

Finija se regulacija položaja broda može dobiti ako se regulatoru, uz informacije o kutu i brzini nagiba broda, dovodi i informacija o kutnom ubrzanju nagibanja broda (v. *Regulacija, automatska*).

PRORAČUN ČVRSTOĆE BRODSKE KONSTRUKCIJE

Da bi brod mogao odgovoriti namjeni radi koje se gradi, njegova konstrukcija mora imati odgovarajuću čvrstoću, tj. ona se pod djelovanjem vanjskih sila ne smije pretjerano deformirati a njena krutost mora biti tolika da vibracije ostaju u dopuštenim granicama. Nadalje, brodska konstrukcija treba da je što lakša, a raspored njenih konstruktivnih elemenata takav da stvara što više slobodnog prostora. To se postiže njenim ispravnim dimenzioniranjem. Na osnovu zakonâ nauke o čvrstoći određuju se iz vanjskog opterećenja naponi u materijalu i odabiru dimenzije konstruktivnih elemenata tako da ti naponi ne prelaze dopuštene vrijednosti.

Određivanje dimenzija brodskih konstruktivnih elemenata na osnovu proračuna čvrstoće počelo se polako uvoditi tek u drugoj polovici XIX st., kad se je prešlo od drvene na željeznu brodsku konstrukciju. Drveni i prvi željezni brodovi gradili su se isključivo na osnovu iskustva. Kako su rasle dimenzije brodova tako je i pitanje njihove čvrstoće postajalo sve kritičnije, pa se nije moglo riješiti na zadovoljavajući način samo oponašanjem prijašnjih uspješnih izvedbi. M. I. Brunel je prema svojim iskustvima iz mostogradnje sagradio u godinama 1851 do 1858 prvi gigantski željezni brod «Great Eastern» dužine 210 m, deplasmana 27 000 t. Iako taj brod s ekonomskog stanovišta nije uspio, njegova konstrukcija dokaz je genijalnosti Brunela, koji je u doba kada još nije postojalo nikakvo iskustvo u gradnji željeznih brodova uspio ostvariti konstrukciju i s današnjeg stanovišta ispravno oblikovanu za preuzimanje savijanja, amicanja i izvijanja, tako da je besprijekorno izdržala sve mnogobrojne udese koji su brod zadesili za vrijeme njegove eksploatacije.

Uspjele Brunelove konstrukcije ipak predstavljaju izuzetak za ono doba. Prvi željezni brodovi gradili su se jednostavnim kopiranjem njihovih drvenih prethodnika, što je imalo za posljedicu glomazne i teške konstrukcije i česte havarije. Kada se 1870 parobrod «Maru» prelomio nadvoje na valu osrednje visine, postala je potreba proračunavanja uzdužne čvrstoće oči. Osnove za taj proračun dali su već davno matematičari L. Euler i D. Bernoulli (između 1705 i 1744) i engleski fizičar T. Young (1811), koji je razlike između težine i uzgona broda u pojedinim njegovim presjecima predočio kao krivulju opterećenja. U brodogradnju uvode taj proračun konstruktori engleske mornarice E. I. Reed (1870) za ratne i W. John (1874) za trgovačke brodove. Na prijedlog J. Bilesa brod se na brijegu odnosno dolu trohoidnog vala, dužine jednake dužini broda i visine jednake 1/20 dužine, smatra gredom statički opterećenom razlikom težine i uzgona po njenoj dužini, i na to je pretpostavci osnovan tzv. standardni proračun uzdužne čvrstoće broda, koji je uspio, uza sve svoje nedostatke, održati se do danas. A. N. Krylov je (1898) prvi dao način proračuna čvrstoće koji uzima u obzir i gibanje broda na valovima. Još 1883 je W. E. Smith pokazao da se u proračunu pritiska u valu mora uzeti u obzir dinamička raspodjela pritiska uslijed orbitalnog gibanja vodenih čestica, prema trohoidnoj teoriji valova. Od onda pa do danas izvršeno je uz daljnju teorijsku razradu dinamičkog proračuna momenta savijanja (A. Robb 1917, W. Jacobs 1959 i dr.) i mnogo eksperimenata, kako na stvarnim brodovima («San Francisco», 1935—38, «Ocean Vulcan», 1945—47 i dr.), tako i na njihovim modelima (E. Lewis 1954, Ackita i Ochi 1955, De Does 1960, i dr.) radi određivanja opterećenja kojima je izvrgnut brod na uzburkanom moru, što je dalo poticaja za nove metode proračuna. Ta ispitivanja su još i danas u punom toku.

Katastrofa razarača «Cobra», koji se 1901 prelomio na valu, upozorila je brodograditelje na činjenicu da se brodski trup, kao sandučast nosač tankih zidova, ponaša pri savijanju drukčije nego greda punog presjeka. Ispitivanjima što ih je izvršio na razaraču «Wolf» (1905) J. Biles je pokazao da su ugibi broda znatno veći nego što ih daje proračun, a F. Pietzker je na osnovu eksperimenata dokazao da to nije posljedica klizanja zakivanih spojeva (kako je mislio Biles) i prvi je (1911) ukazao na to da nedovoljno ukrućeni limovi nisu efikasni za preuzimanje tlačnih naprezanja jer se izvijaju.

Pokušaji klasifikacionih društava da na osnovu empirije riješe problem ispravnog dimenzioniranja broda nisu uspjeli, i brodograditelji su morali posagnuti za radovima teoretičara da bi odredili stvarni raspored napona i na osnovu toga ispravno dimenzionirali elemente brodske konstrukcije. Studije o izvianju greda dali su L. Euler (1757) i F. Engesser (1899), a o izvianju ploča Saint Venant (1883) i G. H. Bryan (1891). Te radove primijenili su na brodske konstrukcije I. G. Bubnov u Rusiji (1909), G. Schnadel u Njemačkoj (1926 i kasnije) i H. A. Schade u Americi (1951). God. 1930—31 izvršeni su pokusi s opterećenjem do loma na dva razarača američke mornarice, «Preston» i «Bruce». Oba razarača slomila su se uslijed izvianja limova pod tlačnim naprezanjem i rezultati mjerenja dobro su se slagali s teorijskim proračunima. Ta ispitivanja, kao i ona koja su kasnije izvršena na tankerima «Newerita» i «Newcombia» (1946), pokazala su ispravnost pretpostavke o linearnoj raspodjeli napona ako su uzdužne veze efektivno ukrućene protiv izvijanja.

