova (dalekovodnih, televizijskih i dr.), mostova i kranova, najčešće zavaruju električnim lukom (1.1), obično toplijevom elektrodom (postupak 1.1.1), i to bilo obloženim elektrodama (1.1.1.2) ručno, bilo poluautomatskim postupkom žicom pod zaštitom praha (1.1.1.4, EPP postupak). Za zavarivanje spome-



Sl. 29. Dimenzijske greške šavova i greške jedrine. Dimenzijske greške: 1 nedovoljno ispunjen žleb, 2 neprovaren žleb, 3 debljina komada koji se zavaruje, 4 prekomerno nadvišenje šava, 5 oštar prelaz ka osnovnom materijalu, 6 zarez, 7 prokapljina, 8 nadvišenje šava, 9 neprovaren koren, 10 debljina šava, 11 nedovoljna debljina šava, 12 šablon za meru, 13 zakrivljenost spoja, 14 denivelacija, 15 prekomerni razmak u korenju žleba. Greške jedrine: 21 pore, 22 mehurići, 23 uključena troska, 25 nalepljeno (neuvareno) mesto, 27 prsina, 28 neuvareno mesto na površini šava, 29 prelivanje, 30 krater.



Sl. 30. Skraćeni pregled postupaka zavarivanja prema izvorima topline

nutih konstrukcija u posebnim slučajevima dolazi u obzir zavarivanje ležećom elektrodom (1.1.1.3), zavarivanje pod troskom (1.3.1) ili u zaštitnoj atmosferi (1.1.1.6), naročito u atmosferi CO_2 (1.1.1.6a).

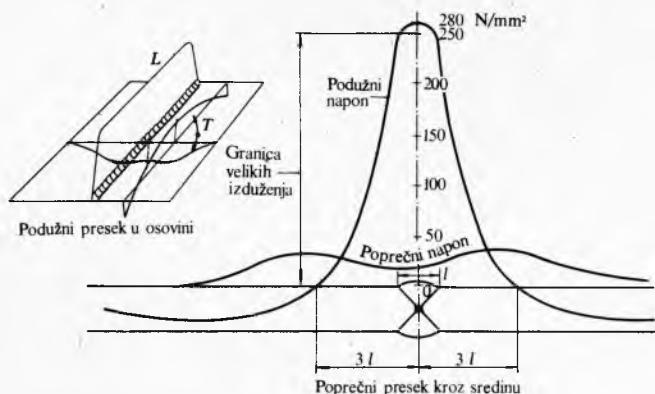
Konstrukcije od aluminijumskih legura zavaruju se danas jedino električnim lukom u zaštitnoj atmosferi, bilo netopljivom elektrodom (TIG) uz ručno dodavanje žice (1.1.2.1), bilo topljivom elektrodnom žicom (MIG) (1.1.1.5). Ređe se, danas još iz ekonomskih razloga, primenjuje noviji postupak zavarivanja elektronskim snopom (1.3.2).

Konstrukcije od cevi zavaruju se gasnim (2.1.1) ili elektročičnim zavarivanjem u zaštitnoj atmosferi od CO_2 (1.1.1.6). Cevovodi se zavaruju električnim lukom (1.1.1.2) elektrodama sa specijalnom celuloznom oblogom.

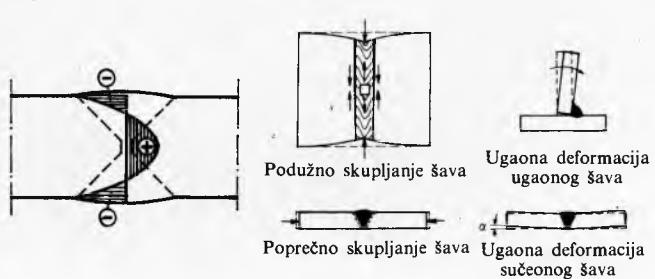
Zaostali naponi nakon zavarivanja. Iz već navedenih podataka proizlazi da neki proizvodi dolaze već na obradu u radionicu sa zaostalim naponima, dok se u svim zavarenim delovima pojavljuju takvi naponi posle zavarivanja. Oko svakog šava postoji polje zaostalih naponova (sl. 31 i 32). To je važno pri

kontroli kvaliteta, jer nije svejedno da li se greška u šavu nalazi u delu gde deluje zatezanje ili pritisak od zaostalih naponova.

Značaj tih zaostalih naponova je dvostruk: sa jedne strane zbog njih se pojavljuju deformacije konstrukcije, a sa druge, utiču na nosivost i sigurnost konstrukcije. Mogu se pojaviti



Sl. 31. Zaostali naponi pri zavarivanju dvaju limova bez ukleštenja. L podužni, T poprečni napon



Sl. 32. Raspored zaostalih naponi po debljinu zavarenog lima

Sl. 33. Sile usled skupljanja dodatnog i rastopljenog materijala pri zavarivanju izazivaju različite deformacije zavarenih delova

Tablica 5
OZNAKE NAJČEŠĆE PRIMENJVANIH POSTUPAKA ZAVARIVANJA

Simbol	Postupak zavarivanja	Oznaka iz slike 30	
G	Gasno zavarivanje	2.1.1	
E	Elektročično ručno zavarivanje obloženom elektrodom	1.1.1.2	
TIG MIG MAG (MAG C) (MAG M)	Elektročično zavarivanje pod zaštitom gasova	Tungsten-inertni gas Metal-inertni gas Metal-aktivni gas Metal-aktivni gas CO_2 (CO_2 -zavarivanje) Metal-aktivni mešani gas (zavarivanje mešanim gasovima)	1.1.2.1 1.1.1.5 1.1.1.6 1.1.1.6a 1.1.1.6b
EPP	Elektročično zavarivanje pod prahom	1.1.1.4	
ZT	Zavarivanje pod troskom	1.3.1	
ES	Zavarivanje elektronskim snopom	1.3.2	

deformacije pojedinih elemenata (sl. 33) ili celih delova konstrukcije (sl. 34). Deformacije se sprečavaju prethodnim deformacijama pre zavarivanja (sl. 35) ili pogodnim redosledom zavarivanja (sl. 36) ili, u komplikovanim slučajevima, planom zavarivanja (sl. 37).

Značaj zaostalih napona za sigurnost zavarenih konstrukcija ogleda se višestruko: u opasnosti od pojave krtog loma, u sniženju nosivosti, u sniženju jačine zamora i sl. Polja zateznih naprezanja igraju značajnu ulogu u eventualnoj pojavi krtog loma, jer su visoka naprezanja zatezanja jedan od potrebnih uslova za pojavu nestabilnog (krtog) loma. Delovanjem super-

poniranih eksplotacijskih i sopstvenih napona može se pojavit lokalno tečenje ili kritični napon stabiliteta. Položaj šava i predznak zaostalih napona prema merodavnoj osi izvijanja svrstava pritisnute štapove u tri kategorije, o čemu će još biti reči. U delovima izloženim promenljivom dejstvu sila u polju visokih zateznih naprezanja, u prisustvu koncentratora naprezanja, lako se pojavljuju prsline i one se šire pod opterećenjem. Ima primera pojave prsline usled zamora i u zoni pritiska od eksplotacijskog naprezanja, i to na onim mestima gde postoje zatezna područja zaostalih napona koji tada preovlađuju.

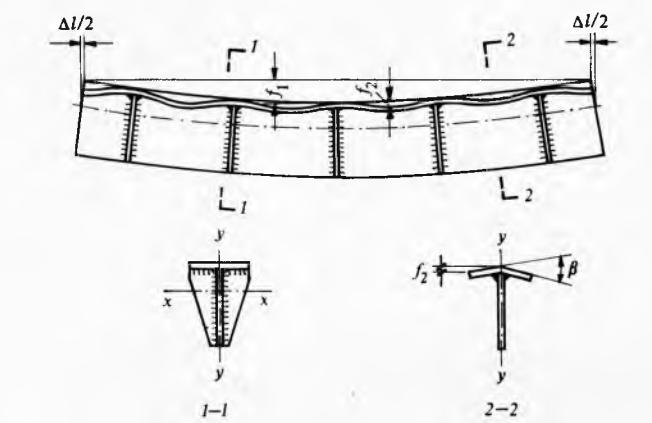
Zavarljivost. Ponašanje materijala pri zavarivanju i kasnije, u eksplotaciji, koje zavisi od mnogih parametara, obuhvaćeno je pojmom zavarljivosti. Taj pojam obuhvata: ostvarivanje materijalnog kontinuiteta za vreme zavarivanja između ivica delova koje treba spojiti bez pogrešaka (operativna zavarljivost), svojstva spoja neposredno nakon zavarivanja ili nešto kasnije (metalurška zavarljivost), te ponašanje spoja za vreme eksplotacije (konstrukcijska zavarljivost).

Operativna zavarljivost zavisi od hemijskog sastava osnovnog i dodatnog materijala. Metalurška zavarljivost zavisi od strukturne heterogenosti prouzrokovane toplotnim promenama u spoju tokom zavarivanja, tj. od postupka i rezima zavarivanja, a u vezi je i sa hemijskim sastavom osnovnog materijala. Konstrukcijska zavarljivost zavisi od ponašanja spoja u eksplotaciji pod uticajem krutosti konstrukcije (uticaj projektanta) i polja sopstvenih napona oko šava.

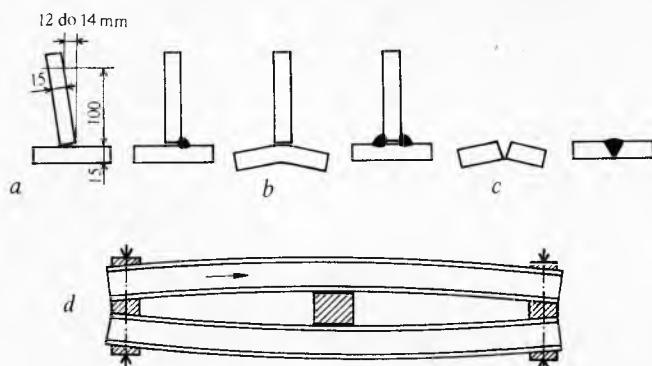
Metalurška zavarljivost je najinteresantnija za izučavanje ponašanja šava i zone na koju utiče toplota. Ona zavisi uglavnom od količine ugljenika i drugih elemenata u osnovnom materijalu koji teže stvaraju gama-faze. Kao merilo za pojavu kaljenih struktura uzima se tzv. ekvivalent ugljenika. Ima više različitih obrazaca za određivanje toga ekvivalenta. Prema predlogu Međunarodnog instituta za zavarivanje ekvivalent ugljenika određuje se iz obrasca

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \%, \quad (1)$$

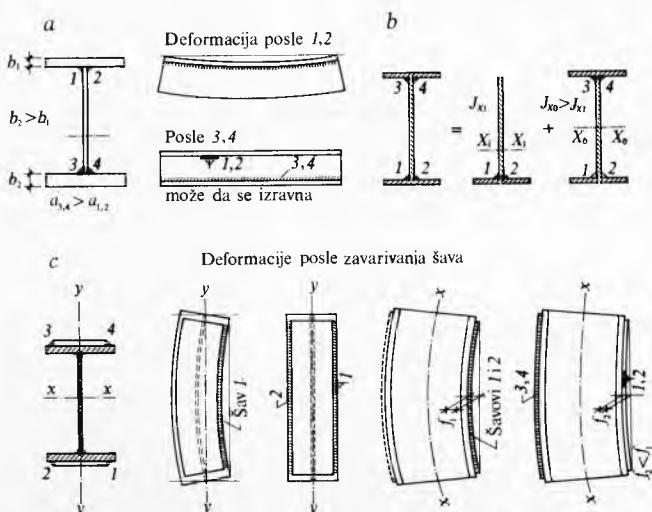
gde su C, Mn, Cr, ... procenitni udeli elemenata u osnovnom materijalu. Smatra se da je čelik pogodan za zavarene konstrukcije, tj. da se može zavarivati bez posebnih mera predustrožnosti, ako je ekvivalent ugljenika manji od izvesne iskuštvene granice ($CE < 0,45 \dots 0,50\%$). Niskougljenički čelik ČN 24 ima $CE = 0,25$, a čelik ČN 36 ima vrednost ekvivalenta ugljenika $CE = 0,45$. ČN 24 neosetljiv je prema kaljenju, što znači



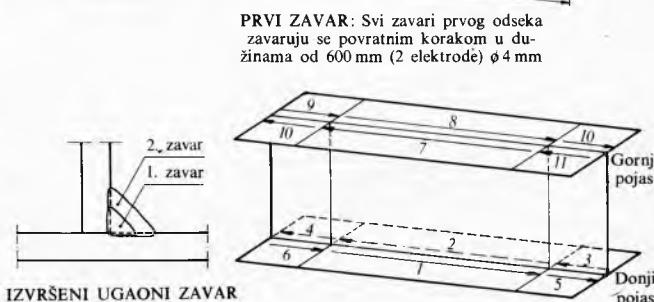
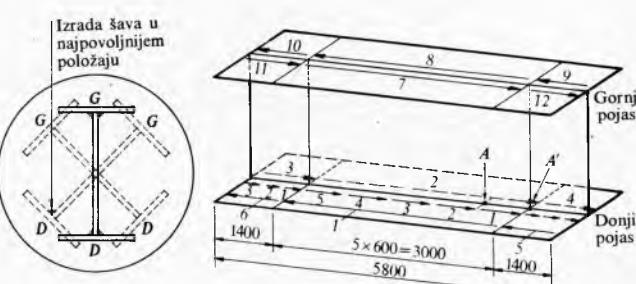
Sl. 34. Opšte deformacije usled zavarivanja mogu izobličiti oblik i razmere celog elementa. f_1 glavna deformacija, f_2 lokalna deformacija



Sl. 35. Prethodne deformacije u suprotnom smeru za smanjenje krajnjih deformacija



Sl. 36. Uticaj redosleda zavarivanja na opšte deformacije, a i b u vertikalnoj ravni u različitim fazama nastajanja zavarenog elementa, c posle ojačanja I-nosača zavarivanjem dodatne lamele prema redosledu zavarivanja



Sl. 37. Plan zavarivanja za I-nosač

da ima dobra zavarljiva svojstva, dok je ČN 36 negde ispod dopuštene granice. Međutim, danas zapravo nema nezavarljivih čelika. Čelici sa nepovoljnim ekvivalentom ugljenika mogu se ipak uspešno zavarivati uz određene mere, npr. predgrevanjem. Sklonost kaljenju zavisi mnogo i od debljine komada koji se zavaruje. Deblji komad brže odvodi toplotu te su i brzine hlađenja veće, usled čega su i efekti kaljenja nepovoljniji. Debljina komada može biti nepovoljna i usled mogućnosti pojave trošnkih naponskih stanja.

Defekti koji se pri visokim vrednostima CE mogu pojavit u jesu vruće i hladne prsline, prsline ispod zavara i prsline pri termičkoj obradi otpuštanja napona zavarenog spoja. Vruće prsline nastaju za vreme hlađenja kada usled skupljanja delova sa nakupljenim nečistoćama, koji materijal pri hlađenju izlučuje, ne mogu više da izdrže nastala naprezanja. Hladne prsline nastaju posle hlađenja usled prisustva vodonika u šavu. Pojava prsline ispod zavara ima kompleksnije uzroke: zakaljivanje u zoni uticaja toplote uz liniju topanja, prisustvo vodonika i visoki sopstveni naponi.

Pojam zavarljivosti danas se mnogo kompleksnije posmatra: razrađene su tzv. parametarske analize, koje daju uvid u poнаšanje čelika pod uticajem zavarivanja i upućuju na postupke kad se zavaruju teže zavarljivi materijali.

Dodatni materijal ima vrlo velik uticaj na kvalitet zavarivanja. Dodatni materijal dodaje se u obliku šipki pri ručnom elektrolučnom zavarivanju i TIG postupku, ili u obliku namotaja od žice koja se kontinualno dodaje pri postupcima EPP, MIG, MAG (CO_2).

Ručno elektrolučno zavarivanje, prvi postupak zavarivanja koji je dobio industrijski značaj, napravilo je presudan korak u svojem usponu posle pronalaska O. Kjellberga (1904) da se gola žica obloži određenom smesom koja olakšava i poboljšava uslove zavarivanja. Obloga elektrode ima sledeće funkcije: pomaganje ionizacije luka, stvaranje gasne zaštite rastopljenom metalu, pokrivanje rastopa troskom, koja sprečava prodiranje vazduha, usporava očvršćivanje (što omogućuje prečišćavanje rastopa), i, najzađ, omogućava dovođenje sastojaka u rastop koji ga oplemenjuju. Prema hemijskom sastavu oblage, razlikuju se oksidne, rudnokisele, titanskokisele, bazične i celulozne oblage. Svaka od njih ima svoje prednosti, pa prema tome i područje primene. Najkvalitetniji dodatni metal daju bazične elektrode, ali je rad njima i najteži. Elektrode sa titanskokiselim oblogom najviše se upotrebljavaju. Elektrode sa oksidnim oblogama više se ne upotrebljavaju. Elektrode sa celuloznom oblogom dobijaju u poslednje vreme značaj zbog stvaranja dubokog uvara i mogućnosti zavarivanja u svim položajima, što ima naročiti značaj u današnjoj intenzivnoj gradnji velikih cevovoda za transport ugljovodonika (nafte i sl.).

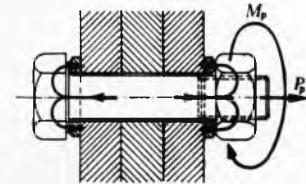
U poluautomatskim postupcima, kao što je elektrolučno zavarivanje pod prahom (EPP), prah ima istu funkciju i sličan hemijski sastav kao obloga na elektrodi. Pri elektrolučnom zavarivanju sa zaštitnim gasovima (TIG, MIG, MAG) rastop je zaštićen atmosferom iz pištolja, a za legiranje služe puna žica ili elektroda od tankog savijenog lima napunjena prahom. Hemijski sastav elektroda oblage i praha zavisi od vrste osnovnog materijala.