Premda je bila rano uočena pojava koncentracije napona na mjestima nagle promjene presjeka u brodskim konstrukcijama (eksperimentalna istraživanja izvršili su E. G. Coker pomoću fotoelastične metode, 1911 i poslije, A. Klehn mjerenjem deformacija na modelima, 1933, a teorijska istraživanja proveo je E. Inglis, 1913), brodograditelji su to uvidjeli tek kada je došlo do katastrofalnih loma zavarenih brodova za vrijeme i neposredno nakon Drugoga svjetskog rata. Pokazalo se da je jednostavno kopiranje konstrukcije zakivanih brodova ne odgovara za zavarene konstrukcije. Utjecaj konstrukcije grola na koncentracije napona ispitivali su de Garmo (1948) i A. Audigé (1953), a utjecaj krajeva nadgrada J. A. Šimanski (1949) i van der Neut (1951). Postojao je i problem kako osloboditi palubu nadgrada od znatnih napona koji se u nju prenose savijanjem broskog trupa, da bi se ta paluba mogla izvesti od laganih limova. Pokusi koje je izvršio J. Vasta na brodu «President Wilson» (1949) pokazali su da se elementarna teorija savijanja grede ne može primijeniti na kombinaciju broda i nadgrada. Raspodjelu napona u nadgradima nastojali su teorijski razjasniti L. Crawford (1950) i H. Bleich (1953). Problem napona u nadgradima od aluminijske legure obradili su W. Muckle (1952) i H. E. Jaeger (1955).

Osim problema uzdužne čvrstoće, u gradnji čeličnih brodova pojavio se ubrzo i problem dimenzioniranja rebara i sponja, dakle elemenata poprečne čvrstoće. Posluživši se teoreomom A. Castigliana (1865), Norvežanin J. Bruhn razvio je 1901 metodu proračuna za okvire sastavljene od rebrenice, rebara i sponja. Na osnovu tog proračuna Frodsham Holt (1915) i Westcott Abell (1916)

dali su približne formule za dimenzioniranje poprečnih rebara, kojima su se služila skoro sva klasifikaciona društva. Primjena Castiglianova teorema za proračun kompliciranijih okvirnih sistema dovodila je do dugotrajnih i nezgodnih računa. Danas se upotrebljava u tu svrhu metoda kutova zaokreta (A. Bendixsen 1914, A. Ostenfeld 1926, L. Mann 1927), metoda H. Crossa (1932) i druge metode građevne statike.

Poseban problem predstavljala je konstrukcija broskog dna, sastavljena od sklopa ploča i ukrštenih nosača, napregnuta savijanjem od pritiska vode. Metode za njen proračun dali su W. Schilling (1925), G. Schnadel (1935) i H. A. Schade (1937). Za proračun uzdužnih veza Lorenz (1924) je primijenio poznate Clapeyronove jednadžbe (1848), a u novije doba G. Vedeler (1954) je dao metode proračuna elemenata za uzdužni sistem gradnje.

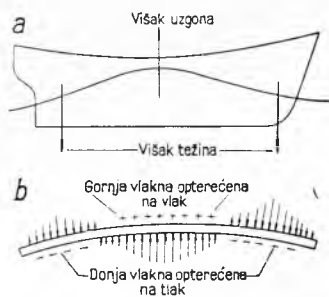
Značajni doprinos proračunu čvrstoće brodske konstrukcije dali su ruski učenjaci. A. N. Krylov razvio je dinamički proračun uzdužne čvrstoće, uzvši u obzir gibanje broda na valovima (1898). On je razvio metode proračuna grede na elastičnoj podlozi, napisao je, između ostalog, i knjigu o vibracijama broda, analizirao je elastične linije pri izvianju stupova uzvši u obzir velike ugibe itd. Njegovi učenici i suradnici nastavili su rad na tom području, tako da je čvrstoća broda postala posebna nauka. I. G. Bubnov postavio je i djelomično riješio sve osnovne probleme čvrstoće broda. On je prvi primijenio teoriju savijanja ploča na proračun brodske konstrukcije, riješio je na osnovu teorije grede na elastičnoj podlozi problem savijanja rešetkastih konstrukcija sastavljenih od ukrštenih greda, ispitivao je čvrstoću pri dokovanju itd. Bubnov je prvi predložio (1908) norme za čvrstoću brodova, koje su zadržale svoje značenje i danas. P. F. Papkovič, nakon što je dao niz sjajnih radova iz oblasti teorije elastičnosti, elastične stabilnosti i teorije vibracija, napisao je knjigu o čvrstoći broda (1941—47), koja po bogatstvu sadržaja i originalnosti metoda nije do danas premašena. S. Timošenko dao je, uz ostale radove, i rješenje problema izvianja ploča u brodskim konstrukcijama (1907), a J. Hlitičev je ispitivao savijanje i stabilnost ploča ukrućenih uzdužnim ili poprečnim rebriima.

Upotreba električkog zavarivanja, gradnja supertankera i uvođenje atomskog pogona postavili su brodograevnog konstruktora pred mnogobrojne nove probleme, koji se rješavaju metodama teorije elastičnosti i pomoću eksperimenata na brodovima, njihovim modelima i pojedinim dijelovima brodske konstrukcije, tako da se brodska konstrukcija i metode njenog proračuna danas brzo razvijaju.

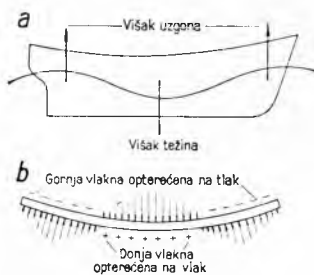
Glavni element brodske konstrukcije je tanka ploča, opterećena silama u svojoj vlastitoj ravnini i okomito na nju i učvršćena protiv izvianja i savijanja sistemom ukrepa (ukrućenja) koje se obično ukrašaju pod pravim kutom. Proračun čvrstoće i stabilnosti takvih konstrukcija zahtijeva upotrebu kompliciranih matematičkih metoda, za što brodograevnim inženjerima često nedostaje i znanja i vremena. Osim toga tačnost dobivenih rezultata, uslijed mnogobrojnih nužnih aproksimacija, često ne opravdava vrijeme utrošeno na takve proračune. Zato se je proračun čvrstoće ispočetka u brodogradnji zanemarivao. Klasifikaciona društva počela su propisivati dimenzije pojedinih konstruktivnih elemenata broskog trupa, oslobađajući na taj način brodograevnog inženjera bilo kakvog proračunavanja čvrstoće, i to je uvelike utjecalo kako na njegovu izobrazbu tako i na daljnji razvoj brodske konstrukcije. Propisi klasifikacionih društava su ispočetka počivali gotovo isključivo na iskustvu, pa iako su time s jedne strane predstavljali kočnicu napretku, s druge su strane odigrali pozitivnu ulogu, sakupljajući, analizirajući i iskorišćavajući iskustvo s izgrađenim brodskim konstrukcijama. Kako su ti propisi obavezni samo za trgovačke brodove, proračun čvrstoće našao je široku primjenu u gradnji ratnih brodova. Ratne mornarice pojedinih zemalja propisuju samo kakvoću materijala, veličinu i vrstu opterećenja i dopuštene napone, a ostavljaju konstruktoru slobodne ruke što se tiče načina dimenzioniranja. Za njih su na raspolaganju znatno veća financijska sredstva, postoji veća mogućnost eksperimentiranja jer se prihvaća veći rizik, pa su zato ratne mornarice uvijek vodile napredak u brodogradnji, i to ne samo u gradnji trupa nego i na drugim područjima. Tako je npr. trgovačka brodogradnja preuzela od ratne sistem uzdužnih rebara i električko zavarivanje, plinske turbine, atomski pogon, radar itd. Za upotrebu novih materijala u brodogradnji (čelika veće čvrstoće, aluminijskih legura, plastičnih masa) i novih tehnoloških metoda (električkog zavarivanja, laminiranja) i za gradnju novih tipova brodova (supertankera, kombiniranih brodova za prevoz nafte i rude) nije postojalo iskustvo na osnovu kojeg bi se mogli graditi brodovi, pa se nedostatak iskustva nastoji danas nadoknaditi eksperimentalnim istraživanjima. Ona su veoma skupa, i da bi od njih bilo koristi, treba ih ispravno voditi. To je moguće samo na osnovu dobrog poznavanja teorije. Eksperimenti služe uglavnom za to da se ispitaju pretpostavke teorije i da se kontroliraju njeni rezultati.

Opterećenje brodske konstrukcije. Zbog velikog omjera dužine naprama širini, brodski trup se može smatrati kao sandučast nosač, napregnut savijanjem u uzdužnom smjeru. Ukupan je uzgon jednak težini broda, ali se raspodjela uzgona po dužini razlikuje od raspodjele težina. Zbog toga u pojedinim presjecima po dužini broda nastaju viškovi težine ili uzgona koji naprežu brod savijanjem kao gredu koja je po dužini opterećena nejednoliko raspoređenim teretima (sl. 1 i 2). Ta nejednolika raspodjela

težine i uzgona po dužini broda dolazi do izražaja naročito kad brod plovi na valovima. Razlikuje se opterećenje na valnom brijegu, kad je paluba izvrgnuta vlačnim a dno tlačnim naprezanjima (sl. 1), i opterećenje na valnom dolu, kada su naprezanja obratna



Sl. 1. Opterećenje broda u uzdužnom smjeru na valnom brijegu

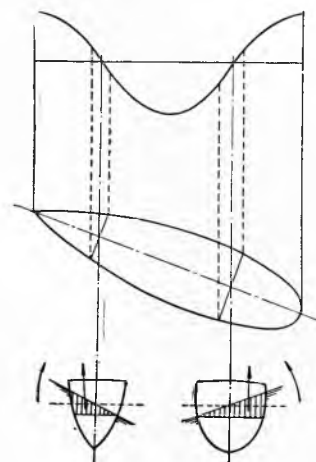


Sl. 2. Opterećenje broda u uzdužnom smjeru na valnom dolu

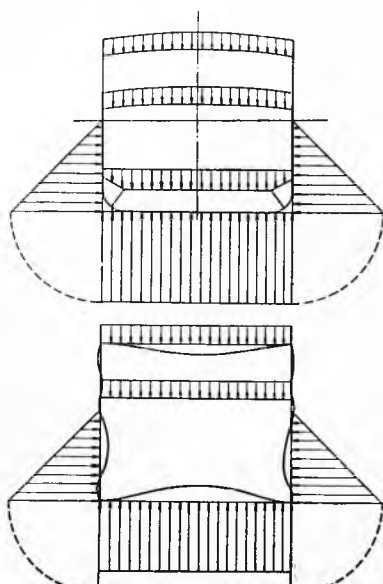
(sl. 2). Osim momenata savijanja u vertikalnoj ravnini, na brod djeluju i momenti savijanja u horizontalnoj ravnini, uslijed razlike pritiska vode na oba boka broda, i torzijski momenti kad on plovi koso na valove, jer tada sile uzgona pojedinih dijelova brodskog trupa ne leže više u uzdužnoj simetralnoj ravnini (sl. 3). Momenti torzije nastaju i kad se brod nakreće na jedan bok zbog nejednolike raspodjele momenata statičkog stabiliteta po dužini broda. Osim u uzdužnom smjeru, brod je opterećen i u poprečnom smjeru: pritiskom vode, teretom koji nosi, težinom strojeva i uređaja i vlastitom težinom konstruktivnih elemenata (sl. 4).

Konstruktivni elementi broda, osim toga što treba da osiguraju čvrstoću cjelokupnog nosača, moraju preuzeti i lokalna opterećenja. Pri tom se razlikuju tri grupe elemenata. Prva grupa se sastoji od oplata, koja neposredno preuzima vanjsko opterećenje pritiskom vode i pritiscima raspodijeljenih tereta i prenosi ga u vidu oslonačkih reakcija na drugu grupu, kostur broda, tj. na sisteme ukrštenih nosača koje čine rebrenice i hrptenica s uzdužnim nosačima dna, rebra i proveze, te sponje i podveze. Ti nosači naliježu na fiksne oslonce koje čini treća grupa: bokovi, pregrade i palube broda.