Visokovredni zavrtnji. Uvedeni najpre u SAD (1949), dobijaju sve veći značaj u metalnim konstrukcijama, naročito kao zamena zakivcima pri montaži (u inače zavarenim konstrukcijama). U spojevima sa visokovrednim zavrtnjima sile se prenose *trenjem* između delova u kontaktu, preko velikog pritiska koji nastaje pritezanjem visokovrednog materijala od kojeg su zavrtnji izrađeni. U izvesnim konstrukcijama (industrijske hale, visokogradnja, mostovi i dr.) ovi su zavrtnji naprezzani i aksialno od sila u eksplataciji (sl. 25b).

Takvo spajanje delova konstrukcije sa uspehom se primeњuje. Na svim velikim mostovima izgrađenim za poslednjih 15 godina delovi konstrukcije na gradilištu, ako nisu zavarivani, spajani su visokovrednim zavrtnjima.

Stanje površina koje se dodiruju važno je pri upotrebi tog spajnog sredstva. Pravilnim izborom postupka može se postići koeficijent trenja od $\sim 0,5$, koji inače iznosi $\sim 0,3$. Drugi parametar od značaja je uvođenje *odredene* sile zatezanja u vrat-

zavrtnja, koji zatim steže paket koji se spaja (sl. 38). To se postiže jakim pritezanjem navrtke zavrtnja kontrolisanim torsionim momentom M_p pomoću posebnog ključa (sl. 39). Steže se ručno ili mehanizovano pomoću pneumatskog zatezača sa tangencijalnim udarima (sl. 40). Sila koja može da se prenese takvim zavrtnjem jednaka je proizvedenom trenju, što znači da zavisi od uvedene sile u vrat zavrtnja (preko momenta pritezanja), kvaliteta materijala i površine vrata zavrtnja, kao i koeficijenta trenja između pritegnutih ploča (za jedan zavrtnj i jednu spojnu površinu).



Sl. 38. Shema rada visokovrednog zavrtnja. Okretanjem glave momentom M_p uводи се у врат зavrtnja сила P_p која стеже пакет limova



Sl. 39. Ručni ključ za pritezanje visokovrednog zavrtnja



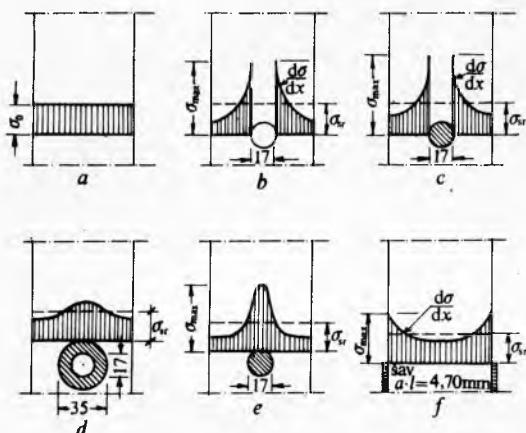
Sl. 40. Pneumatski zatezač sa udarima za pritezanje visokovrednog zavrtnja

Materijal koji se upotrebljava za visokovredne zavrtnje niskolegirani je čelik sa konvencionalnom granicom velikih izduženja od 900 N/mm^2 . Matica je od istog materijala kao i zavrtnji, a pločice su termičkim postupkom otvrđene na tvrdoruču koju ima materijal zavrtnja. Najveća sila koja se može preneti takvim zavrtnjem u jednoj kliznoj ravni ograničena je proizvedenim trenjem. Optimalna hraptavost se postiže pomoću mlaza šljunkovidogtopljenog čelika, dvostrukim plamenovanjem, peskanjem ili premazima koji povećavaju trenje (premazi sa anorganskim dodacima, npr. cink-silikat). No, iako se desi da se ta sila i prevaziđe, pomera se vrat zavrtnja u rupi i krajnji rezultat može da bude da visokovredni zavrtnji deluju kao običan zavrtnj naprezzan smicanjem vrata i pritiskom u omotaču rupe. Nema dakle opasnosti od otkazivanja moći nošenja. Smatra se da je veza proklizala ako se javi pomeranje veće od $150 \mu\text{m}$.

To sredstvo spajanja i ekonomski je povoljno, povoljnije od zakivanja koje istiskuje i svojim kvalitetnim prednostima. Tri su glavne prednosti pred zakivcima: maksimalna krutost veze, veća sposobnost nošenja pri statičkom naprezanju, a naročito znatno veća moć nošenja pri zamoru. Ostaje još i prednost da se zavrtnji montiraju bez buke, što je manja zakivanja.

Postupak pritezanja je razrađen. Važna je tačna vrednost momenta pritezanja, što treba čestim baždarenjem, i uvek kada se uslovi rada promene, održavati u kontrolisanom stanju.

Sa konstruktivne strane, za raspored visokovrednih zavrtnjera vrede sva pravila za raspored zakivaka s jednakim prečnicima



Sl. 41. Raspored napona u merodavnim presecima zategnutih štapa. a) puni štap, b) štap sa rupom, c) zakovani štap, d) štap sa visokovrednim zavrtnjem, e) štap sa navarenom tačkom, f) štap sa ugaonim šavovima. Koeficijent koncentracije $\alpha_k = \sigma_{max}/\sigma_{sr}$

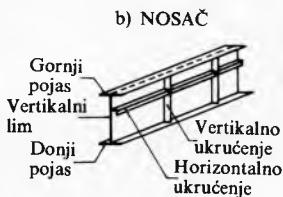
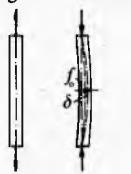
vrata. Što se konstrukcijskog elementa tiče, prednost je i u tome što ni u zategnutim delovima ne treba odbijati rupe kao oslabljene delove pri protoku sila kroz presek sa rupom, usled toga što se deo sile prenosi na elemenat koji silu prima još pre preseka u kojem je rupa (sl. 41).

KONSTRUKCIJSKI SISTEMI

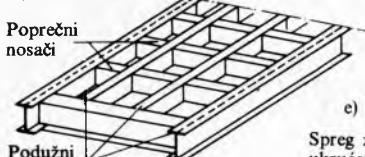
Za obezbeđenje nosivih i drugih funkcija metalnih konstrukcija ostvareni su vrlo različiti konstrukcijski sistemi prema osnovnim zadacima, a u datim uslovima i za obezbeđenje životnih i radnih uslova te za zaštitu od dejstva okoline. Stambene zgrade i birovi zahtevaju uglavnom obezbeđenje životnih i radnih uslova, te zaštitu od atmosferskih uticaja. Industrijske

a) ŠTAPOVИ

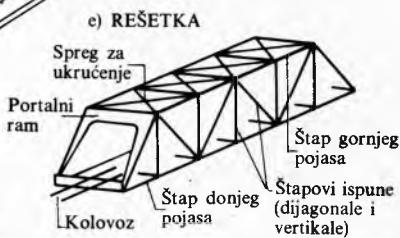
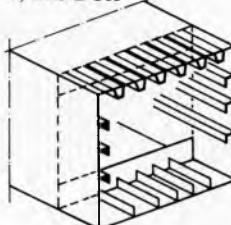
Zategnut Pritisnut



c) ROŠTILJ



d) SANDUK



Sl. 42. Konstrukcijski elementi

zgrade moraju ispunjavati uslove rada. U tu kategoriju metalnih konstrukcija sa težim uslovima spadaju: platforme za bušenje u moru, mostovi koji omogućuju transport preko prirodnih i drugih prepreka. Rezervoari, silosi, bunkeri, visoki dimnjaci, razni stubovi i tornjevi imaju svoje specifične zadatke. U nuklearnim elektranama materijal je suočen sa težim uslovima (ozračenje, visoke temperature itd.), a zadatak je konstrukcije, osim ostalog, i osiguranje čovečje okoline.

Za izvršenje navedenih funkcija primenjuju se različiti konstrukcijski elementi (sl. 42), odnosno sistemi (sl. 43).

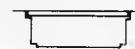
Štap (sl. 42a) je prizmatičan elemenat napregnut prvenstveno aksijalno, tj. linearno.

Štap je štapski elemenat, često kompleksno napregnut osim osnim još i poprečnim silama i napadnim momentima u jednoj ili obe ravni.

Gredni nosač (sl. 43a) je punozidna ili rešetkasta konstrukcija u jednoj ravni, oslonjena na svojim krajevima (na jednom pomicno, na drugom nepomicno). To je prosta greda. Ako se produžava preko više polja, bez prekida na osloncima, naziva se kontinualni nosač (ili greda). Gredni nosači su napregnuti transverzalnim silama i napadnim momentima u svojoj ravni, ređe aksijalnim silama i silama van svoje ravni.

a) GREDNI NOSAČ

Prosta greda



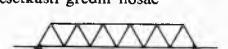
Kontinualni gredni nosač



Greda ojačana lukom



Rešetkasti gredni nosač



b) LUČNI NOSAČI

Puni luk



Luk ojačan gredom

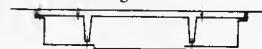


Rešetkasti luk

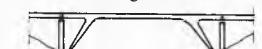


c) RAM

Sa bočnim gredama



Sa kosim nogama



d) NOSAČ SA KOSIM ZATEGAMA



e) VISEĆI MOST SA GREDOM ZA UKRUĆENJE



Sl. 43. Konstrukcijski sistemi

Ram (sl. 43c) je kombinacija nosača i stubova koji su međusobno kruto povezani u svojoj ravni. Obično pod ravnim uglom, u jednu celinu (ugao ne mora iznositi 90°). Ramovi preuzimaju sve tri vrste naprezanja: transverzalne uticaje, napadne momente i horizontalne sile. Nožice su ili zglobozno oslonjene ili ukleštene (ram na dva zglobozna ili uklešteni ram). Ramovi mogu biti jednospratni i višespratni, jednobrodni i višebrodni.

Roštilj (sl. 42c) je sistem paralelnih nosača raspoređenih u dva, obično ortogonalna pravca, spojenih vezama koje primaju momente. Najčešće su pod pravim uglom. Roštilj je naprezan upravo na svoju, srednju ravan, tj. savijanjem. Karakteristika je roštilja saradnja više nosača u prijemu i nošenju naprezanja (spoljnog opterećenja). Primenjuje se u mostovima i svuda tamu gde se teški tereti primaju i dalje prenose, pa je stoga korisna raspodela na više elemenata.

Luk (sl. 43b) je krivolinijski nosač, punozidni ili rešetkasti, koji je oslonjen na dva kraja, zglobozno ili je uklešten. Poseban je oblik luka luk na tri zgloboza, od kojih su dva na osloncima, a treći u temenu. To ima svoj odraz u proračunu nosivosti. Najčešće je primena lukova u mostogradnji, ali i za velike hale.

Nosač na kosim zategama (sl. 43d) je najmladi sistem (od pedesetih godina ovoga veka) koji se primenjuje za gradnju

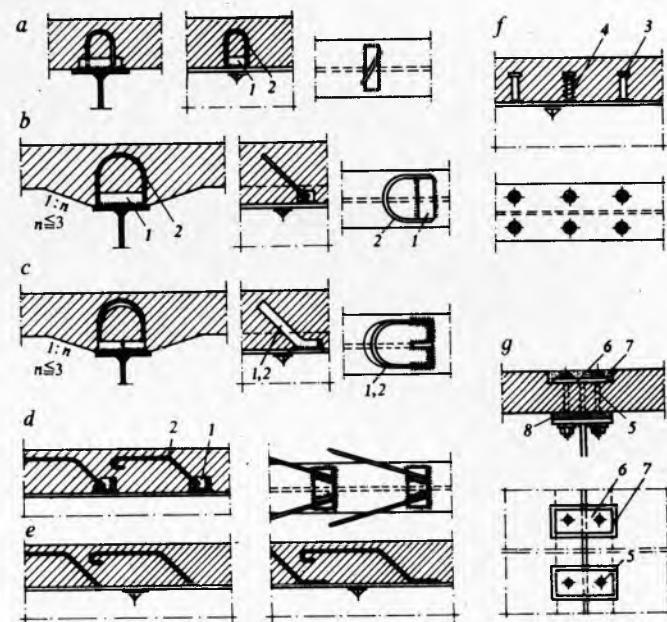
mostova sa rasponom većim od 200 m. Nosač je kosom užadi poduhvaćen u izvesnom broju tačaka koje predstavljaju za nosač elastične oslonce. Sila iz užeta razlaže se u komponentu koja podupire nosač, a u komponentu pritiska u pravcu nosača. Dosad postignuti rasponi omogućuju predviđanje da se tim sistemom mogu premostiti rasponi do 1000 m. Taj se sistem primenjuje i u visokogradnji, za sportske hale i tribine.

Viseći mostovi. Za premoštenje najvećih prepreka, u mostogradnji, primenjuju se sistemi visećih mostova. Sistem se sastoji od lančanice i nosača za ukrućenje, koji ujedno nosi kolovoznu tablu. Lančanica prenosi teret od oslonca do oslonca, a nosač za ukrućenje rasprostire svojom krutošću deformaciju lančanice na veću dužinu, i time omogućuje upotrebljivost objekta i njegovu stabilnost.

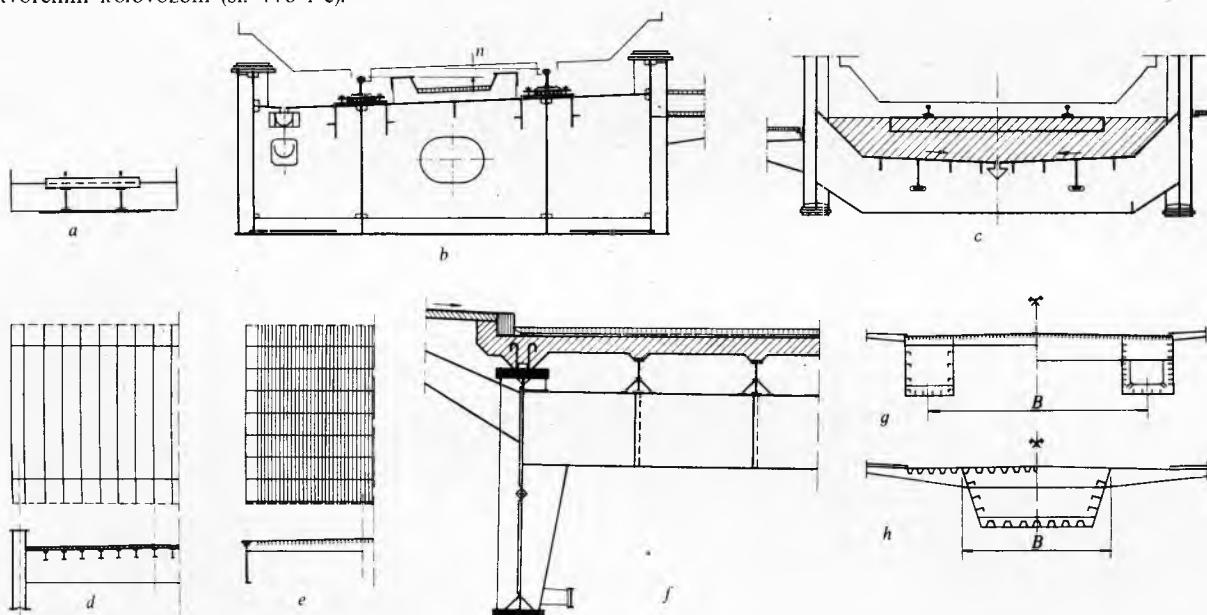
Mostovske konstrukcije. U mostovskim konstrukcijama ti se elementi kombinuju i daju nove oblike. Razlikuju se uglavnom dva: linijski i površinski sistem.

Ako je kolovoz otvoren, to je linijski sistem. Sastoji se od dva glavna nosača (rešetkasta ili puna), kolovoznih nosača (sa kolovoznom tablom), spregova za ukrućivanje u gornjem i donjem pojusu, te portalna koji osigurava poprečnu krutost konstrukcije i prenosi reakcije gornjeg pojasa na oslonce (sl. 44a). Tipičan primer je železnički most sa otvorenim kolovozom na donjem pojusu.

Kolni most ima zatvoreni kolovoz, ali je u prvoj fazi bio konstruisan samo kao prenosnik opterećenja od vozila na glavne mostovske nosače (sl. 44d), a računat je kao linijski sistem. Kasnije se ta dva elementa (ploča i ortotropna ploča-nosač, sl. 44e) spajaju u celinu. To je početak primene površinskih sistema. Savremena je koncepcija: dva sanduka spojena ortotropnom pločom (sl. 44g), ili samo jedan torziono kruti sanduk (sl. 44h) sa konzolama i ortotropnom kolovoznom pločom. Površinski sistemi se grade i za železničke mostove, ali tada sa zatvorenim kolovozom (sl. 44b i c).



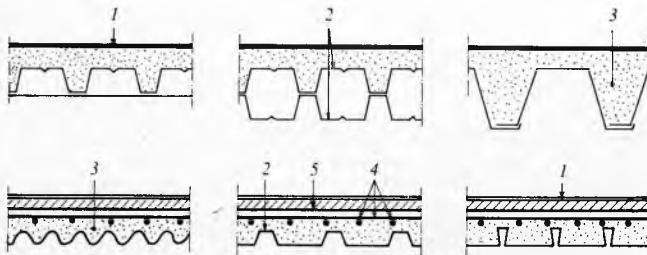
Sl. 45. Različite vrste sprejanja moždanikom. a i b sastavljeni su od krutog paralelopipednog moždanika 1 i od uzengije od okruglog čelika 2, uzengija služi i kao anker protiv odizanja ploče i za prijem zateznih, odnosno koso zateznih sila; c moždanik i uzengija su oblikovani od trakastog čelika, d i e varijante od a i b, ali lakšeg tipa koji se upotrebljava u zgradarstvu, f moždanik sa zavarenim zavrtnjima 3 za čelični nosač (glava zavrtnja sprečava odvajanje betonske ploče od čeličnog nosača, a spirala 4 oko vrata zavrtnja služi kao armatura za beton oko zavrtnja), g moždanik sa visokovrednim zavrtnjima 5 (primenjuje se kada je armiranobetonska ploča izrađena kao pret-fabricirana i položena preko čeličnog nosača na sloj maltera 8, debljine 20–30 mm; oba zavrtnja su spojena pločicom 6, a glave zalivenе cementnim malterom 7)



Sl. 44. Prikaz evolucije sistema kolovoza i glavnih nosača. a otvoreniji železnički kolovoz, b zatvoreniji železnički kolovoz, ortotropna ploča, kolovoz direktno na ploči, c zatvoreniji železnički kolovoz, ortotropna ploča, kolovoz u zastoru, d zatvoreniji kolni kolovoz, starija izvedba, kolovozni roštaj je težak, e zatvoreniji kolni kolovoz, novija ekonomičnija izvedba, ortotropna kolovozna ploča, f zatvoreniji kolni kolovoz, spregnuta armiranobetonska ploča kolova sa čeličnom konstrukcijom glavnih nosača, g zatvoreniji kolni kolovoz sastavljen od dva sanduka spojena ortotropnom pločom kao gornjim pojasm, h zatvoreniji kolni kolovoz sa torziono krutim glavnim nosačem i podužnim rebrima ortotropne ploče

Za mostove raspona 60–80 m konkurentne su i tzv. spregnute konstrukcije. Pod sprejanjem se podrazumeva zajednički rad dvaju konstruktivnih delova od različitih materijala u novom sistemu, u kojem je sprejanjem postignuto maksimalno iskoriscavanje njihovih pojedinačnih svojstava. Tako je, npr., na mostovima sa kolovozom na gornjem pritisnutom pojusu kolovozna tabla izgrađena od armiranog betona, a nosiva konstrukcija glavnih nosača mosta od čelika (sl. 44f). Da bi se dobila preraspodela napona prema odvojenom radu svakog od

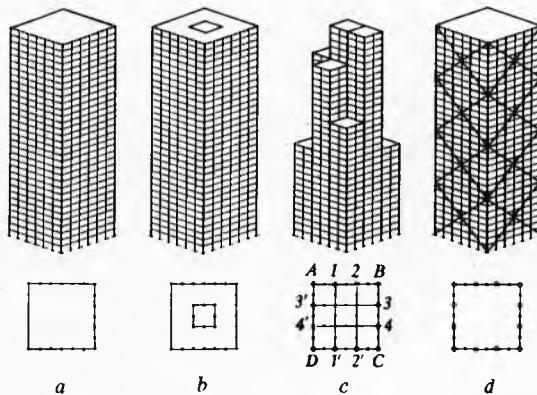
dva konstruktivna elementa, treba ih spregnuti, tj. postići da rade kao celovit sistem. To se postiže sprečavanjem klizanja na dodirnoj površini dva elemenata, ugrađivanjem tzv. moždanika (sl. 45). Takvi se sistemi primenjuju za kolne i za železničke mostove te u zgradarstvu (sl. 46). Spregnute konstrukcije donose konstrukcijske i ekonomske koristi. Kad je takav sistem primenjen na železnički most (kolovoz je istovetan na otvorenoj pruzi i mostu), olakšano je njegovo održavanje, čak i u krivinama (podbijanje zastora). Osim toga, postiže se



Sl. 46. Spregne tavanice u zgradarstvu sa profilisanim limovima. 1 podni pokrivač, 2 profilisani lim, 3 beton, 4 armatura, 5 sloj za izravnjanje

dobra zaštita od korozije, što takođe olakšava održavanje. Glavni nosači toga sistema grade se kao linijski ili površinski nosači. Prednost pri primeni spregnutih sistema ima prosta pred kontinualnom gredom zbog komplikovanije montaže. U slučaju kontinualnog nosača, rad pri montaži je komplikovaniji, a beton iznad oslonaca (u zonama negativnih momenata) mora se prednaprezati da bi se izbegle prsline u betonu, što poskupljuje izradu. Ima, međutim, značajnih građevina izvedenih i u obliku kontinualnih sistema. Prilikom proračuna tih sistema računa se sa plastičnom deformacijom betona pod opterećenjem i sa skupljanjem prilikom očvršćivanja, jer te pojave utiču na preraspodelu naprezanja u nosaču.

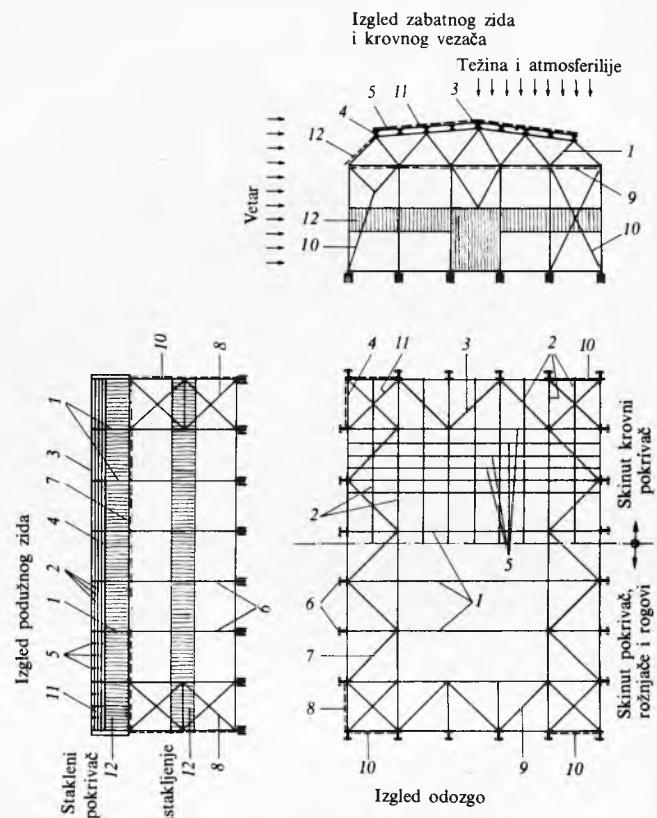
Visoke građevine u užem smislu (stambene, poslovne zgrade i sl.), industrijske zgrade, hangari, garaže i sl. spadaju u poseban konstrukcijski sistem koji se naziva *skeletonna građevina*. To su građevine kojima su nosivi deo (kostur) stubovi, podvlake, ramovi ili vezači, a obimni zidovi, međuspratne tavanice i krovne površine zatvaraju građevinu i dele je na spratove. Zbog svojih osobnosti skeletnim građevinama, u užem smislu, nazivaju se visoke građevine (sl. 47), dok se industrijske građevine, hangari i sl. nazivaju *bondruk-građevine* (sl. 48). U prvima je predominantna visina, a u drugima su naglašene horizontalne dimenzije. Naziv su dobile prema sistemu osiguranja stabiliteta. Ske-



Sl. 47. Konstrukcijski sistemi visokih građevina. a skeletna cev, b skeletna cev u cevi, c snopasta cev, d opasna cev

letne građevine imaju obimne stubove koji služe kao osnovno sredstvo otpornosti, pa se njihovo ponašanje približava vertikalnoj konzolnoj cevi sa punim zidovima ukleštenoj u osnovu (suprotno evropskoj praksi). U bondruk-građevinama nosivi elementi, stubovi i krovni vezači postižu punu stabilnost oslanjanjem na pomoćne elemente (spregove), koji prenose horizontalne reakcije stubova i vezača u temelje. Zidovi nisu nosivi elementi, već elementi koji služe prvenstveno za zatvaranje prostora od spoljnih atmosferskih uticaja, a u unutrašnjosti služe za raspodelu korisnog prostora. Skeletne građevine, u užem smislu, imaju međuspratne konstrukcije, koje su u modernim građevinama najčešće spregnutog tipa. Noseći skelet visokih građevina može biti obložen oblogom npr. od aluminijumske legure, te se nosiva konstrukcija, skelet, ne vidi, ili su pak tako arhitektonski projektovane da se konstrukcijski elementi vide.

Hale obično nemaju plafone, te se čelična krovna konstrukcija vidi. Radni uslovi osigurani su pogodnim osvetljenjem, topotnom izolacijom i prečišćavanjem vazduha. Prema proizvodnji, takve hale imaju kranove (sl. 49), već prema tehnoškim zahtevima. U teškim pogonima, npr. metalurškim i sl., instalirani su kranovi nosivosti i do 300 t, sa rasponima i visinama većim od 25 m (sl. 50). Bondruk-građevine mogu biti jednobrodne ili višebrodne, već prema tehnoškom procesu za koji su predviđene. Stabilitet se osigurava i na principu da jedna od hala primi sve horizontalne sile, a da se ostale na nju naslanjavu.



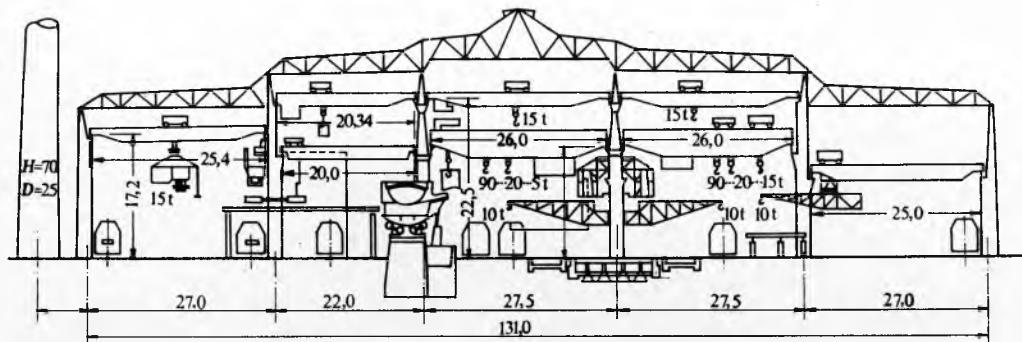
Sl. 48. Bondruk-građevina. 1 krovni vezači, 2 rožnjače, 3 slemenjače, 4 venčanice, 5 rogovi, 6 stubovi, 7 horizontalni spreg u poduznom zidu, 8 vertikalni spreg u poduznom zidu, 9 horizontalni spreg u zatvornom zidu, 10 vertikalni spreg u zatvornom zidu, 11 krovni pokrivač, 12 zastakljeni deo

Sportske i izložbene hale, hangari i slične građevine, koje pokrivaju velike površine bez međustubova slične su bondruk-građevinama. Tada nosive elemente i krovne vezače preuzimaju drugi pogodni konstrukcijski sistemi: lukovi, ramovi, konzolni sistemi sa zategama, lančanicama i sl., već prema funkcionalnosti i ekonomičnosti rešenja.

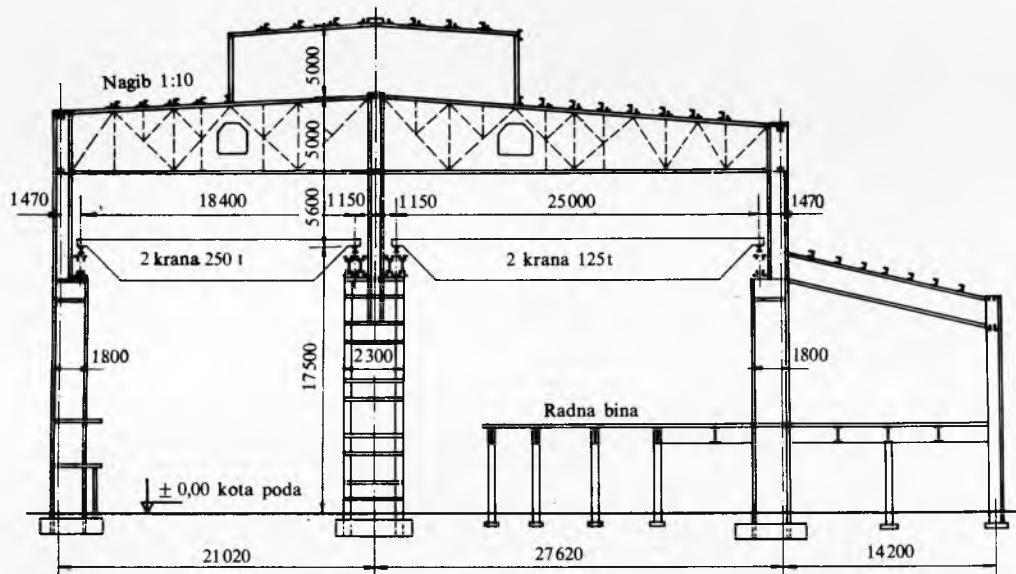
Rezervoari, cevovodi i sudovi pod pritiskom, te slične konstrukcije, zapravo su ljske koje se posebno tretiraju prema eksploracijskim uslovima. Iako su istoga tipa, to su vrlo raznolike građevine. Rezervoari mogu biti za tečnosti ili gasove na okolnoj temperaturi i pod malim natpritiskom (sl. 51), dok su drugi u eksploraciji na niskim ili na visokim temperaturama i pod znatnim pritiskom. Tečnosti i gasovi mogu hemijski agresivno delovati na materijal rezervoara. Od svih tih parametara zavisi upotrebljena vrsta čelika, njegova debljina i dimenzije rezervoara.

Cevovodi pod pritiskom za dovod vode iz akumulacije u turbine hidroelektrane (v. *Hidroelektrane*, TE 6, str. 382) jesu često dugi cevovodi velikog prečnika, što zavisi od visinske razlike razine akumulacije i ispusta, te od količine vode koja u jedinici vremena treba da prođe kroz cevovod. Prečnici iznose i nekoliko metara, a debljina zidova i do 100 mm. U prošlosti je bilo nekoliko spektakularnih udesa ovih objekata.

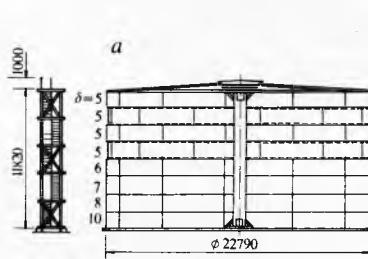
Sudovi za nuklearne reaktore i procesus hemijsku industriju vrlo često su teške konstrukcije, velikih prečnika, vrlo često sa



Sl. 49. Teška industrijska hala, čeličana



Sl. 50. Višebrodna industrijska hala (mere u mm)

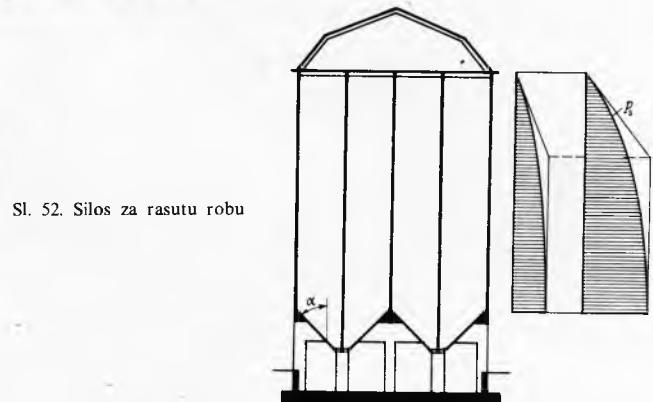
Sl. 51. Rezervoar zapremine 5000 m^3 . δ dužina lima u mm

zidovima debelim više od 100 mm, a koji put dostižu 300 mm i više. Takvi sudovi obično se izvode od specijalnih čelika, a delovi se spajaju jedino zavarivanjem.

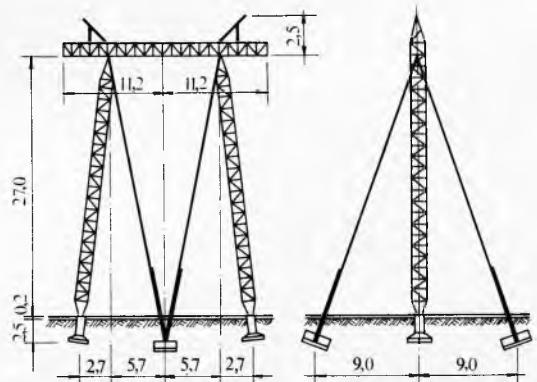
Silos i bunker su takođe veoma raznovrsne građevine. Obično su to visoke čelije (sl. 52) u baterijama postavljene na stubove da bi se omogućio istovar. Silosi i bunkeri pune se pokretnim trakama i kosim rampama. Pri projektiranju silosa i bunkera još ima nerešenih problema; jedan je od tih npr. dimenzionisanje zidova jer pri isticanju zrna žitarica usled unutarnjeg trenja mogu da nastanu 2...3 puta veći pritisci na zidove od onih sa kojima se obično računa.

Zatvaračnice su hidrotehničke građevine za regulisanje preliva na ustavama i branama. Iako su kao hidrotehničko-građevinske konstrukcije izvedene kao ljsuske, zbog svoje funkcije pod pritiskom, potrebni su posebni mehanizmi, a pojavljuju se problemi zaptivanja.