Opterećenje pojedinih grupa nosača drugih inženjerskih konstrukcija, npr. mosnih, jasno je određeno — za brodske konstrukcije to nije slučaj. Vanjska oplata i oplata dna, paluba i pregrada opterećene su okomito na svoju ravninu neposredno pritiskom vode i teretom, pa čine sistem nosača prve grupe. Ali oni sastavljaju bokove, dno i pregrade broda, pa su ujedno i nosači treće grupe, opterećeni akcijama ukrštenog sistema nosača druge grupe u vlastitoj ravnini. Limovi dna, paluba i bokova broda osim što su ele-



Sl. 3. Opterećenje torzijskim momentima



Sl. 4. Opterećenje okvirne konstrukcije broda u poprečnom smjeru

ment važan za uzdužnu čvrstoću broda, važni su i za poprečnu čvrstoću. Oni su čvrsto povezani s brodskim okvirima pa slijede njihove deformacije (sl. 4), što dovodi do daljnjeg opterećenja tih elemenata brodske konstrukcije u vlastitoj ravnini u dva međusobno okomita smjera.

Pri proračunu čvrstoće rastavlja se složeno opterećenje konstruktivnih elemenata na pojedina jednostavna opterećenja na osnovu principa superpozicije, prema kome je istovremeno djelovanje nekoliko sila na konstrukciju ekvivalentno sumi pojedinačnih djelovanja svake od tih sila. Budući da se brod giba na valovima, na njega djeluju, osim statičkih, i dinamička opterećenja uslijed sila inercije i udara valova. Konačno, brod je izvrgnut znatnim opterećenjima i u nekim izvanrednim prilikama: prilikom porinuća za vrijeme okretanja oko čela saonica i na prelazu preko kraja navoza; prilikom dokovanja, kad se cijela njegova težina koncentrira na potkladama doka; kad se brod nasuče pa reakcije podloge poprimaju najveće vrijednosti; kad u nj prodre voda pa on gubi jedan dio svoje istisnine. Opterećenja koja nastaju prilikom sudara ili u ratu uslijed djelovanja neprijateljskog oružja ne mogu se preuzeti odgovarajućom čvrstoćom konstrukcije, pa se njihov razorni učinak ograničava postavljanjem nepropusnih pregrada.

Kako je sva navedena opterećenja nemoguće tačno odrediti i uzeti u proračunu u obzir, računa se s pojednostavnjenim shemama opterećenja. Zbog toga treba rezultate proračuna stalno kontrolirati mjerenjem deformacija i određivanjem napona u dijelovima brodske konstrukcije, a i na samim brodovima pod uslovima njihove eksploatacije.

Dopušteni naponi. Budući da je nemoguće u proračunu uzeti u obzir cijeli niz utjecaja, kao npr. veličinu opterećenja, tačnost metoda proračuna, način izvedbe u radionici, svojstva materijala, koroziju, trajanje i intenzivnost eksploatacije broda itd., treba računati s koeficijentom sigurnosti. Naponi od opterećenja dobivenog množenjem računskog opterećenja s tim koeficijentom ne smiju biti veći od opasnih. U slučaju linearne zavisnosti između napona i opterećenja uobičajeno je ne množiti opterećenje s koeficijentom sigurnosti nego s njim dijeliti opasni napon. Tako se dobiva dopušteni napon, koji mora biti jednak računski dobivenom naponu ili veći od njega. Kao opasni napon smatra se za čelične brodove granica popuštanja (za $C_e 42$, $\sigma_t \approx 2300$ kp/cm²), za brodove od armiranog betona naponi uz koje dolazi do pukotina na vlačnoj strani, a za drvene brodove naponi uz koje dolazi do popuštanja najjače napregnutih veza.

Budući da su konstruktivni elementi brodskog trupa podvrgnuti opterećenjima koja djeluju u raznim smjerovima, to se oni redovito nalaze u dvoosnom stanju napona, pa treba izračunati poredbeni ili reducirani napon, koji se zatim uspoređuje s dopuštenim. Reducirani naponi se računaju na osnovu teorijā čvrstoće. Pri proračunavanju čvrstoće čeličnih brodova za složena naprezanja upotrebljava se formula za reducirani napon dobivena na osnovu teorije deformacijske energije:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} \leq \sigma_{dop}$$

u kojoj je σ_x napon u uzdužnom smjeru, σ_y napon u poprečnom smjeru, τ tangencijalni napon, σ_{dop} dopušteni napon. Za materijale koji imaju izrazito plastično područje (čelik) daje dobre rezultate i formula dobivena na osnovu teorije maksimalnih tangencijalnih napona:

$$\sigma_r = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2} \leq \sigma_{dop}$$

Veličina koeficijenta sigurnosti ovisi o karakteru opterećenja i o načinu njegova djelovanja. Prema karakteru, opterećenja se dijele na ona koja djeluju stalno, ona koja djeluju iznimno ili rijetko, i ona koja nastupaju samo u slučaju oštećenja. U prvu grupu spadaju npr. opterećenja za vrijeme plovidbe (uzdužna čvrstoća na mirnoj vodi i valovima, poprečna čvrstoća od pritiska vode i tereta unutar broda itd.), u drugu, opterećenja za vrijeme dokovanja ili porinuća, a u treću, opterećenja nepropusnih pregrada.

Prema načinu djelovanja, opterećenje može biti nepromjenljivo ili statičko i promjenljivo ili dinamičko. Statičko opterećenje je opterećenje koje se ne mijenja s vremenom (npr. naprezanje u mirnoj vodi) ili se mijenja tako sporo da su izračunati naponi i deformacije jednaki kao i kad bi sila dotične djelovala statički (npr. opterećenja na valovima). Dinamičko opterećenje mijenja se brzo, rezultirajući naponi i deformacije nisu više jednaki statičkima, nego mogu biti znatno veći (npr. neuravnotežene sile inercije strojeva, koje prouzrokuju vibracije broskog trupa). Za nepromjenljivo opterećenje uobičajeni su ovi koeficijenti sigurnosti: uz stalno opterećenje 1,50 do 1,65, uz iznimno 1,25, u slučaju oštećenja 1,00. Uz dinamičko opterećenje može se računati s istom sigurnošću kao i uz statičko ako se maksimalna vrijednost opterećenja poveća pomoću faktora dinamičnosti prema formuli iz teorije oscilacija. U proračunu čvrstoće ratnih brodova pojedine mornarice daju tzv. planove opterećenja, u kojima za pojedine konstruktivne elemente propisuju način opterećenja i dopuštene napone (v. npr. tablicu 1).

(npr. veza rebrenice s rebrom). I obratno, nosač se smatra potpuno ukliještenim ako je priključen na drugi nosač koji ima u poređenju s njime veliki moment tromosti (npr. rebro na rebrenicu). Nosači su potpuno ukliješteni i kad prolaze preko više jednako razmaknutih oslonaca, ako su opterećeni simetrično raspodijeljenim opterećenjem i ako su konstantnog presjeka, jer je onda ispunjen uvjet da je kut zaokreta u gibne linije iznad oslonca jednak nuli. Ali većinom su brodski nosači na osloncima djelomično ukliješteni, tj. oni dopuštaju stanoviti kut zakretanja oslončkih presjeka nosača (taj je kut manji od kuta za koji bi se taj presjek zakrenuo kad bi nosač bio zglobno priključen). To je uvijek slučaj kad su međusobno povezani nosači približno podjednakih momenata tromosti presjeka (npr. spoj rebra sa sponjom). Osim do zakretanja vrlo često dolazi i do popuštanja pojedinih oslonaca, pa nosač ima stanovit ugib i na samom osloncu. To se uvijek događa kad je jedan nosač poduprt drugim koji, budući da nema neizmjernu krutost, dobiva pod opterećenjem stanovitu deformaciju (npr. sponje poduprte podvezama). Budući da su pojedini nosači koji

Tablica 1

PLAN OPTEREĆENJA ZA Če 42

Izvedba: potpuno zavarena. Opseg primjene: Atlantski ocean. Slučaj I: Redovno stanje u pogonu. Slučaj II: Iznimni rijetki slučaj u pogonu. Slučaj III: Slučaj oštećenja.

Građevni dio	Računska visina pritiska, odnosno opterećenje			$\sigma_r \leq \sigma_{dop} = \sigma'$		
	Slučaj I	Slučaj II	Slučaj III	Slučaj I	Slučaj II	Slučaj III
Međupaluba Opločenje Podgređnjaci } pojasi, Okrvirna rebra } struk, Medurebra } limovi	0,08 kp/cm ² kao teret palube	—	Oštećena vodna linija + 20° nagiba Međupaluba = pregradna paluba	σ' (lima) = 1,25 σ' (ukrepe) = 1600 kp/cm ²	—	σ' (lima) = 2400 kp/cm ² σ' (ukrepe) = 2200 kp/cm ²
Oplata dvodna Opločenje Uzdužne veze: } pojasi, struk i limovi	a) Visina pritiska = 2,5 m iznad sredine dvodna b) Uzdužna čvrstoća uz 25° nagiba i nemirno more	a) Visina pritiska do visine odušne cijevi = 1 m iznad gornje palube na boku b) Uzdužna čvrstoća uz 0° i nemirno more	a) Oštećena vodna linija + 20° nagiba b) Uzdužna čvrstoća uz 0° i nemirno more	σ' (lima) = 1,25 σ' (ukrepe) = 1600 kp/cm ²	σ' (lima) = 2200 kp/cm ² σ' (ukrepe) = 1800 kp/cm ²	σ' (lima) = 2400 kp/cm ² σ' (ukrepe) = 2200 kp/cm ²
Poprečne pregrade Opločenje Ukrepe: pojasi, struk i limovi	—	Visina pritiska do visine odušne cijevi susjednih tankova i ćelija + 20° nagiba	Oštećena vodna linija + 20° nagiba	—	σ' (lima) = 2200 kp/cm ² σ' (ukrepe) = 1800 kp/cm ²	σ' (lima) = 2400 kp/cm ² σ' (ukrepe) = 2200 kp/cm ²

Za neke konstruktivne elemente koji su opterećeni samo iznimno (u slučaju havarije), kao što su npr. nepropusne pregrade koje se mogu i trajno deformirati pod uvjetom da ostanu nepropusne, prelazi se granica popuštanja, pa treba u proračunu primijeniti metode teorije plastičnosti. U novije doba nastoji se provesti proračun, umjesto na osnovu granice popuštanja, na osnovu graničnog opterećenja koje konstrukcija može izdržati a da se ne slomi. U tom slučaju se odabire nešto veći koeficijent sigurnosti.

Lokalna čvrstoća broda

Opterećenje od pritiska vode, težine brodskih uređaja i tereta u brodu preuzima oplata i prenosi na sistem međusobno povezanih nosača koji su napregnuti savijanjem od akcija oplate. Proračun čvrstoće elemenata brodske konstrukcije sastoji se, dakle, u prvom redu od proračuna ploča i sistema nosača za savijanje. Kako su oplata i uzdužni nosači napregnuti i silama pritiska, potrebno je odrediti i kritične napone pri izvijanju kako za pojedina polja ploča i pojedine nosače tako i za sklopove oplate ukrepljene sistemom nosača. U jednostavnim slučajevima, kad se pojedini nosači smatraju kao lokalna ukrepljenja (npr. rebra ili sponje u blizini poprečne pregrade), dovoljno je proračunati pojedine nosače samo za savijanje.

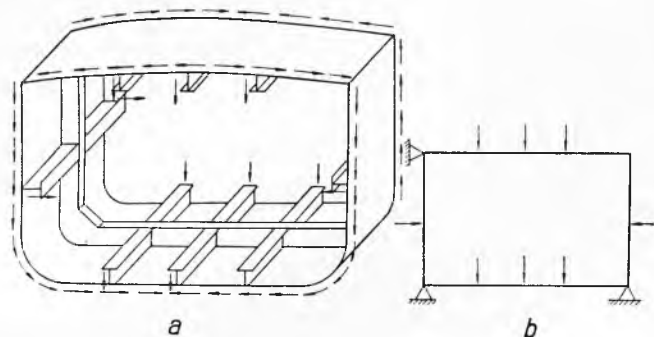
Nosači u brodskim konstrukcijama nikad nisu zglobno priključeni, a samo rijetko su potpuno ukliješteni. Ipak se kao zglobni oslonac smatra mjesto gdje je jedan nosač priključen na drugi koji ima u poređenju s njime mali moment tromosti presjeka

sčinjavaju brodski trup povezani s drugim nosačima koji se pod njihovim opterećenjem deformiraju, oni su skoro uvijek statički neodređeni. U većini slučajeva treba, za iole tačniji proračun, promatrati ne pojedine nosače zasebno, nego njihove sklopove. Oni mogu biti povezani u okvire — npr. rebrenica, rebra, sponja — ili čine tzv. rešetku, tj. sklop dvaju sistema paralelnih nosača koji se međusobno sijeku pod pravim kutom, npr. konstrukcija dna, koja se sastoji od sistema uzdužnih nosača (hrptenice i interkostalnih nosača) i poprečnih nosača (rebrenića), pa konstrukcija palube (sponje i podveze) i konstrukcija bokova broda (rebra i proveze). Takvi su sistemi nosača visoko statički neodređeni.