Stubovi su konstrukcije koje služe kao visokonaponski dalekovodi za prenos električne energije (sl. 53; v. Dalekovodi, TE 3,

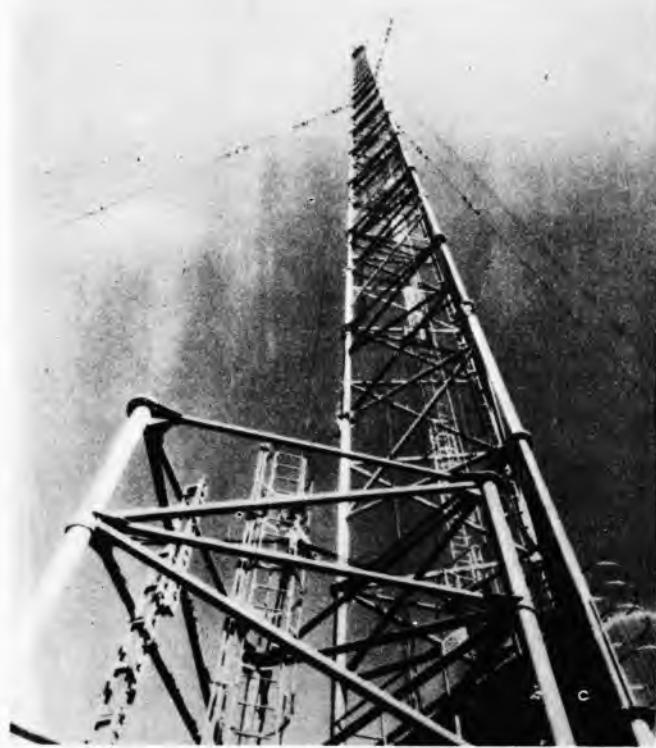


Sl. 52. Silos za rasutu robu



Sl. 53. Stub dalekovoda za prenos električne energije (mere u m)

str. 136), kao antenski stubovi (v. *Elektronika, sistemi i uredaji, Antene*, TE 4, str. 603) i stubovi za specijalne svrhe. U principu su to konzole ukleštene u temelje, ili stubovi ukotvљeni po-

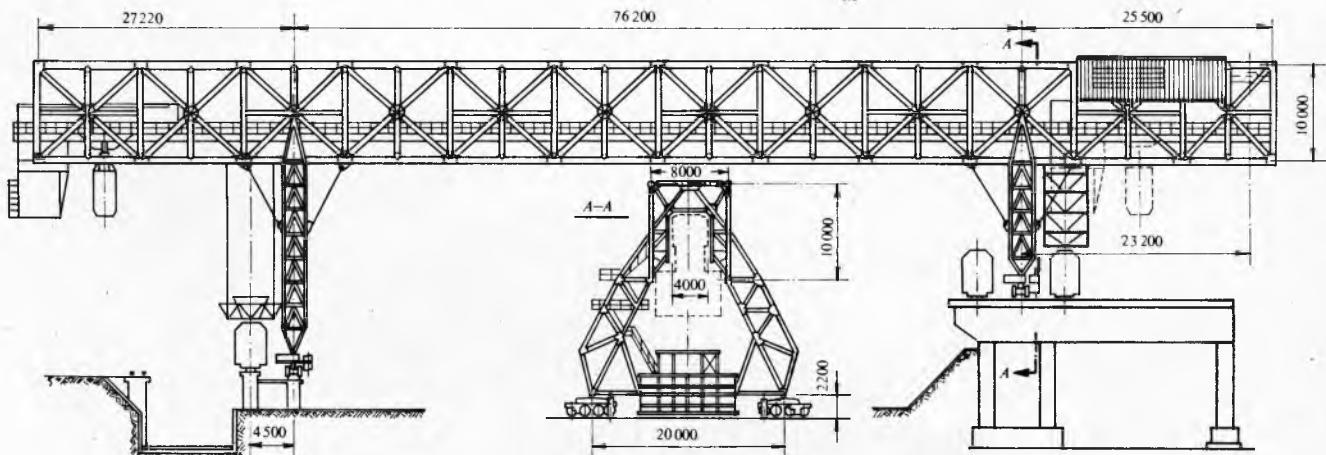


Sl. 54. Najviši ankerovani radio-antenski stub na svetu (Poljska), visina 645 m

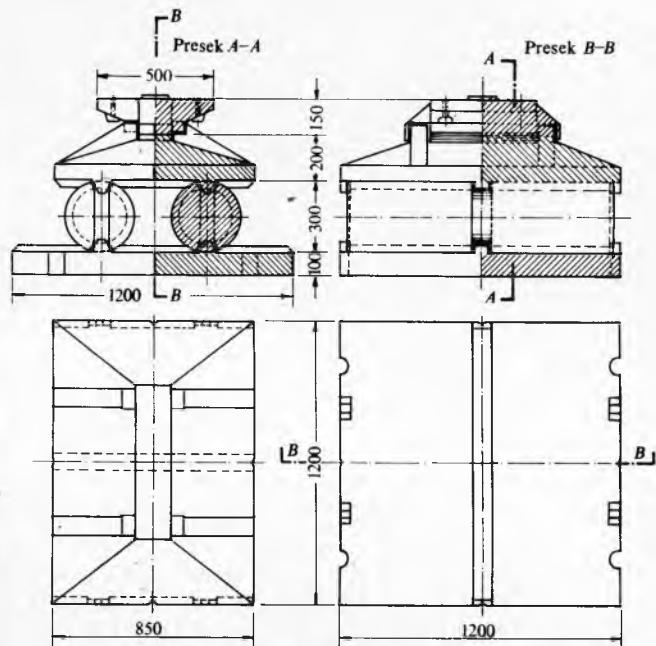
moću čelične užadi u ankerne blokove. Konstruisani su od rešetaka ili cevi. Među takve konstrukcije spadaju i visoki dimnjaci. Na sl. 54 vidi se najviši stub na svetu izrađen u Poljskoj, visok 645 m, iz žabljе perspektive, koji je ankerovan u pet razina.

Tornjevi za bušenje u moru nove su konstrukcije, koje su naročito razvijene poslednjih 20-30 godina. To su konstrukcije koje se spuštaju direktno na dno mora ili su za dno vezane ankerima. Dužina nogu dostiže i 150 m, visina nad morem i više od 100 m, teške su i više od 10000 t. Na svojim platformama nose opremu za bušenje, odnosno eksploataciju bušotina, tešku i do 2000 t. Rade u svakim vremenskim uslovima.

Specijalne konstrukcije. U specijalne tipove konstrukcija ubrajuju se npr. *radio-teleskopi* za praćenje satelita, kosmičkih brodova ili pojave u kosmosu i sl. Oni moraju imati neobično krutu konstrukciju radi fiksiranja fokusa.



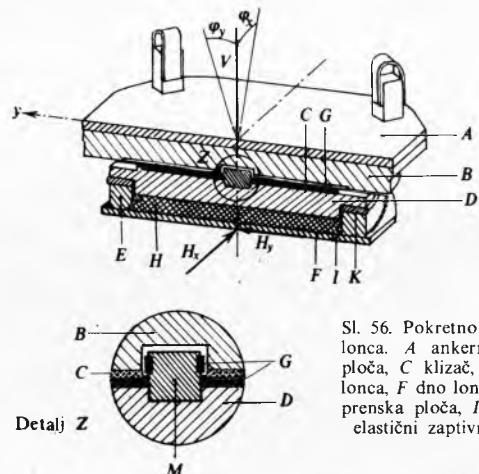
Sl. 57. Pretovarni most (mere u mm)



Sl. 55. Pokretno mostovsko ležište, tip s valjcima

Među metalne konstrukcije spadaju i *priestišne dizalice* za utovar i istovar, na kojima su mehanizmi, jer su i samohodne i autonomne u radu.

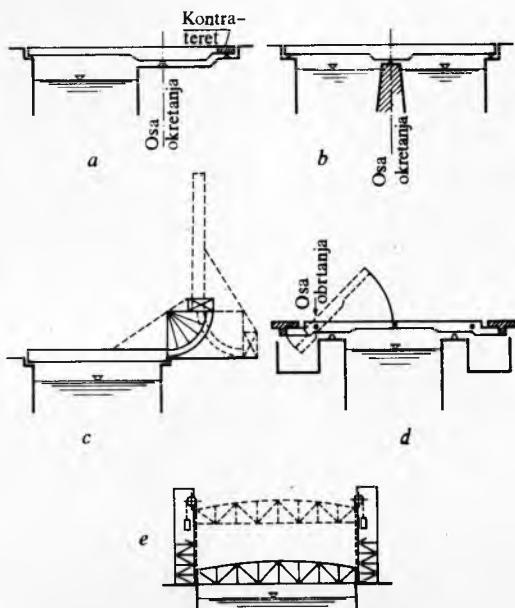
Ležišta su konstrukcijski elementi koji omogućuju stubu, grednoj, ramskoj, lučnoj i drugoj konstrukciji da prime uticaje naprezanja koja na njih deluju i da omoguće pomak u pred-



Sl. 56. Pokretno ležište neoprenskog lonca. A ankerna ploča, B klizna ploča, C klizac, D poklopac, E zid lonca, F dno lonca, G teflon, H neoprena ploča, I zaptivni prsten, K elastični zaptivni prsten, M rebro

viđenom smeru, okretanje ili pomak i okretanje (npr. pokretno ležište, sl. 55). U poslednje vreme se sve više širi upotreba ležišta s plastičnim masama u naročitim loncima (sl. 56) koji su efikasni, a konstruktivno jednostavni (v. *Mostovi*).

Posebnu grupu nosivih konstrukcija predstavljaju *pretovarni kranovi* (sl. 57) i *pokretni mostovi* (sl. 58), koji su donekle pokretni; prvi, jer prenose teret, a drugi, jer svojim položajem zatvaraju plovni put, obično kanale ili pristaništa. Radi propuštanja brodova pokretni se mostovi pokreću okretanjem oko vertikalne ose (sl. 58a i b), oko horizontalne ose (sl. 58c i d) ili se dižu da oslobođe propusni gabarit (sl. 58e).



Sl. 58. Vrste pokretnih mostova

PRORAČUN ČELIČNIH KONSTRUKCIJA

Proračun dimenzija nosivih čeličnih konstrukcija vrši se u Jugoslaviji prema postojećoj tehničkoj regulativi. Ta regulativa određuje opterećenja koja na određene konstrukcije deluju i dozvoljene napone koji se u delovima konstrukcije mogu javiti. Opterećenja se dele već prema vrsti konstrukcije na stalni teret i promenljivo opterećenje. Pod stalnim teretom podrazumeva se sopstvena težina konstrukcije i ugrađenog građevinskog materijala, pritisak stenskih (zemljanih) materijala i koristan teret u nekim konstrukcijama (npr. ruda ili žito u silosima, tečnosti i gasovi u rezervoarima i sudovima, i sl.). U promenljiva opterećenja ubrajaju se atmosferski uticaji (veter, zračenje sunca, led i sl.), korisna opterećenja (na mostovima, tribinama, stambenim i poslovnim zgradama, skladištima i sl.) i njihova sekundarna ili usputna dejstva.

Postupak je sledeći: za propisano dejstvo izračunaju se, za merodavni presek, presečne sile (aksijalne sile N , poprečne sile Q , napadni M i/ili torzionalni momenti M_t), pa se iz uslova da naprezanje u najnepovoljnije napregnutom vlaknu nosivog preseka ne sme preći *dovoljeno naprezanje*, određuju dimenzije poprečnog preseka elementa. Taj se postupak naziva *dimenzionisanje*.

Prosečne sile u nekom delu konstrukcije određuju se prema pravilima teorije konstrukcija. Dimenzijske se prema sledećim pretpostavkama (v. *Nauka o čvrstoći*; v. *Otpornost građevnog materijala*):

a) Prvobitno pravi presek ostaje prav i posle deformacije (Bernoullijeva hipoteza). Iz toga se izvodi i Navierov zakon za naprezanje u presecima savijanih elemenata;

b) Kad je elemenat aksijalno napregnut, računa se sa srednjim naprezanjem kojemu je intenzitet ravnomerno raspoređen po preseku. To znači da se vrhovi naprezanja koji nastaju delovanjem koncentratora naprezanja zbog geometrijskog ob-

lika konstrukcije, delovanjem eventualnih otvora (npr. rupa za zakivke i visokovredne zavrnje) u preseku i zbog skretanja toka sila u vezama ne uzimaju u obzir. Ne uzima se u obzir, dakle, eventualna lokalna plastifikacija materijala usled stvarne raspodele sile (sl. 20) u vezama;

c) Sopstveni naponi usled valjanja, zavarivanja, termičkog rezanja i sl. ne uzimaju se u obzir.

d) Kad se pojavljuju višeosna naponska stanja, uporedni napon σ_U određuje se iz izračunatih komponenata napona prema hipotezi deformacijskog rada za promenu oblika, a prema relaciji Huber-Hencky-Misesa:

$$\sigma_U = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_y \sigma_z - \sigma_z \sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}. \quad (2)$$

Ta prosta pravila rezultat su prilagođivanja usvojene sheme iz početka računanja *gvozdenih* mostova sredinom XIX v. i prvih propisa iz te oblasti. Ona su nastala nakon korekcija prvih propisa, a posle rušenja konstrukcija, zbog postepenog poboljšanja materijala do današnjeg kvaliteti čelika i zbog usavršavanja oblikovanja pomoću novih sredstava spajanja. Sve uticajne veličine su evoluirale: intenziteti spoljnih sile, poznavanje nosivosti konstrukcija (stabilitet, zamor, kriti lom), poznavanje kvaliteta materijala, povećanje kapaciteti građevinskih mašina za prenos i montažu, te iskustvo i ispitivanja konstrukcija.

Kako su se merodavni spoljni uticaji povećavali, to su u propise uvedeni i novi, dотле napredviđeni uticaji. To je bilo omogućene zbog dotada, apsolutno uvezni, niskih dozvoljenih napona, a naročito zbog povišenja kvaliteta materijala. Međutim, novo uvedeni uticaji nisu bili sistematizovani, tako da je nastala podela na primarne (I), sekundarne, odnosno totalne sile (II), koja je nelogična.

Osnovna je karakteristika toga sistema proračuna da računsko naprezanje ne sme prekoraci propisima određenu dozvoljenu granicu. Dozvoljeni napon je deo karakteristične veličine za konstrukcijske čelike, a to je zaravan u dijagramu σ, ϵ koja se ne može preći pre nego što se iscrpe kapacitet tečenja (sl. 4). Ta je vrednost nazvana granica velikih izduženja (σ_v). Vrednost dozvoljenog naprezanja prema danas važećim propisima iznosi za dejstvo primarnih sile (I) $\sigma_{dopI} = \frac{2}{3} \sigma_v$, a za dejstvo totalnih sile (II) $\sigma_{dopII} = \frac{3}{4} \sigma_v$.

S porastom znanja, iskustva i opažanja javlja se savremeni trend, koji se razvija u dva smera. Prema prvom, određivanje intenziteta uticaja i njihovih mogućih međusobnih kombinacija treba da bude određeno probabilički, a ne prostim sabiranjem maksimalnih pojedinačnih uticaja. To vredi i za određivanje svojstava materijala. Prema drugom smeru, ponašanje konstrukcijskih elemenata ne treba ispitivati, npr. do 2/3 od granice velikih izduženja (dozvoljeni napon), već do granice nosivosti, jer će samo tako konstrukcija proći sve kritične faze. Taj se postupak naziva *postupak prema graničnim stanjima*. Granično je stanje konstrukcije ono kad ona kao celina ili neki njen bitni deo postaje nesposoban da dalje ispunjava funkciju za koju je bio projektovan. Zadatak je savremenog projektovanja, prema spomenutim smerovima razvoja, osigurati da verovatnoća dostizanja nekog određenog graničnog stanja bude manja od izvesne dogovorene vrednosti koja zavisi od vrste konstrukcije. Ta verovatnoća treba da bude dovoljno mala (npr. 10^{-5}).

Postignutu sigurnost konstrukcije karakterišu tri veličine: a) vrednost nosivosti (materijal), b) vrednost kombinacija opterećenja i c) rezerva između tih dveju vrednosti.

U principu, rezerva između prvih dveju vrednosti treba da bude veća od nule i kad se vrednost opterećenja uveća određenim faktorom sigurnosti, rezerve i sl. Prema načinu kako se određuju vrednosti merodavnih veličina razlikuju se tri razine probabiličkih metoda. Problem se u svetu intenzivno pružava. Danas je moguće uvesti u praksi samo najnižu razinu, tzv. *semiprobabilistički postupak*, zato što jedna od osnovnih promenljivih, nosivost, nije usvojena kao probabilička veličina, već kao najniža garantovana vrednost proizvoda materijala. Vrednosti opterećenja, pak, zbog nedostatka statističkih podataka, uvođe se u proračun takođe sa normiranim (ponderisanim) parcijalnim faktorima, koji nisu verovatnoće pojava. Pomenuti faktori približno su izračunati iz zahtevanih stepena

sigurnosti. Iz tih razloga se taj postupak, koji se tek uvodi u praksu, naziva semiprobabilističkim postupkom.

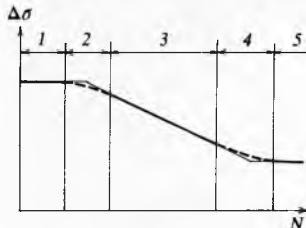
Sa gledišta konstruktora primenom postupka prema graničnim stanjima dobivaju se dva dokaza: prvi, o sposobnosti konstrukcije da nosi do svoje moći nošenja, i drugi (bez upotrebe koeficijenata uz opterećenje), da će konstrukcija moći da služi za normalnu upotrebu sa gledišta deformacija, tj. da deformacija konstrukcije neće uticati na upotrebljivost.

Tehnička regulativa u Jugoslaviji stoji pred uvođenjem semi-probabiličkog postupka proračuna.

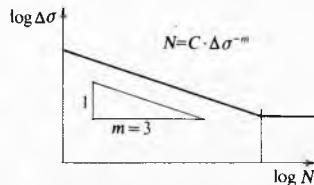
Proračun prema zamoru. Iz opita A. Wöhlera (1840) poznat je fenomen da se metalni štap može slomiti silom koja je manja od sile koja je potrebna da se štap prekine uz konstantno delovanje sile, ako se dovoljno puta ponovi opterećenje s manjom silom. Ta se pojava naziva zamor materijala.

Obično se smatra da je statički napregnuta konstrukcija ona koja u toku eksploatacije ne doživi više od 10^5 promena opterećenja. Taj kriterij nije jedini. Drugi je kriterij vrednost dostignutog naprezanja, jer se pri visokim naprezanjima može konstrukcija ili štap slomiti i sa manje od 10^5 promena opterećenja. Ako se primeni M. A. Minerova hipoteza kumulativnog oštećenja, konstrukcija (ili štap) može se smatrati kao pretežno statički opterećena (tj. neoštećena) sve dok je zbir parcialnih oštećenja $\sum N/n \leq 1$, gde je n broj ciklusa sa određenom vrednošću koji se javljaju za vreme eksploatacije konstrukcije, a N broj ciklusa opterećenja pri kojima, za određeno povećanje naprezanja ($\Delta\sigma$), nastupa lom (iz Wöhlerove krive za taj materijal). Taj broj opterećenja može biti i manji i veći od 10^5 , već prema broju pojave s povećanjem naprezanja $\Delta\sigma$ koji su delovali na konstrukciju.

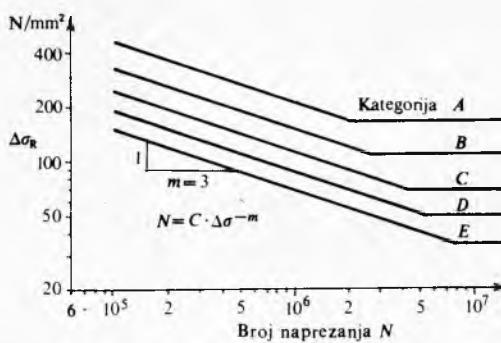
Wöhlerova linija se obično deli u 5 zona (sl. 59). Za većinu dinamički napregnutih građevinskih čeličnih konstrukcija merodavna je zona 5 i prema njoj se te konstrukcije i dimenzionisu.