Jedna je od karakteristika brodske konstrukcije da su neki nosači poduprti po cijeloj dužini jednako razmaknutim gredama konstantnog presjeka. Tako su npr. proveze poduprte rebrima a podveze i uzdužne praznice grotla sponjama. U slučaju većeg broja takvih elastičnih podupora (više od 5), može se smatrati da greda leži na kontinuiranoj elastičnoj podlozi i prema tome provesti njen statički proračun.

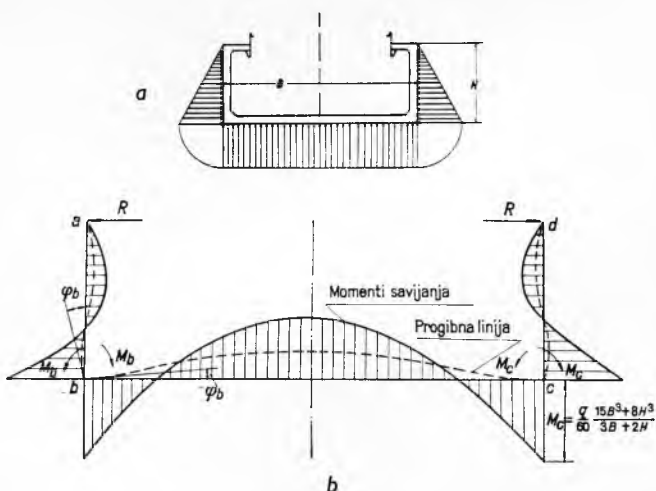
Okviri u statičkim proračunima za brodogradnju najčešće nisu samostalni konstruktivni elementi, nego su čvrsto povezani s ostalom brodskom konstrukcijom. Npr. okviri koji zajedno s poprečnim pregradama osiguravaju poprečnu čvrstoću broda, a sastoje se od rebrenica, rebra i sponja, povezani su međusobno i s poprečnim pregradama pomoću oplate paluba, vanjske oplate i uzdužnih nosača (proveza ili podveza) u jednu konstruktivnu cjelinu. Utjecaj vanjske oplate i oplate palube može se smatrati kao nepokretni oslonac okvira koji ne dopušta njegov pomak u

ravnini oplata (zbog velike krutosti oplata u vlastitoj ravnini) nego samo zakretanje (zbog male krutosti oplata okomito na vlastitu ravninu). Utjecaj uzdužnih veza može se smatrati dodatnim opterećenjem okvira, osim opterećenja od pritiska vode i od te-



Sl. 5. Poprečni okvir kao dio brodske konstrukcije i njegova shema za proračun

žine tereta, uređaja u brodu i samih konstruktivnih elemenata (sl. 5). Kao nepokretni oslonci djeluju i uzdužne pregrade jer su čvrsto povezane s poprečnim pregradama. Upore, naprotiv, smatraju se pokretnim osloncima, a pokretni oslonci su i polja palube male širine (kad su izrezi za grotla veliki, sl. 6) i spojevi poluspona s uzdužnim praznicama grotla. Dok se utjecaj popuštanja oslonaca kod upora može odrediti iz opterećenja same okvirne konstrukcije, u drugim slučajevima to nije moguće, pa



Sl. 6. a Opterećenje jedne riječne teglenice hidrostatičkim pritiskom, b momenti savijanja i ugibna linija za okvir riječne teglenice uz isto opterećenje

treba promatrati i opterećenje ostalih konstruktivnih elemenata koji čine taj oslonac.

Za statički proračun, tj. određivanje dijagrama momenata savijanja svih dijelova okvira, služi pojednostavnjena shema stvarne konstrukcije. Budući da uslijed korisne širine oplata, koja se savija zajedno s profilom ukrepa, neutralna os prolazi blizu vanjskog brida ukrepa, uzimaju se za linije sheme vanjski bridovi profila. Pri tom se zanemaruju: preluk sponja, mala zaobljenja na uzvoju (ako je koeficijent glavnog rebra $\beta > 0,95$, time učinjena pogreška je neznatna), utjecaj koljena, izreza itd. U slučaju većih krivina, kao na krmenim i pramčanim rebrima, treba proračunati okvir s krivim štapovima.

Proračun rešetki za savijanje. Pod rešetkom razumijeva se sistem uzdužnih i poprečnih nosača koji se obično ukrštaju pod pravim kutom, a na mjestima ukrštanja (čvorovima) čvrsto su povezani. Oni su na svojim krajevima pričvršćeni na krutu podlogu. Opterećeni su silama okomito na svoju ravninu. Kao primjer rešetkastih sistema u brodskoj konstrukciji mogu služiti dno, palube i bokovi broda.

Dno se sastoji od uzdužnih nosača (hrptenice i bočnih interkostalnih nosača) i poprečnih nosača (rebrnica), koji se oslanjaju na pregrade i bokove broda, a opterećeni su pritiskom vode i

tereta unutar broda. Oplata prenosi to opterećenje na rešetkastu konstrukciju. U prvom približenju može se pretpostaviti da se cijelo to opterećenje prenosi kao kontinuirano na duže stranice polja ploče, dakle na one grede rešetke koje su jedna od druge manje razmaknute. One se nazivaju glavnim gredama, njihov broj je obično znatno veći nego broj tzv. ukrštenih greda koje ih sijeku. Ako grede jednog smjera imaju znatno veću krutost nego grede drugog smjera, onda, s obzirom na neznatno popuštanje oslonaca, nema smisla da se takav sistem računa kao rešetka, nego se grede s manjom krutosti računaju kao kontinuirani nosači sa čvrstim osloncima u čvorovima.