Sl. 59. Deoba Wöhlerove linije. 1 statičko naprezanje, 2 niskociklično naprezanje (elastoplastični zamor), 3 visokociklični zamor, 4 prelazna zona, 5 jačina zamora



Sl. 60. Wöhlerova linija u koordinatnom sistemu $\log \Delta\sigma, \log N$



Sl. 61. Uz definiciju jačine zamora

U koordinatnom sistemu $\log \Delta\sigma, \log N$ taj odsek se može smatrati pravom linijom (sl. 60). Vrednost zamora $\Delta\sigma$ ona je vrednost $\Delta\sigma$ koju konstrukcijski elemenat može da izdrži praktično nebrojeno puta. Taj broj, pri konvencionalnom ispitivanju, iznosi $2 \dots 8 \cdot 10^6$ (sl. 61).

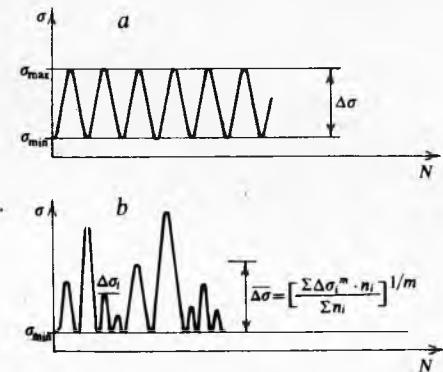
Na osnovu vrlo opsežnih eksperimentalnih ispitivanja u SAD (J. Fisher), na više od 1000 velikih zavarenih nosača i detalja elemenata od 1950. do 1970., mogu se izvesti zaključci o zamoru

materijala. Pri zamoru merodavni parametri promenljivog naprezanja za pojavu loma jesu: razlika između maksimalnog i minimalnog naprezanja ($\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$), a nije merodavan kvocijent između tih naprezanja ($\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$) kako se to smatralo, zaostali naponi nakon zavarivanja, koncentratori naprezanja koji nastaju zbog oblikovanja konstrukcije, te spoljne i unutarnje greške zavarenih šavova. Na parametre promenljivog naprezanja za pojavu loma ne utiče poboljšanje kvaliteta materijala.

Širenje prsline počinje u eksploataciji vrlo rano. Najpre se prsline širi polagano i ta faza traje kroz najveći deo ukupnog života dela konstrukcije. Kada prsline dostigne kritičnu veličinu, ona počinje brzo da se širi i tek se onda vidi. Tada je, međutim, obično već blizu lom celog preseka. Metodima mehaničke lome može se predvideti broj naprezanja do loma.

Seizmika. Poseban oblik dinamičkog proračuna inženjerskih konstrukcija predstavlja izučavanje uticaja i odgovora konstrukcije na kratkotrajno opterećenje, obično zbog horizontalnog potresa velike snage.

Ispitivanja elemenata i konstrukcija. Uticaj promenljivog naprezanja na elemente čeličnih konstrukcija ispituje se na epruvetama-modelima detalja čeličnih konstrukcija, pomoću posebnih mašina, pulzatora, obično sa sinusnom promenom naprezanja između σ_{\max} i σ_{\min} , sa konstantnom amplitudom od početka do kraja ispitivanja (sl. 62a). To odgovara konstrukciji



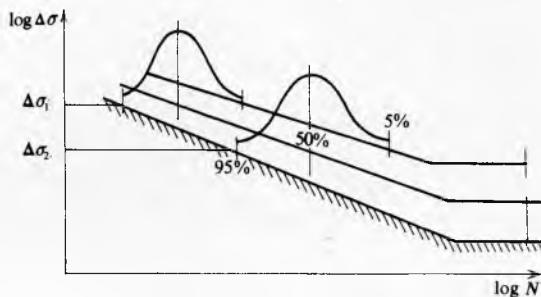
Sl. 62. Dijagrami $\Delta\sigma, N$. a sinusna promena naprezanja s konstantnim amplitudama, b proizvoljne amplitudu naprezanja i obrazac za određivanje ekvivalentne amplitudu

takvih mašina, dok su retke komandovane mašine, koje rade s promenljivim amplitudama prema prirodnom spektru oscilacija. To naročito vredi za mašine velikog kapaciteta. Konstrukcije izložene promenljivim naprezanjima u eksploataciji naprezane su dakle drugačije nego većina ispitivanih uzoraka u laboratorijama. U prirodi su amplitude različite, a vrednosti amplituda su slučajne pojave. Između velikih amplituda dolazi obično niz manjih, a one nemaju jednakе vrednosti za zamor kao pri ispitivanju. Stvarno je stanje, dakle, povoljnije od ispitivanog. To se uzima u obzir tzv. »kolektivima« opterećenja ili ekvivalentnom diferencijom napona $\Delta\sigma$ prema postupku Međunarodne železničke unije (ORE) (sl. 62b). Tako se koriguje vek trajanja konstrukcije napregnute realnim opterećnjima, a ispitivane sa konstantnim amplitudama naprezanja do loma.

Treba uzeti u obzir još jedan parametar: sve zavarene veze imaju zaostale napone, koji su po pravilu na granici napona σ_v . To se uzima u obzir ispitivanjem velikih epruveta takvih dimenzija da sadrže zaostale napone kao i u realnoj konstrukciji, koji se inače relaksiraju smanjenjem epruveta (u tu svrhu je potrebno da poprečni presek epruveta ne bude manji od 220×20 mm).

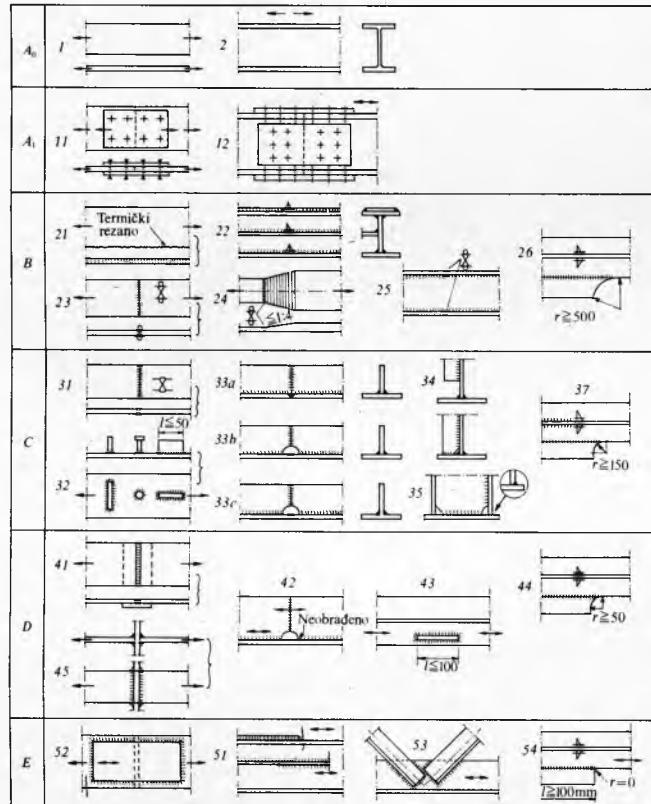
Obrada rezultata. Ispitivanja se organizuju tako da se rezultati mogu statistički obraditi. Ispitivanja se sprovode u dve ili tri razine naprezanja $\Delta\sigma$ u oblasti visokocikličnog zamora (sl. 63) sa dovoljno epruveta, što omogućuje statističku obradu podataka. Za svaku razinu naprezanja određuje se srednja vrednost,

standardna devijacija i granice verovatnoće (obično 90 i 10%, ili 95 i 5%) da se lom neće dogoditi. Nakon toga se povlače regresijske linije koje spajaju odgovarajuće tačke jednakih verovatnoće pojave loma. Na osnovu toga se, osim linije verovatnoće od 50%, dobija i oblast rasipanja rezultata. Za proračun vrednosti sa najvišom verovatnoćom prezivljavanja merodavna je najniža linija. Oblast rasipanja se širi kako se približava zoni jačine zamora. Približavanjem toj zoni (tj. snižavanjem vrednosti $\Delta\sigma$), najpre pojedine epruvete, a zatim sve više njih, ne lomi se pri predviđenom broju promena naprezanja, te je za pojavu loma potrebno više promena naprezanja (sl. 60).



Sl. 63. Prikaz rezultata ispitivanja zamora

Jačine zamora različitih konstrukcijskih detalja kategorisane su u pet kategorija prema opitima u SAD (sl. 64). Novi parametri koji su se nametnuli (poglavitno zaostali naponi) izmenili su uglavnom i današnja gledišta. Opiti su i dalje u toku zbog razjašnjenja otvorenih pitanja. Evolucija nekih saznanja o poнашанju različitih spojeva pri zamoru prikazana je na sl. 64a.



Sl. 64. Primeri nove kategorizacije zavarenih spojeva (prema Fisherovim optima). A₀ neobrađeni valjani proizvodi (limovi, trake, profili), A, veze sa visokovrednim zavrtnjima, B zavareni složeni nosači sa kontinualnim šavovima, obrađeni sučevi šavovi, C sučevi neobrađeni šavovi, ugaoni šavovi poprečnih ukrućenja, kratki priključci ($L \leq 50$ mm), krajevi poduznih šavova (sa $r \geq 150$ mm), spojevi (uslovi), E nastavci sa podvezicom, krajevi lamela nosača, krajevi poduznih ukrućenja, preklopni spojevi, krajevi poduznih sučevih spojeva (bez obrade)

Na njoj je prikazana kategorizacija pojedinih konstrukcijskih detalja prema karakterističnim parametrima: dužini priključka (a), obradi detalja ukrštanja šavova (b), kraju dodatne lamele nosača (c), detalju veze poprečnog ukrućenja nosača i pojase zategnute lamele (d), te različitim spojevima koji se u konstrukcijama često javljaju (e).

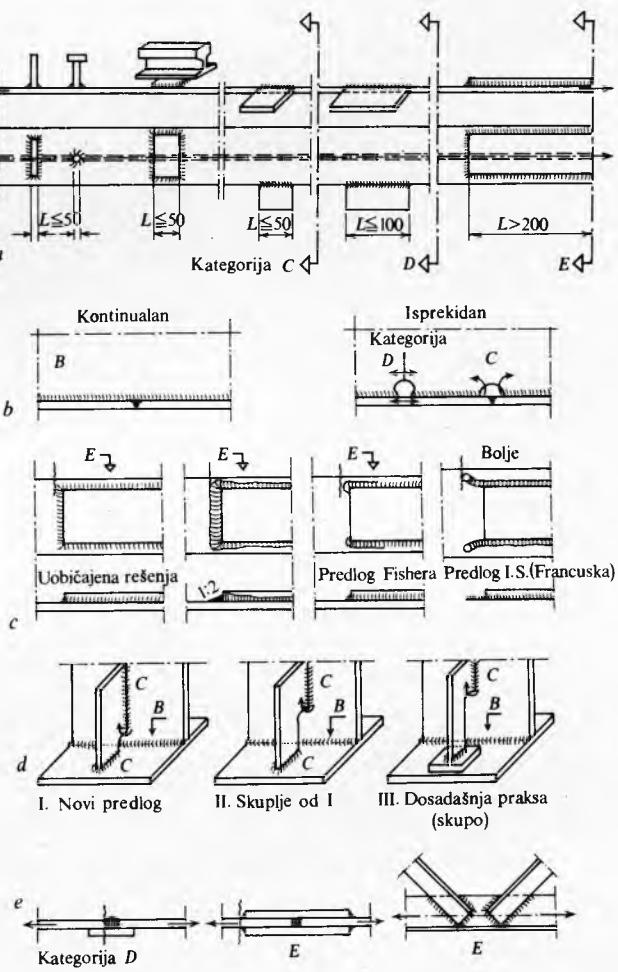
Dosad važeći jugoslovenski Tehnički uslovi delili su te detalje u šest kategorija, ali prema drugim kriterijumima.

Dimenzionisanje čeličnih konstrukcija vrši se na osnovu otpornosti materijala, a prema koncepciji konstrukcije i veštini projektanta. Uvođenjem zavarivanja, kao sredstva spajanja, oblikovanje je znatno olakšano, jer nema posrednika, kao što je bio ugaonik, za vezu delova pod ugлом u tehnički spajanja zakicima i jer je primena cevnih konstrukcija postala redovna pojava. Kombinacije veza su olakšane i postale su bogatije.

Na ponašanje konstrukcija u eksploataciji utiče: a) osnovni materijal sa svojim karakteristikama, b) radna temperatura (za gradjevinske čelične konstrukcije to su najčešće temperature niže od 0°C, a nekada i temperature i do 350°C), c) koncepcija konstrukcije, što uključuje razinu radnih naponi, debljinu elemenata i krutost konstrukcije, d) prisutnost visokih zaostalih naponi zbog primene zavarivanja, e) način naprezanja konstrukcije u eksploataciji i f) posledice hladne obrade za vreme izrade konstrukcije.

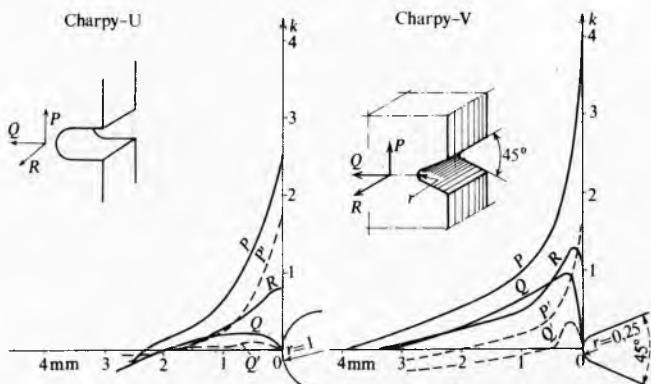
Delovanjem neizbežnih zareza konstrukcija je u eksploataciji puna koncentratora naprezanja koji nastaju na mestima diskontinuiteta, promene preseka, grešaka pri zavarivanju i sl.

Faktor koncentracije napona je pokazatelj odnosa stvarnoga lokalnog napona i srednjega računskog napona u ispitivanom mestu $k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0}$. Šta znači takav koncentrator napona za ge-



Sl. 64a. Nove tendencije spajanja zavarivanjem. Prikazano je pet grupa primera. Promenom nekih parametara spoja menjaju se njegova kategorija (obezbjeđena velikim slovima B do E). Oznake kategorija odgovaraju onima na sl. 64

metriju epruvete Charpy-V, prikazuje sl. 65. Treba napomenuti da u konstrukciji postoji mnogo različitih koncentratora napona, od, npr., pogrešne mehaničke priprema za zavarivanje ili gasno rezanje ivica, pa do koncentratora na vrhu prirodne prsline. Krti lomovi čeličnih konstrukcija koji su se pojavljivali pred drugi svetski rat i tokom njega (1937–1945) bili su upozorenje da naponsko stanje i tehnološka sposobnost materijala nisu u povoljnom odnosu. Krti lom se pojavljuje ako su ispunjena četiri sledeća uslova: materijal nema dovoljnu žilavost (sklonost materijala prema krtom lomu), visoki sopstveni naponi (reda veličine σ_v), koji sprečavaju plastične deformacije, određena temperatura okoline, postojanje greške koja će delovati na koncentraciju napona i prouzrokovati otpončinjanje loma.



Sl. 65. Faktor koncentracije napona k za geometriju epruvete Charpy-V (sl. 5a). P, Q, R veličine glavnih napona u označenim pravcima u osnovi epruvete (ravno stanje deformacije); P, Q' veličine glavnih napona na površini epruvete (ravno stanje napona)

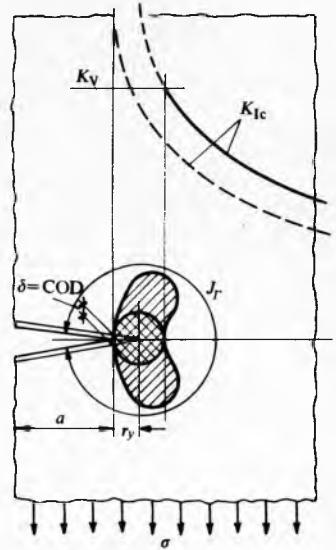
Znanje i sposobnost konstruktora sastoji se i u tome da pri dimenzionisanju i oblikovanju konstrukcije i njenih elemenata izbegne nagomilavanje nepovoljnih, a osigurava što više povoljnih parametara. Tu tendenciju treba provesti i u fazi izrade konstrukcije, ali tada izborom tehnoloških parametara. Ta faza može biti kritična u pogledu sigurnosti konstrukcije.

Žilavost materijala jedan je od amortizera maltretiranja materijala. Pod klasičnim pokazateljima žilavosti podrazumevaju se: izduženje aksijalno napregnutog štapa i udarna žilavost. Udarna žilavost je potreban rad da se određena epruveta (sada međunarodno propisana Charpy-V i u našem JUS C.B0.500) slomi udarom. Tek je krajem pedesetih godina uspelo da se odredi materijalna karakteristika, pokazatelj žilavosti materijala. To je tzv. žilavost loma ili *pokazatelj intenziteta naprezanja*, veličina K_{Ic} (u linearnoj mehanici loma za ultrajake čelike u kojih je odnos $\sigma_v/\sigma_L \approx 0.95$). Veličina $K_{Ic} = \sigma\sqrt{\pi a}$, znači, zavisi od nominalnih napona σ , stanja deformacije i veličine prsline a koja pre loma mora dostići kritičnu veličinu a_{cr} .

Pošto teškoće za određivanje te veličine za konstrukcijske niskougljenične materijale koji imaju prag plastičnosti σ_v . Širenju prsline protivi se plastificirana zona pri vrhu prsline (sl. 66). Da bi se ostvarilo krti ponašanje materijala pri ravnom stanju deformacije, što je uslov za širenje prsline, potrebna je pretjerano velika debljinu epruvete koje postojeće mašine za kidanje ne mogu da savladaju, ili je pak takvo ispitivanje preskupo.

Za primenu tih saznanja na konstrukcijske čelike, pa, dakle, i za korišćenje tim saznanjima, modifikovani su pomoći i indirektni postupci. Takvi su: postupak COD (Crack Opening Displacement), tj. merenje širenja otvora prsline δ (sl. 66) pri zatezanju određene epruvete ili pomoći Riceova J (Jot)-integrala, koji je nezavisran od puta Γ . U prvom slučaju, na osnovu $\delta = f(K_{Ic})$ uspostavlja se numerička veza $\delta = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_v}\right)^2 \epsilon_v$ i odatle se određuje K_{Ic} , odnosno a_{cr} ; u drugom slučaju, $J_T = (1 - v^2) \frac{K_{Ic}}{E}$, pa odatle opet K_{Ic} , odnosno a_{cr} . Osim toga, razrađeni su postupci uvođenjem pomoćnih funkcija Q i elasto-

Sl. 66. Shematski prikaz stanja oko vrha prsline za konstrukcijske čelike (kada nije u važnosti postupak za direktno određivanje K_{Ic} prema linearnoj mehanici loma). Pomoći postupci za određivanje veličine a_{cr} : δ širenje otvora prsline za r_y u oblasti plastifikacije ispred prsline. K_V je vrednost K_I pri $\sigma = \sigma_v$. J_T je vrednost energije deformacije prema Riceovom Jot-integralu po putu Γ (od kojeg je, zapravo, nezavisav)



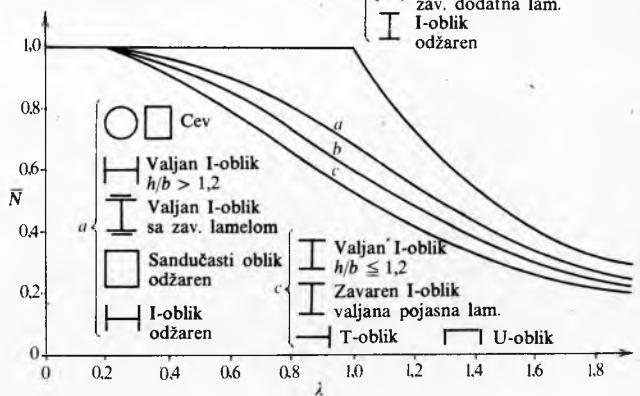
plastični postupci pomoći nomograma za određivanje vrednosti a_{cr} . Grubo procenjeno, dopuštena veličina prsline iznosi $a_{grad. elem.} \leq \frac{a_{cr}}{10}$. Tako se omogućuje da se skrati put do praktične upotrebe naučnih dostignuća dok su ona još u razvoju.

Zbog izbora adekvatnih materijala za velike (debele), krute i znatno napregnute zavarene konstrukcije, kao što su nuklearni reaktori, off-shore platforme i sl., u poslednje vreme smanjene su pojave oštećenja i rušenja takvih konstrukcija.

Stabilitet. Na sigurnost konstrukcija osim jačine delova (problem napona kad su elementi zategnuti) presudan uticaj ima stabilitet (za pritisnute elemente). Zbog početnih nesavršenosti, pritisnuti štap od valjanih i/ili zavarenih preseka ne zadovoljava uslove elastične stabilnosti već neposredno nakon montaže. Danas je zbog toga napuštena pretpostavka o *idealnom štalu* te se problemu prilazi sa drugoga, realnijeg stanovišta. Nakupljena iskustva i izučavanja, naročito u okviru Evropske konvencije čeličnih konstrukcija (CECM), koja su obuhvatila kako eksperimentalna istraživanja, sa statističkom obradom rezultata, tako i teorijske analize, osvetlila su ponašanje realnog pritisnutog štapa. Pri tom se polazi od svojstava materijala, početnih geometrijskih nesavršenosti štapa od valjanih i složenih (zavarenih) preseka, uticaja sopstvenih napona (od valjanja i zavarivanja).

Sl. 67. Krive za proračun pritisnutih štapskih profila sa zaostalim naponima i različitim početnim nesavršenostima — prema koncepciji o limitnim stanjima. Krive su rezultat približno 1000 eksperimentalnih optira statistički obradjenih. Krive su granice rasipanja rezultata (naniže), sa verovatnoćom od 97,5% da neće biti nižih vrednosti. Na slici je pregled profila i stanja zaostalih napona za štapske koji su obuhvaćeni trima krvama a , b i c

Zavaren sandučasti oblik
Valjan I-oblik $h/b > 1,2$
Valjan I-oblik $h/b \leq 1,2$
Zavaren I-oblik plam. rez. pojasnja lam.
Zavaren I-oblik valjana pojasnja lamela
Valjan I-oblik zav. dodatna lam.
I-oblik odžaren



i materijalne nehomogenosti, što sve određuje početne uslove. Tokom opterećenja pritisnutog elementa posmatrane su deformacije, savijanje, izvijanje, delimično plastificiranje, pa sve do stanja nemogućnosti održavanja ravnoteže između unutarnjih i spoljnih sila, kada štap iz stabilnih prelazi u nestabilne uslove, u stanje izvijanja savijanjem. Da bi se računski pratilo ponašanje nelinearne ose štapa, potrebno je u teorijskom razmatranju uzeti u obzir uticaj deformacije, tj. primeniti analizu drugog reda (elastoplastična analiza). Na bazi teorijskih i eksperimentalnih rezultata koji su statistički obrađeni, dobija se polje rasipanja i donja granica koja znači određenu verovatnoću da se izvijanje neće pojavit. Na toj novoj osnovi, ustanovljene su tri krive izvijanja a , b , c (sl. 67) za različite preseke štapova i različitu tehnologiju izrade. Tako su grupisani različiti preseci sa jednakom nosivošću prema geometrijskom obliku i uticaju zaostalih napona. Grafikon daje kritične napone izvijanja za određene vitkosti. Da bi se dobio opšti prikaz, na ordinati i apscisi su bezdimenzijske veličine. Na ordinati je

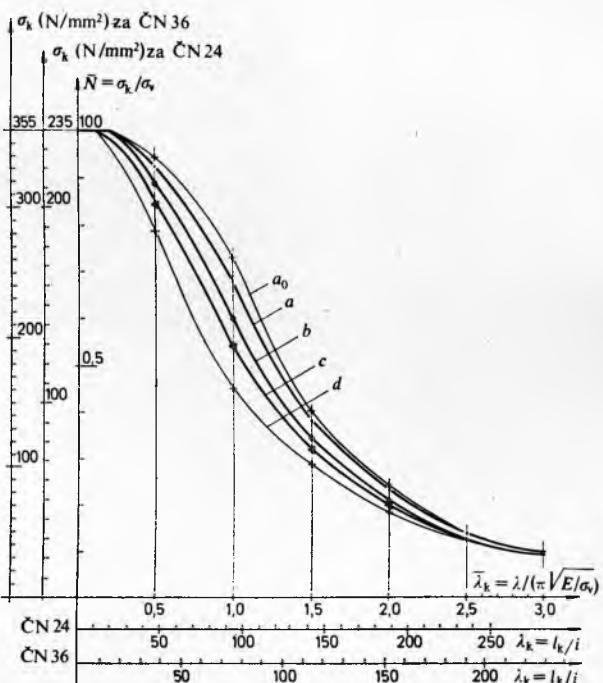
$$\bar{N} = \frac{\bar{N}}{A\sigma_v} = \frac{A\sigma_k}{A\sigma_v} = \frac{\sigma_k}{\sigma_v}, \quad (3)$$

a na apscisi

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_v}}}, \quad (4)$$

gde je $N = A\sigma_k$ sila koja deluje na štap, A površina preseka štapa, σ_k kritično naprezanje izvijanja, λ vitkost štapa za osu s minimalnom inercijom, σ_v granica velikih izduženja materijala, a E modul elastičnosti. Izraz u imenitelju obrasca (4) označava se sa λ_v .

Za konkretno računanje takve su veličine nepogodne. Zbog toga se veličine \bar{N} i $\bar{\lambda}$ zamenjuju veličinama $\sigma_k = \sigma_v \bar{N}$ i $\lambda = \lambda_v \bar{\lambda}$ (sl. 68).

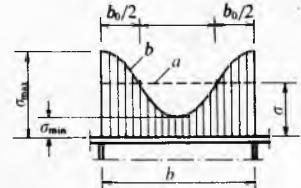


Sl. 68. Krive za proračun pritisnutih štapova prikazanih u sl. 67 pripremljene za praktičan rad. Umesto bezdimenzijskih vrednosti na ordinati i apscisi upisane su vrednosti za σ_k , odnosno λ_k za dve vrste čelika: Fe 360 (ČN 24) i Fe 510 (ČN 36) debljinе $t \leq 20$ mm

Za praktičan rad vrednosti σ_k su tabulisane za λ od 0...250 za tri vrste čelika: ČN 24, ČN 28 i ČN 36, i to za tri područja debljina: $t \leq 20$ mm, $20 < t \leq 30$ mm i $30 < t \leq 40$ mm, zbog različitih vrednosti granica velikih izduženja prema debljini ma-

terijala. Ove su vrednosti tabulisane, tako da se sl. 68 pri projektovanju ne koristi, već ima samo ilustrativan karakter. Granica velikih izduženja, koja dolazi u obzir za dimenzionisanje, definisana je ili kao donja granica iz statističke obrade (tj. kao srednja vrednost ispitivanja, umanjena za dve standardne devijacije), ili kao najniža vrednost iz podataka tehničkih uslova za te materijale (tzv. karakteristična vrednost). U sl. 68 unete su još dve krive: a_0 i d , koje ograničavaju rezultate izvijanja štapova (srednja vrednost umanjena za dva standardna odstupanja); prva kriva vredi za najpovoljnije slučajevе (bez zaostalih napona) i druga kriva za najnepovoljnije slučajevе (debeli elementi, gasno izrezane trake iz limova, nepovoljan raspored zaostalih napona u najudaljenijim vlastinima).

Sandučasti nosači (obično nosači na mostovima). Problem dimenzionisanja takvih čeličnih konstrukcija još nije potpuno rešen. Pločasti delovi sanduka i podužna rebara treba da se do krajnjih mogućnosti suprotstave opterećenjima, što znači da se ne bi smela pojavljivati lokalna izbočavanja delova ploče, povremena otkazivanja nosivosti podužnih rebara i sl., jer se to odražava na efektivnu širinu aktivne ploče izložene pritisku (sl.

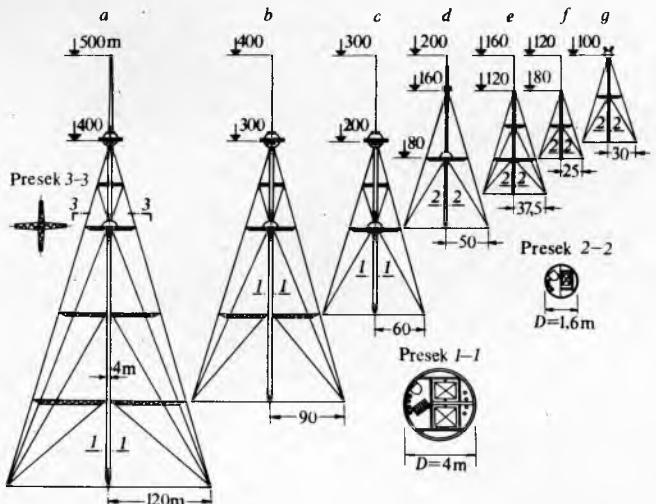


Sl. 69. Smanjenje nosivosti pritisnutog dela sandučastih nosača ukrućenog rebrima zbog smanjenja efektivne širine aktivne ploče

69). Iz toga proizilazi da je linearna teorija izbočavanja rđav model za procenu granične nosivosti ploča i pločastih konstrukcija. I pored poznatih slabosti, linearna se teorija primeњuje u praksi uz izvesne tolerancije. Međutim, u nesigurnosti takvih pretpostavki treba tražiti uzroke rušenja četiri velikih mostova za vreme montaže (sl. 2). Nastojanja da se primena linearne teorije omogući izvesnim paljativnim merama (povećanjem ukrućenja i drugim korekcijskim faktorima) nisu uspela i nema izgleda da uspeju. Drugi put kojim se kreće jeste proračun na osnovu početnih nesavršenosti i velikih deformacija, prema nelinearnoj teoriji elastičnosti. Eksperimentalni rad koji prati ta nastojanja (više od 700 opita do 1978. godine) još je u punom razmahu.

Ponašanje vertikalnih zidova I-nosača ili sanduka ispitivano je prema koncepciji graničnih stanja. Do sada ni ovde još nema prihvatljivih i opšterazumljivih rešenja, a dosadašnji rezultati mogu da posluže samo kao orientacija u praksi projektovanja.

Tipizacija. Sve je veća težnja da se tipiziraju građevine ili pojedini delovi konstrukcija koji se češće ponavljaju. Tako se



tipiziraju propusti (manji mostovi) na železničkim prugama, kolne mostovske konstrukcije preko auto puteva, delovi velikih mostova, krovni vezači i kranske staze industrijskih hala, međuspratne tavanice stambenih i poslovnih zgrada, rezervoari, pa i antenski stubovi (sl. 70) i dr.

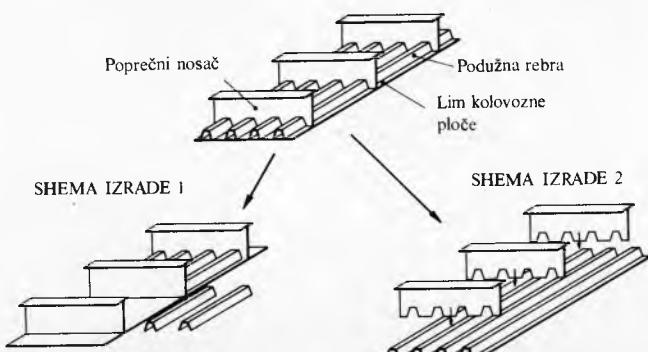
To omogućuje standardni proračun, izradu sa ustaljenom tehnologijom, standardnim strojevima i specijalizovanu kontrolu kvaliteta.

IZRADA I MONTAŽA

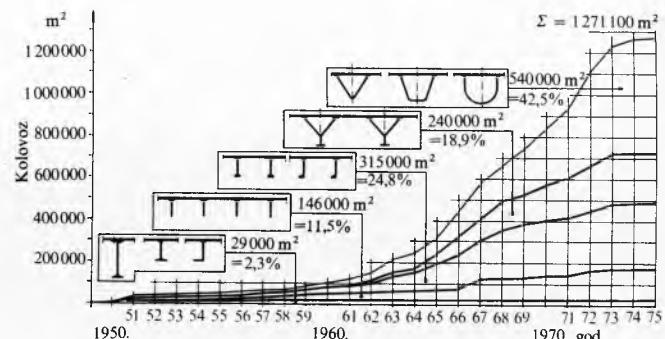
Cilj je dobrog postupka izrade konstrukcije gradnja što sigurnije konstrukcije uz najmanju cenu koštanja. Kako je obično cena izrade merodavna za ostvarenje konstrukcije, to način izrade može imati presudan značaj. Staro pravilo da pri izradi čeličnih konstrukcija treba ostvariti što manju upotrebu materijala danas je zamenjeno zahtevom o minimumu radne snage. Taj se proces može lepo demonstrirati na primeru savremene mostogradnje. Prvi je korak učinjen uvođenjem zavarivanja kao spojnog sredstva (umesto dotadanog zakivanja) i upotrebom zavarljivoga visokovrednog konstrukcijskog čelika. Drugi korak na tom putu bilo je uvođenje luke kolovozne ploče (omogućene primenom zavarivanja) kao sastavnog dela glavnog nosivog sistema u kontinuumu, za razliku od dotada primenjivanih štapskih i elemenata sistema koji pojedinačno deluju. Evolucija oblikovanja ortotropne ploče prikazana je na sl. 71, a njezina izrada na sl. 72. Razvoj primene prikazuje sl. 73. Taj se razvoj ogleda i u prefabrikaciji što većih delova u radionici, gde su uslovi najpovoljniji, i što većem skraćenju rada za sklapanje na radilištu (sl. 74). Ispunjene drugog zahteva omogućeno je

1 Ortotropna ploča sa otvorenim profilom podužnih rebara 4 podužna šava na jedinicu podužnog rebra	0,3 kom. poprečnog nosača na dužni metar ploče 0,6 kom. ukrštanja na jedinicu podužnog rebra i duž. metar ploče
2 Ortotropna ploča sa složenim profilom podužnih rebara 4 podužna šava na jedinicu podužnog rebra	0,25 kom. poprečnog nosača na dužni metar ploče 0,25 kom. ukrštanja na jedinicu podužnog rebra i duž. metar ploče
3 Ortotropna ploča sa šupljim zatvorenim profilima 2 podužna šava na jedinicu podužnog rebra	0,2 kom. poprečnog nosača na dužni metar ploče 0,2 kom. ukrštanja na jedinicu podužnog rebra i duž. metar ploče

Sl. 71. Oblici podužnih rebara lakih kolovoznih tabli (ortotropne ploče)

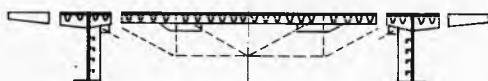


Sl. 72. Dve sheme izrade ortotropne ploče sa šupljim zatvorenim rebrima

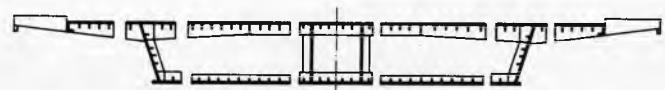


Sl. 73. Razvoj kolnih mostova sa lakin kolovoznim pločama i različitim tipovima podužnih rebara. Rezultat analize 126 kolnih mostova

Gredni nosač, 1962.



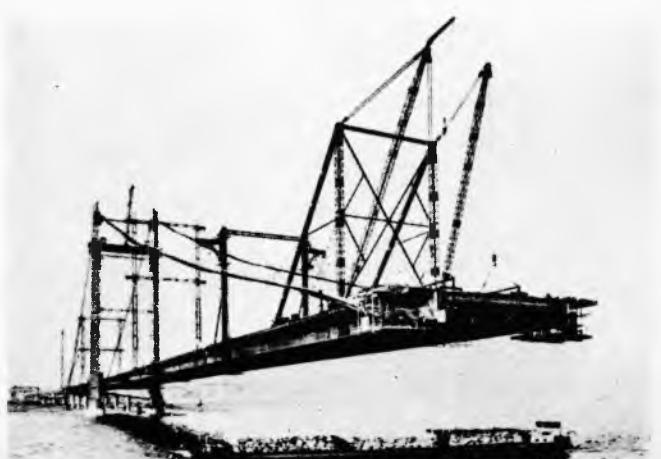
Nosač sa kosim zategama, 1973.