Za rješavanje takvih sistema ukrštenih nosača postoji više metoda. Kad je broj čvorova malen, najzgodnija je metoda izjednačenja ugiba, prema kojoj ugibi ukrštenih greda moraju u pojedinim čvorovima biti jednaki. Kad je broj čvorova veći, dolazi se do sistema linearnih jednadžbi s mnogo nepoznanica, koji je teško rješavati, pa se zato u takvim slučajevima upotrebljavaju druge metode. Jedna grupa metoda, koju su razvili Nijemci (W. Biermann, E. Bischoff) osniva se na Crossovom postupku iteracionog određivanja momenta savijanja. Taj postupak je zamoran jer konvergencija iteracionog računa nije tako dobra kao kad se proračunavaju okviri. Stoga su ga pokušali usavršiti uvođenjem tzv. prirodnih konstanti krutosti, koje uzimaju u obzir popuštanje ili elastično ukleštenje oslonaca grede, što u stvarnosti i postoji kod pojedinih štapova rešetke. Konstante krutosti pojedinih štapova za tzv. otvorene sisteme mogu se odrediti sukcesivno, polazeći od njihovih krajeva na fiksnim osloncima konture rešetke, pa se izbjegava iteracioni postupak istovremenog otpuštanja svih čvorova. Iako ovaj postupak ima veliku prednost da se može upotrijebiti i za proračun sistema sa gredama različitih razmaka i različitih presjeka, on zahtijeva velik računski rad, pa se za više ili manje pravilne brodske rešetkaste sisteme s glavnim gredama istog presjeka i jednakog međusobnog razmaka radije upotrebljavaju metode koje se osnivaju na savijanju grede na elastičnoj podlozi. Njih su razvili ruski učenjaci Bubnov, Papkovič i Segal.

Kad je broj uzdužnih i poprečnih greda velik, ako su razmaci, momenti tromosti presjeka i način učvršćenja krajeva jednaki za sve poprečne grede ili za sve uzdužne grede, može se rešetka smatrati ortotropnom pločom (tj. pločom koja ima različitu krutost u dva međusobno okomita smjera). Na taj način mogu se za proračun rešetke iskoristiti metode teorije ploča.

Pri proračunavanju rešetki često se, kao i u proračunu ploča, umjesto postavljanja diferencijalnih jednadžbi upotrebljava Ritzov postupak, koji se osniva na stavu o minimumu ukupnog potencijala.

Složeno savijanje. U brodskim konstrukcijama često se pojavljuju nosači izloženi istovremenom djelovanju poprečnih i uzdužnih sila (proveze, podveze, uzdužna rebra itd.). Uzdužno su napregnuti silama savijanja broskog trupa a poprečno silama pritiska vode i tereta. Uzdužne sile proizvode također momente savijanja, pa napone od savijanja treba odrediti iz ukupnog momenta savijanja od poprečnog i uzdužnog opterećenja. Ovim naponima treba još dodati napone zatezanja ili pritiska od uzdužnih sila. (Ako postoji početni ugib nosača, uzdužne sile prouzrokuju momente savijanja i kad nema poprečnog opterećenja.) Veličina uzdužnih sila redovno ipak nije tolika da bi se one morale uzeti u obzir pri određivanju momenta savijanja; one imaju velik utjecaj samo kod brodova jako opterećenih općenitim savijanjem trupa uz ograničeno opterećenje nosača u poprečnom smjeru (riječni brodovi).

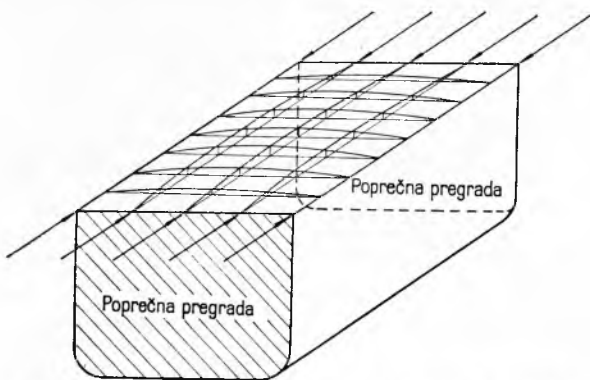
Grede na elastičnoj podlozi izložene složenom savijanju proračunavaju se po specijalnim za taj slučaj izvedenim obrascima.

Rešetke se za složeno naprezanje savijanjem s normalnom silom računaju analogno kao i u slučaju naprezanja jednostavnim savijanjem. Ako je broj čvorova malen, primjenjuje se metoda izjednačenja ugiba, samo što se ugib uzdužnih greda računa na osnovu formula za naprezanje savijanjem i normalnom silom. Kad je broj uzdužnih greda veći, može se primijeniti metoda podjele ukupnog opterećenja na glavna opterećenja ako momenti tromosti presjeka uzdužnih greda stoje među sobom u istom omjeru kao i uzdužne sile koje na njih djeluju. Time se proračun rešetke svodi na proračun složenog savijanja uzdužnih greda na

elastičnoj podlozi, opterećenih glavnim opterećenjem i uzdužnim silama, koje se moraju uzeti u račun u punoj vrijednosti za svako glavno opterećenje.

U općenitijem slučaju rešetke, kad momenti tromosti presjeka uzdužnih greda imaju bilo kakve veličine, upotrebljavaju se obično približne metode proračuna.

Stabilnost greda i njihovih sistema. Izvijanje štapova. Znatan dio elemenata brodske konstrukcije izvrnut je velikim silama pritiska. Kako se obično radi o vitkim elementima (profilima, pločama), postoji opasnost da se oni izviju. To dolazi sve više do izražaja u modernim konstrukcijama, uslijed nastojanja da se minimalnim dimenzioniranjem što više smanji težina broda. Nesreće koje su se desile brodovima na moru zbog nedovoljne stabilnosti nekih elemenata brodske konstrukcije, kao i eksperimenti koji su u tu svrhu izvršeni, pokazali su da je čvrstoća broskog trupa ograničena otpornošću njegova gornjeg pojasa (palube) protiv izvijanja (sl. 7), pa je zbog toga osim proračuna čvrstoće potrebno provesti i provjeravanje stabilnosti konstrukcije.



Sl. 7. Izvijanje palube broda pod silama pritiska na valnom dolu

Kako se u brodograđevnim konstrukcijama obično radi o složenom opterećenju i složenom učvršćenju pojedinih štapova, nije lako naći tačan integral diferencijalne jednačbe elastične linije štapa u slučaju indiferentnog stanja ravnoteže, pa se primjenjuje metoda energije (Ritz, Timošenko) ili onda metoda Galerkinova za približno integriranje diferencijalne jednačbe.