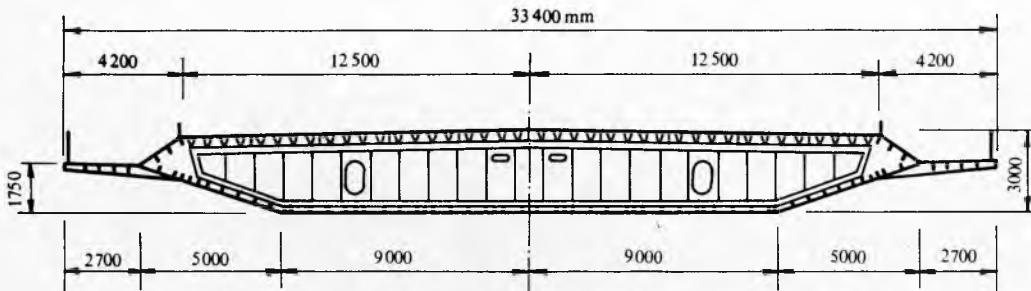
Sl. 74. Razvoj prefabrikovanja elemenata kolnih mostova u toku jedne decenije. Tendencija je ka sve većim jedinicama



Sl. 75. Montaža velikih delova konstrukcije moćnim dizalicama



Sl. 76. Slobodna montaža koja ne traži pobijanje ma kakvih potpornih stubova za oslanjanje konstrukcije za vreme montaže u glavnom otvoru

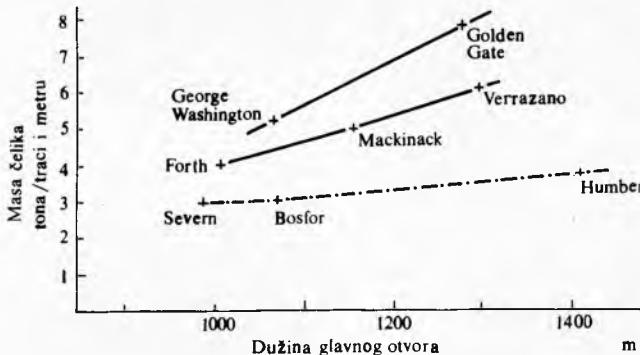


Sl. 77. Nosač za ukrućenje visećeg mosta sastavljen je od 181 jednakog dela (mere u mm). Oblik poprečnog preseka je aerodinamičan

i primenom visokovrednih vijaka za spajanje tokom montaže. Treći korak je ostvaren napretkom opreme sa ogromnom moći nošenja (sl. 75) i uvođenjem konstrukcijskog sistema sa nosačem sa kosim zategama (sl. 76) koji ovim uslovima veoma odgovara. Međutim napredak je opšti i ogleda se i u ostalim sistemima.

Dosta davno napušten je princip da se građevina sastavi na skeli u beznaponskom stanju, pa da se tako spojena i završena prepusti svojem teretu (otpuštanjem skele). Danas se za gradnju velikih mostova kontinualna skela ne može ni finansijski opravdati, pa se zbog toga rešenja traže u montaži slobodnom gradnjom (sl. 76). I najzad, današnju fazu odlikuje i četvrti korak, primena što više istih prefabrikovanih elemenata radi industrijalizacije izrade i montaže. Primer je viseći most preko Bosfora (sl. 77).

Rezultat takva napretka vidi se na sl. 78; na kojoj je prikazana težina čelika po traci i metru otvora. Sl. 79 prikazuje evoluciju poprečnog preseka grede za ukrućenje posle rušenja mosta Takoma (1940).



Sl. 78. Mase čelika nekoliko poznatih visećih mostova. Slika prikazuje mase čelika ugrađenih u tri generacije visećih mostova (tabl. 6). Prva generacija: George Washington i Golden Gate; druga: Forth, Mackinack i Verrazano; treća: Severn, Bosfor i Humber. Očigledno je smanjenje mase novijih mostova (mostova treće generacije), i to bez obzira na povećanje glavnih otvora. Mase su izračunate u tonama po saobraćajnoj traci i metru dužine mosta

Na osnovu proučavanja brojnih savremenih mostova može se odrediti srednja struktura troškova u radionici i na montaži (na gradilištu) za uslove u tehnički razvijenim zemljama:

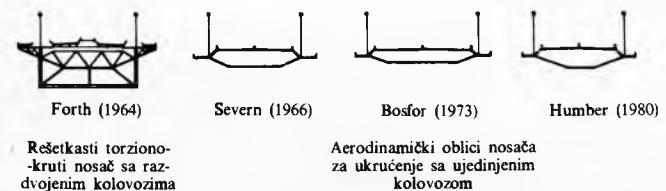
Radionica		Montaža
Obeležavanje	3,3%	
Mašinska obrada	7,7%	Pomoćne konstrukcije 8,0%
Sklapanje	24,8%	Montaža mosta 31,0%
Zavarivanje	14,8%	Uprava, ostalo 6,0%
Predmontaža	4,4%	
Ukupno	55,0%	Ukupno 45,0%

Izrada savremenih čeličnih konstrukcija ne može se zamisliti bez zavarivanja. Zbog toga treba dobro poznavati uticaj toplote zavarivanja na osnovni materijal u metalurškom smislu (zavarljivost materijala), te deformacije i napone usled zavarivanja, o čemu je već bilo reči. Treba još posebno podvući važnost plana

zavarivanja, tj. redosleda zavarivanja dela ili cele konstrukcije sa ciljem da se deformacije usled zavarivanja snize na minimum.

Osim tih tehnoloških pitanja izrade i montaže konstrukcija, od značaja je pitanje nosivosti i stabiliteata pojedinih elemenata konstrukcije za vreme montaže, jer je za vreme montaže moguće da neki elementi konstrukcije budu naprezani u obratnom smislu od onoga u gotovoj konstrukciji. Zbog takvih pojava bilo je već nekoliko rušenja konstrukcija sa ljudskim žrtvama i velikom materijalnom štetom.

To je stanje kod izrade i montaže, na pragu građenja raspona od 1500 m i planiranja izrade mosta sa rasponom od 3000 m (preko Messinskog moreua na Siciliji), koji je još u projektu. U slučaju ovih mostova, pored navedenih problema, mora se posebno rešavati, kao novi problem, pitanje transporta i materijala na gradilištu, jer se na tim dužinama prelaze sve mere dosad prihvatljivih ekonomskih kriterijuma.



Sl. 79. Savremeni aerodinamički profili nosača za ukrućenje visećih mostova

Kontrola kvaliteta. Sve faze kroz koje prolazi konstrukcija od zamisli do ostvarenja, što znači od koncepcije, proračuna nosivosti, izrade u radionici, montaže na gradilištu, pa do ispitivanja završene konstrukcije pre eksploracije, utiču na kvalitet finalnog produkta. Nijedna od tih faza ne može da nadoknadi svojim kvalitetom slab kvalitet neke druge u tom lancu. Prema tome, svaka faza mora biti kvalitetna da konstrukcija ne bi imala nepopravljive slabosti.

Drugi je važan činilac kontrola kvaliteta, koja mora biti shvaćena kao karika proizvodnje, a ne kao kočnica proizvodnje (kako se to nekad shvata). Kontrola kvaliteta služi s jedne strane da se utvrdi ispunjenje ugovornih obaveza izvođača u smislu pažljivosti izrade, npr. zavarenih spojeva, a s druge strane da se otkrivene greške otklone da bi se obezbedila sigurnost konstrukcije.

Sistematika osiguranja kvaliteta dosad nije racionalno rešena ni nacionalnom ni međunarodnom (ISO) tehničkom regulativom. Za to postoje i razlozi, jer još nema tehničkih mogućnosti za naučnu odredbu značaja greške, već ona počiva na empiriji. U tehničkim propisima navodi se šta se sme, šta se ne sme, šta se može i šta se ne može. Zbog takve situacije preduzimaju se preventivne mere da se broj, veličina i značaj grešaka smanji: U takvu stanju najbolji bi bili takvi propisi koji bi imali koherentni sistem kontrole što bi obuhvatilo a) klasifikaciju konstrukcija, odnosno delova konstrukcija, s obzirom na opasnost za ljudske živote i moguće ekonomske štete pri rušenju, b) klasifikaciju šavova koji se na konstrukciji izvode, c) klasifikaciju postupaka zavarivanja, d) klasifikaciju zavarivača i e) klasifikaciju preduzeća koja izrađuju konstrukcije. Osim toga, treba kontrolisati izradu pre, za vreme i posle zavarivanja,

i to vizuelnom kontrolom, metodama bez razaranja, a po potrebi i metodama sa razaranjem. Za sve klasifikacije i kontrole treba da budu utvrđeni zahtevi, uslovi izrade i dokaz postignutog kvaliteta. U takvu unificiranom sistemu, koji zasad ostaje empirijski, bilo bi potrebno definisati traženu sigurnost (koja je za sada još uvek neodređena). Taj se sistem izgrađuje, a biće zamenjen naučnim sistemom kada tehnika ispitivanja bez razaranja bude mogla da odredi veličinu kritične greške, kad mehanika čvrstog tela bude mogla da odredi obim i veličinu zaostalih napona i koeficijente koncentracije napona, i kad mehanika loma konstrukcijskih materijala bude mogla da odredi kritičnu veličinu greške u materijalima.

Današnje mogućnosti za otkrivanje spoljašnjih i unutrašnjih grešaka materijala i zavarenih spojeva sastoje se od sledećih ispitivanja: radiografsko ispitivanje, ultrazvučno ispitivanje, magnetsko ispitivanje i penetrantska metoda ispitivanja (v. *Ispitanje građevnih materijala i konstrukcija*, TE 6, str. 551).

Kontrola kvaliteta u Jugoslaviji provodi se na osnovu JUS propisa (za materijal) i tehničkih propisa za nosive čelične konstrukcije. Većina se tih propisa prerađuje radi inovacije.

OSTVARENE METALNE KONSTRUKCIJE

Pregled ostvarenih metalnih konstrukcija ilustruje domet građevinarstva upotreboom metalnih konstrukcija.

Mostovi su najimpresivniji oblik metalnih konstrukcija. Ta vrsta konstrukcija svojim rasponima i visinom ima značajni uticaj na okolinu. Ima impozantnih mostova koji su konstruktivno i računski ispravni, ali oblikovno ružni. S estetskog stanovišta danas je opšte prihvaćeno da treba da je linija kolovoza naglašena i da nije presečana konstrukcijom. Prema tome stanovištu, lepsi su mostovi sa kolovozom na gornjem pojusu od onih sa konstrukcijom iznad kolovoza. Izuzetak su viseći mostovi, jer lančanica nije jako naglašena, a sama linija lančanice izaziva utisak harmonije u očima posmatrača (sl. 80). Mišljenja se ne slažu u pogledu estetskog izgleda mostova sa kosim zategama (v. slikovni prilog), iako su se razvili iz visećih mostova. S estetskog stanovišta zamera se rešetkastim mostovima zbog šume unakrsno ispresečenih štapova. Smatra se da su puni mostovi lepsi od rešetkastih, a među rešetkastim prednost imaju oni koji imaju štapove između pojsova sastavljeni od sistema rombova i pravougaonika, koji stvaraju utisak površina. Prema današnjem shvatanju rešetkaste konstrukcije sa paralelnim pojsovima lepše su od onih sa krivolinijskim pojsovima.

Najduži raspon koji je do sada premošten iznosio je 1 298 m. To je most na jugu Brooklinskog poluostrva u New Yorku, koji je nazvan prema florentinskom moreplovcu koji je otkrio tu luku, most Verrazano (sl. 80). Taj primat u pogledu raspona prešao je 1980. godine na most Humber River (raspon 1410 m), koji je završen u Velikoj Britaniji.

U slikovnom prilogu vide se tri generacije mostova preko Rajne u Kölnu. Najdalji na slici je železnički most, izgrađen pre prvoga svetskog rata, sa čeličnom konstrukcijom iznad kolovoza. Most je srušen za vreme drugoga svetskog rata, a rekonstruisan prema istoj silueti. Drugi most, u sredini, pripada prvoj generaciji površinskih mostova, sa ortotropnom pločom i konstrukcijom ispod kolovoza. Most najbliži na slici predstavlja sadašnju fazu razvoja gradnje mostova sa kosom užadi i jednim nesimetrično postavljenim stubom.

Most preko Bosfora (v. slikovni prilog) jest most iz poslednje generacije evropskih visećih mostova kojima je dostignut i prevažidjen američki primat u građenju mostova najvećih raspona (Forth, Severn, Bosfor, Hull). Taj most sa srednjim rasponom od 1074 m, sa stubovima visokim 165 m i širinom od ograde do ograde 33,4 m — nije najveći, ali je sa najsvršenijom tehnikom u razvoju (v. i sl. 77). Pregled najvećih mostova prema tipovima dat je u tabl. 6.

Prvi zavareni most u Jugoslaviji, preko rečice Grze kod Paraćina (sl. 81), sagrađen je 1932. godine (raspon 24 m). Izgled odgovara tehniči zakovanih veza.

Na sl. 82 i 83 dva su značajna dostignuća starije mostogradnje (period 1938—1939) u Jugoslaviji. Prvo je kolni most preko Save u Zagrebu sa rasponima $54,6 + 2 \times 55,0 + 54,6$ m. To



Sl. 80. Most Verrazano na jugu Brooklinskog poluostrva



Sl. 81. Prvi zavareni most u Jugoslaviji (1932), puni gredni nosač



Sl. 82. Kolni most preko Save u Zagrebu

je punozidna spregnuta konstrukcija od čelika sa armiranobetonskom pločom. Karakteristika je toga mosta upotreba pojasnih lamela, debljine 95 mm, od teško zavarljivog čelika, o čemu je već bilo reči. Železnički dvokološčeni most, takođe preko Save u Zagrebu, drugo je značajno dostignuće iz tog perioda. Rasponi iznose $57,5 + 135,5 + 58,0$ m i $55,0$ m, a konstruisan je kao kontinualni nosač preko tri polja sa srednjim rasponom u obliku nosača ojačanog lukom. Oba poduhvata bila su u to doba novatorstvo, jer još nije bilo propisa za proračun spregnutih konstrukcija i jer je još bio dalek put do zavarivanja limova debelih 100 mm.

Tablica 6
PREGLED NAJVEĆIH MOSTOVA NA SVETU

Red. broj	Naziv	Lokacija	Glavni rasponi	Godina izgradnje	Red. broj	Naziv	Lokacija	Glavni rasponi	Godina izgradnje
PUNI GREDNI KONTINUALNI NOSAČI									
1	Guanabara	Niteroi, Brazil	310	1973.	1	New River	W. Virginia, SAD	519	
2	Sava I	Beograd	261	1956. ¹	2	George Bayone	New Jersey, SAD	503,6	1931.
3	Zoo	Köln, SR Njemačka	259	1966.	3	Luka Sydney	Sydney, Australija	502,9	1932.
4	Sava II	Beograd	250	1970.	4	Fremont	Portland, SAD	382,6	1971.
5	Luka Auckland	Auckland, Novi Zeeland	244	1969.	5	Port Mann	Vancouver, Kanada	365,8	1964.
6	Charlotte	Luksemburg	234	1966.	6	Ždjakov	Akumulacija Ždjakov, ČSSR	330	1967.
7	San Mateo	San Mateo, Kalifornija	229	1967.	7	Birchenough	Fort Victoria, Rode- zija	329	1935.
8	Dunav	Beč, Austrija	210	1970.					
REŠETKASTI KONTINUALNI NOSAČI									
1	Astoria	Oregon, SAD	375	1966.					
2	Tenmon	Kumamoto, Japan	300	1966.					
3	Dubuque	Iowa, SAD	257	1943.					
4	Braqua Memorial	Massachusetts, SAD	256	1966.					
7	Dunav	Beograd—Pančevo	5 × 161	1961.					
8	Mala Rijeka	Titograd	151	1972.					
REŠETKASTI NOSAČI SISTEMA GREDA SA PREPUSTOM									
1	Quebec	Quebec, Kanada	549	1917.	1	Humber River	Hull, Vel. Britanija	280 + 1410 + 425	1980.
2	Firth of Forth	Quinsberry, Vel. Britanija	521	1889.	2	Verrazano Nar- rows	New York, SAD	370 + 1298 + 370	1964.
3	New Orleans	SAD	480	1958.	3	Golden Gate	San Francisko, SAD	343 + 1280 + 343	1937.
4	Howrah	Kalkuta, Indija	457	1942.	4	Mackinac Straits	SAD	549 + 1158 + 549	1973.
5	Transbay	San Francisko, SAD	427	1936.	5	Bosfor	Istanbul, Turska	231 + 1074 + 225	1973.
6	Baton Rouge	SAD	376	1968.	6	George Wa- shington	New York, SAD	198 + 1067 + 186	1931.
					7	Rio Tajo	Lisabon, Portugal	483 + 1013 + 483	1966.
					8	Forth Road	Queensferry, Vel. Bri- tanija	408 + 1006 + 408	1964.
					9	Severn	Beachley, Vel. Bri- tanija	305 + 988 + 305	1966.
					10	Takoma Nar- rows	Puget Sound, SAD	335 + 853 + 335	1940 ⁴
					11	Tancarville	Tancarville, Fran- cuska	176 + 610 + 176	1959.
					12	Emmerich	Emmerich, SR Nje- mačka	152 + 500 + 152	1965.
					13	Bordeaux	Bordeaux, Francuska	150 + 384 + 150	1967.
					14	Rajna	Köln, SR Njemačka	95 + 378 + 95	1941 ⁵ .
					15	Wakato	Wakamatsu, Japan	156 + 367 + 156	1962.
					16	Tamar	Plymouth, Vel. Bri- tanija	114 + 335 + 114	1961.
					17	Köln-Müllheim	Köln, SR Njemačka	91 + 315 + 91	1929 ⁶ .
GREDNI NOSAČI SA KOSIM ZATEGAMA									
1	Dunav	Novi Sad	351	u gradnji					
2	Rajna	Duisburg, SR Njemačka	350	1970.					
3	West Gate	Melbourne, Australija	336	1971.					
4	Brazzo Largo, Parana ²	Zarate, Argentina	330	1976.					
5	Koleno Rajne	Düsseldorf, SR Njemačka	320	1969.					
6	Erskin Klid	Vel. Britanija	305	1970.					
7	Dunav	Bratislava, ČSSR	303	1972.					
8	Rajna-Severin	Köln, SR Njemačka	302	1959.					
9	Dnjepar	Kijev, SSSR	300	1976.					
10	Rajna	Lewercsen, SR Njemačka	280	1965.					
11	Rajna	Bonn, SR Njemačka	280	1967.					
12	Rajna	Düsseldorf, SR Njemačka	260	1958.					
13	Sava ³	Beograd	254	1980.					

Gradnja železničkih pruga i cesta tražila je i gradnju mostova različitih konstruktivnih rešenja. Sl. 84 prikazuje primenu okvirne konstrukcije za prelaz železničke pruge Sarajevo—Ploče preko Neretve (raspon 100 m), a na sl. 85 vidi se uspelo konstruktivno rešenje lučnog mosta preko moreuza Morinje na Jadranskoj magistrali (raspon 134 m, strelica 18,4 m).

Rekonstruisani drumsko-železnički most preko Dunava, tzv. Pančevački most u Beogradu (sl. 86) kontinualni je rešetkasti most sa rasponom 5 × 162 m. Prilikom rekonstrukcije kolovoz između dva nosača rezervisan je za dvokolosečni železnički saobraćaj, a po dve trake za kolni saobraćaj sa pešačkom stazom prenute su na bočne konzole.



Sl. 84. Železnički most preko Neretve, ramski sistem velikog raspona (100 m)



Sl. 83. Železnički most preko Save u Zagrebu

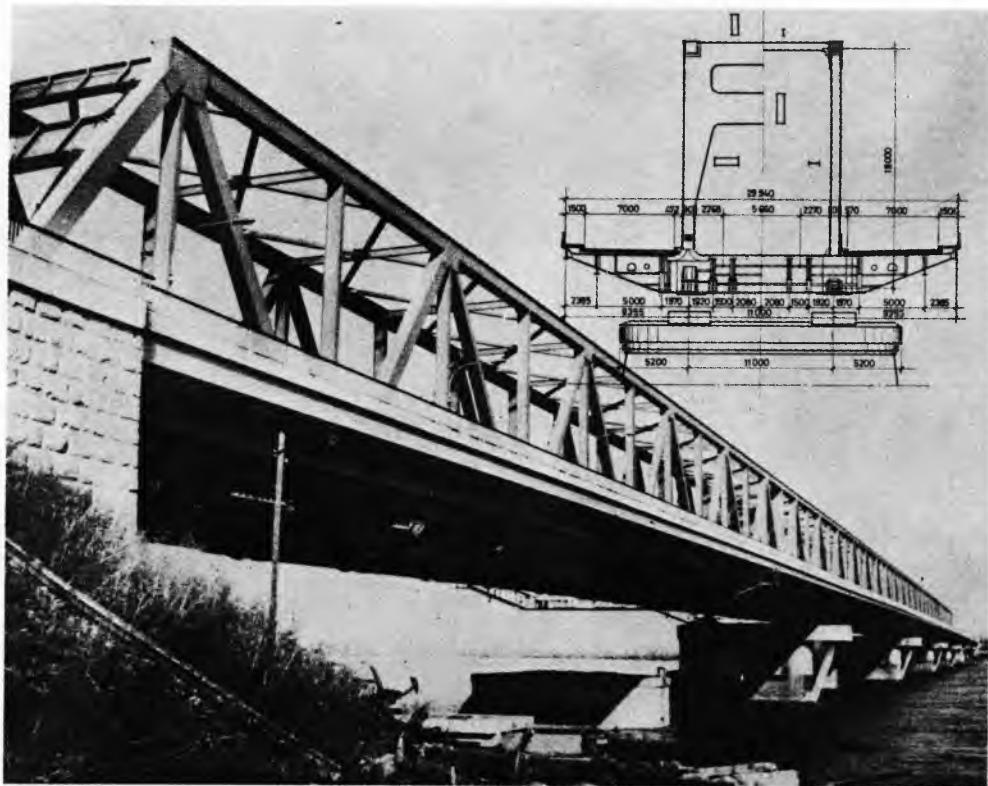


Sl. 85. Cestovni most preko Morinjskog kanala na Jadranskoj magistrali (raspon 134 m)

¹Proširen 1978. od 18,4 na 30,05 m. ⁴Izgrađen 1950. posle sloboma 1940.

²Kolni + jedan kolosek železnički. ⁵Obnovljen 1955. posle rušenja 1945.

³Dvokolosečni železnički. ⁶Obnovljen 1951. posle rušenja 1945.



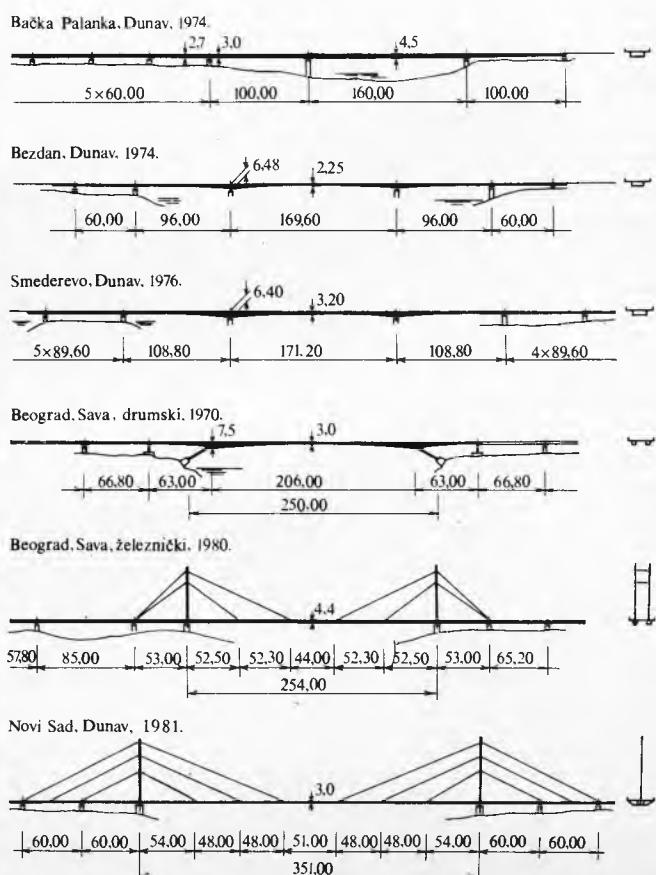
Sl. 86. Rekonstruisani drumsko-železnički most preko Dunava, tзв. Pančevački most u Beogradu

Kolni most preko Save u Beogradu između Brankove ulice i Novog Beograda u svojoj prvoj varijanti (1956) sagrađen je prema principima prve nove generacije savremenih evropskih mostova, i svojim srednjim rasponom predstavlja je u to vreme najveći raspon u svetu u klasi kontinualnih punih mostova. Širina je iznosila $12 + 2 \times 3$ m. Sedamdesetih godina saobraćaj na mostu predstavlja je usko grlo, te je most proširen (1978), tako da ukupna širina mosta sada iznosi 30,05 m (sl. 87).



Sl. 87. Izgled u niveleti prošrenog mosta preko Save u Beogradu (1978). Širina kolovoza posle rekonstrukcije iznosi 30,05 m

U poslednjih desetak godina sagrađeno je ili se gradi više mostova preko Dunava i Save. Neki od njih vide se na sl. 88.



Sl. 88. Novi mostovi preko Save i Dunava u Jugoslaviji



Sl. 89. Svetski trgovinski centar u New Yorku

Poslovne i stambene zgrade. Visoke građevine u gradovima podležu opštim tendencijama moderne arhitekture. Primeri za to su Svetski trgovinski centar (WTC) u New Yorku (sl. 89), Tour Maine-Montparnasse u Parizu i Centar za radio-difuziju u Parizu (v. slikovni prilog). Svetski trgovinski centar sastoji se od dve visoke građevine bliznake od po 110 spratova, visoke 412 m. To je pravi grad u gradu, površine nešto manje od 820000 m², sa 200 dizala. U njemu radi oko 130000 službenika. Tour Maine-Montparnasse najviša je zgrada u Parizu, ima 52 sprata, a visoka je 212 m. Za njezinu gradnju bilo je potrebno



Sl. 90. Zaštitni oblog nuklearne elektrane Bugey u Francuskoj (u gradnji)

120 Mt čelika i 39 000 m² stakla. Temelji dosežu do 70 m ispod razine ulice, a liftovi stignu na vrh vidikovca za 40 sekunda. Spoljnja fasada Centra za radio-difuziju obložena je aluminijumskim limom.

U gradnji građevina u gradovima ima izvesnih tendencija konstruktivizma, kojima se žele naglasiti konstrukcijski elementi građevine koji mogu biti smešteni i u unutrašnjosti zgrade. Primer je takvih tendencija palata kulturnog centra Beaubourg u Parizu (v. slikovni prilog), koja zadivljuje posetioca svojom unutrašnjom funkcionalnošću, ali se pojavljuju podeljena mišljenja u pogledu spoljnog izgleda. To predstavlja primer prelaza ka industrijskim halama kojima je osnovna svrha da obezbede sprovođenje tehnoloških procesa i radnih uslova.

Industrijska postrojenja. Metalne konstrukcije potrebne u industriji predstavljaju često vrhunske domete teške industrije. Takva je konstrukcija, npr., sigurnosni plastični okvir reaktora u nuklearnoj elektrani (sl. 90), hiperboloidni hladnjak za rashladnu vodu u termoelektrani (sl. 91), rezervoar za gradski gas kapaciteta 100000 m³ (sl. 92) i elipsoidni rezervoar za vodu (v. slikovni prilog) zapremine 1150 m³ na visini od 42 m.



Sl. 91. Kostur hiperboloidnog hladnjaka za termoelektranu



Sl. 92. Loptasti rezervoar za gradski gas

Eksplotacija i prerada nafte traži velika i komplikovana postrojenja. Za bušenje ispod površine mora i za eksplotaciju nafte iz takvih nalazišta potrebne su platforme koje se ili oslanjaju na dno ili plivaju ankerovane na različite načine. Visina platforma iznosi i više od 150 m, a na vrhu imaju površinu i do 5000 m². Uslovi eksplotacije vrlo su teški: dubina mora i više od 100 m, brzina veta i do 210 km/h, visina talasa do 20 m. Na sl. 93 je reaktor za petrohemiju (masa 575 t, dužina 40 m, prečnik 5 m, a debљina zida 103 mm), a u slikovnom prilogu je kreking-postrojenje (u gradnji) za petrohemiju.

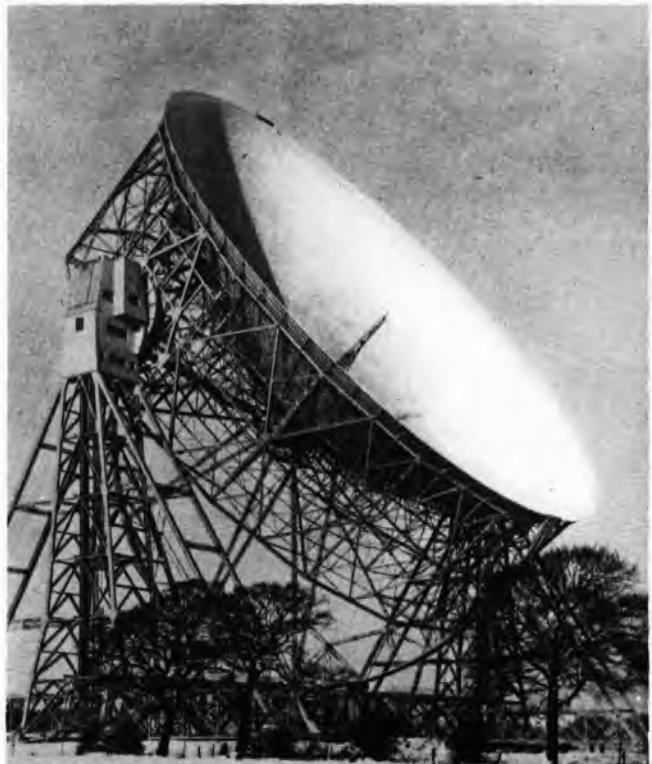


Sl. 93. Reaktor za petrohemiju (transport komada mase 575 t)



Sl. 95. Montaža televizijskog tornja

Komunikacijske građevine. Sl. 94 prikazuje najveći radio-teleskop sveta (Jodrell Bank u Vel. Britaniji). Poznat je po svojim uslugama u praćenju raket i satelita u kosmosu. Paraboloidno ogledalo prečnika 75 m, teško 800 t, nose rešetkasti radijalno postavljeni prstenovi koji ukrućuju ogledalo. Ogledalo se može zakrenuti za 180° oko svoje horizontalne ose na visini od



Sl. 94. Najveći okretni radio-teleskop na svetu (Jodrell Bank u Vel. Britaniji)



Sl. 96. Krov nad klizalištem i tribinama



Sl. 97. Garaža na aerodromu La Guardia u New Yorku

50,5 m. Konstrukcija je teška 1800 t. Na sl. 95 vidi se montaža jednog članka najvišeg radio-antenskog stuba na svetu (sl. 54) pomoću specijalne montažne mašine koja se autonomno penje

Prečnik upisanog kruga u šestorougaonu osnovu zgrade iznosi 39,44 m. Montažni spojevi spojeni su zavrtnjima. Masa je čelične konstrukcije 270 t, a montaža je trajala 10 meseci.



Sl. 98. Avionski hangar na aerodromu u Londonu

po stubu kako napreduje njegova gradnja. U principu, isti je postupak primenjen i pri montaži našeg najvišeg radio-stuba, visine 235 m, u Obrenovcu kraj Beograda 1948. godine.

Sportske građevine. Takve građevine moraju da obezbeđuju velike slobodne površine, pa se grade s velikim rasponima. Na sl. 96 vidi se krov nad klizalištem. Raspon nosive konstrukcije iznosi 71,1 m sa negativnim bočnim poljem od 9,3 m koje ima anker prednapregnut na kraju, što unosi moment rasterećenja u veliki otvor, te olakšava nosač. Rožnjače su od I-profila od aluminijumske legure.

Saobraćajne građevine. Garaže i zgrade na aerodromima imaju danas sve veće i sve komplikovanije konstrukcije. Na sl. 97 vidi se automobilska garaža na aerodromu La Guardia u New Yorku. Rešenje se odlikuje jednostavnosću dela za parkiranje i izvedbom dveju prilaznih rampi. Kapacitet parkirališta iznosi 2792 automobila, a za svakoga je predviđena površina od $5,5 \times 2,6$ m. Sl. 98 prikazuje avionski hangar u Londonu izgrađen od aluminijumske legure (1953). Ima 12 dvozglobnih rešetkastih ramova na razmacima od 9,14 m. Osvetljenje je osigurano izvedbom šed-krova, a toplotna izolacija azbestnim pločama i talasastim aluminijumskim limom. Pokriven je istovrsnim limom sa bitumenskom zaštitom. Opremna zgrada međunarodnog aerodroma u San Franciscu (sl. 99) ima šestorougaoni oblik. Može jednovremeno prihvati pet velikih aviona, a oni se povezuju sa zgradom sa deset teleskopskih tunela.

LIT.: Bauen in Stahl 1, 2. Verlag Schweizerischer Stahlbauverband, Zürich 1956, 1962. — Металлические конструкции, Состояние и перспективы развития. Госстройиздат, Москва 1961. — F. R. Weitz, Neuzeitliche Gesichtspunkte im schweissenden Brückenbau. Stahlbau No 3/1974. — Second international colloquium on stability, Introductory report. CECM, 1976. — J. Fisher, Bridge fatigue guide. AISC, New York 1977. — M. Milosavljević, M. Radojković, B. Kuzmanović, Osnovi čeličnih konstrukcija. Građevinska knjiga, Beograd 1978. — European recommendations for steel construction. CECM, Rotherham 1978. — IABSE symposium Zürich 1979, Bridges. Zürich ETH-Honggerberg. — M. Radojković, Neophodnost promene koncepta proračuna čeličnih konstrukcija. Izgradnja, br. 8/1979, Beograd. — M. Radojković, Zavarivanje u građevinarstvu. Građevinski kalendar I, 1979; II, 1980. Savez GIT Jugoslavije, Beograd. — M. Radojković, Savremene tendencije u oblasti zavarenih spojeva izloženih zamoru. Izgradnja, br. 4/1980, Beograd.

M. Radojković

METALOGRAFIJA

znanstvena disciplina koja se bavi gradom slitinskih sustava i istraživanjem svojstava metalnih materijala s obzirom na njihovu mikrostrukturu u određenom temperaturnom području.

Znanstvena je metalografija nastala u drugoj polovici XIX stoljeća kad su H. C. Sorby (Engleska, 1864) i A. Martens (Njemačka, 1878) pripremili metalografske izbruske (preparate) željeza i čelika, kakvi se i danas upotrebljavaju, i fotografirali njihove mikrostrukture pomoću mikroskopa. Prvi upotrebljivi dijagram sustava Fe-Fe₃C izradio je 1900. godine W. C. Roberts-Austen (Engleska).

Metalografija se danas smatra sastavnim dijelom šireg područja fizikalne metalurgije, i to interdisciplinarnim područjem koje obrađuje vezu ravnotežnog dijagrama stanja sa strukturon i mehaničkim, odnosno fizikalnim svojstvima metala i slitina.

Metalna veza. Metal se obično definira kao materijal koji ima sljedeća svojstva: sposobnost reflektiranja svjetla, dobru električnu i toplinsku vodljivost, sposobnost plastičnog oblikovanja, a katkad može biti i feromagnetičan. Metalna svojstva potječu od metalne veze s pozitivnim metalnim ionima između kojih se slobodno gibaju valentni elektroni i tvore tzv. *elektronski plin*. Ako se električni napon dovede krajevima metalne žice, slobodni valentni elektroni počnu se gibati u određenom smjeru brzinom od $\sim 10^{-4}$ m/s, i time nastaje tok električne struje. Električna je vodljivost metala dana dvjema veličinama: gustoćom slobodnih elektrona i njihovom gibljivošću. Gustoća i gibljivost slobodnih elektrona u metalu veća je nego u nemetalnim materijalima, kao što su npr. kuhinjska sol, dijamant itd., pa je to razlog da nemetalni materijali imaju znatno manju električnu vodljivost.



Sl. 99. Opremna zgrada na međunarodnom aerodromu u San Franciscu