U slučaju simetričnog opterećenja podveza, odnosno kad upore nisu jakim koljenima čvrsto s njima povezane pa se na njih ne prenose momenti od opterećenja palube, može se smatrati da su upore zgloбно učvršćene na gornjem i donjem kraju, a opterećene silama pritiska od akcija podveza. Kritično opterećenje štapova promjenljivog presjeka (jarbolâ, samaričâ) računa se metodom Timošenka tako da se pretpostavi oblik elastične linije izvijenog štapa i na osnovu toga postavi izraz za potencijalnu energiju. Dok se u metodi Ritzâ pretpostavlja funkcija s neizmerno mnogo članova, od kojih svaki zadovoljava geometrijske karakteristike sistema, a njihova suma daje elastičnu liniju štapa, Timošenkova metoda upotrebljava samo nekoliko članova zgodno odabranih funkcija, čiji se nepoznati parametri određuju tako da zadovolje rubne uvjete, odnosno uslove o minimumu totalnog potencijala sistema. Budući da se odabire samo nekoliko članova, a ne njih neizmerno mnogo, postupak je približan i daje vrijednost kritične sile veću od stvarne; nedovoljno aproksimiranje elastične linije izvijenog štapa može se smatrati dodatnim fiktivnim osloncima koji povećavaju vrijednost kritične sile. Ipak, postepenim povećavanjem broja članova može se postići tačnost po volji. Dovoljna tačnost je postignuta kad dva uzastopna proračuna, od kojih u slijedećem dolazi uvijek jedan član više, daju rezultate koji se malo razlikuju.

Podveze se mogu smatrati gredama na elastičnoj podlozi. One su opterećene silama pritiska od uzdužnog savijanja broskog trupa (sl. 7) pa ih treba kontrolirati za izvijanje.

Kritično opterećenje rešetke može se naći na osnovu teorije njenog savijanja s normalnom silom. Prema tome, u slučaju uzdužnih greda jednakog presjeka, opterećenih istim uzdužnim silama, savijanje rešetke može se predočiti kao suma glavnih savijanja. Za svako glavno savijanje pojedine uzdužne grede

računaju se kao grede na elastičnoj podlozi. Prema tome, može se smatrati kritičnom ona najmanja sila pritiska pod kojom, bez poprečnog opterećenja, može nastati jedan od glavnih oblika savijanja grede. Od svih mogućih oblika glavnih savijanja, pri gubitku stabilnosti rešetke nastupit će onaj pri kojem je krutost glavnih greda najmanja, a to je prvi, kad se sve glavne grede savijaju na istu stranu (sl. 7). Kad su glavne grede vrlo krute, one se uopće ne savijaju, pa se ukršene grede izvijaju između glavnih, koje im služe kao čvrsti oslonci.

Čvrstoća ploča. Svaki čelični brod sastoji se od velikog broja pravokutnih ploča, zavarenih ili zakivanih među sobom i sa nosačima koji ih podupiru i na koje one prenose kontinuirano opterećenje (npr. pritiska vode) raspodijeljeno na njihovoj površini. Osim opterećenja od pritiska vode i tereta na palubama i dnu broda, koje djeluje okomito na njihovu ravninu, te su ploče napregnute i u vlastitoj ravnini znatnim uzdužnim silama koje potječu od općenitog savijanja broskog trupa.

S obzirom na ponašanje pod opterećenjem, ploče broskog trupa se dijele na krute i gipke. Krute su one ploče koje dobivaju ugibe male u poređenju sa svojom debljinom, pa se mogu zanemariti naponi od zatezanja membrane spram napona od savijanja. Naponi od zatezanja, jednoliko raspodijeljeni po debljini ploče, nastaju kad se ona savija, jer su joj krajevi učvršćeni na više ili manje krute oslonce, pa se pri ugibanju ne mogu zbližiti. Naponi od savijanja, linearno raspodijeljeni po debljini ploče, nastaju uslijed zaokretanja pojedinih presjeka, slično kao i u gredi. Kad su ploče gipke, jedan dio opterećenja preuzimaju vlačni naponi membrane, pa su ugibi i naponi tih ploča znatno manji nego što se dobiva na osnovu teorije savijanja krutih ploča. Što je veće opterećenje i manja debljina ploče to su veći naponi membrane u poređenju s naponima od savijanja i obratno. Ugibi većine ploča u brodograđevnim konstrukcijama (vanjskoj oplati, dnu i palubi za čvrstoću) toliko su mali da se one mogu smatrati krutima.

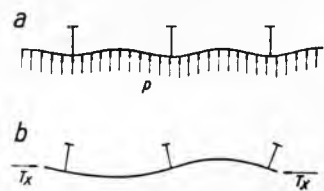
U brodogradnji su ploče redovno ukrućene poprečnim i uzdužnim ukrepama, pa imaju različite krutosti u ta dva smjera. To su tzv. ortotropne ploče, za razliku od izotropnih, kojima je krutost u svim smjerovima konstantna. Relativno složeno proračunavanje tih ploča pojednostavnjuje se ako se ukrućenje sastoji od većeg broja u istom smjeru jednako razmaknutih ukrepa jednakog momenta tromosti presjeka. Ipak, u općenitom slučaju je izvanredno teško pronaći rješenja u zatvorenom obliku koja bi zadovoljavala postavljenu diferencijalnu jednačbu i sve rubne uvjete. Zbog toga se obično pribjegava približnim rješenjima, koja se što je više moguće približavaju stvarnima.

Ako je ploča, osim poprečnim pritiskom p , opterećena i silama T_x , T_y u vlastitoj ravnini, može se ona — kad su joj ugibi mali — računati s dobrim približenjem kao za složeno savijanje grede na elastičnoj podlozi. Jednostavnije je, međutim, zanemariti utjecaj vlačnih sila T_x i T_y na veličinu ugiba (one taj ugib smanjuju) i izračunati ukupni napon superponiranjem vlačnih napona uslijed uzdužnih sila T_x i T_y i napona uslijed savijanja od poprečnog opterećenja p . Budući da se tako računa s većim ugibom nego što je stvarni, proračun sadrži izvjesni faktor sigurnosti. Sile pritiska T_x i T_y , međutim, povećavaju ugib, pa je gornji postupak nedopustiv kad je ploča njima napregnuta. U praktičnim proračunima upotrebljava se zbog toga približni postupak Bleicha, izveden na osnovu tačne teorije Marguerrea pod slijedećim pretpostavkama: maksimalni ugib ne smije preći polovicu debljine ploče, tlačni napon u ravnini ploče mora ostati ispod granice proporcionalnosti i mora biti manji od kritičnog. Većina ploča brodske konstrukcije, zbog simetričnosti opterećenja i same konstrukcije, mogu se smatrati uklještenima, čime je ispunjen uslov da je maksimalni ugib manji od polovice debljine ploče, pa gore navedeni postupak daje za praksu dovoljno tačne rezultate. U rijetkim slučajevima kad se ploča smatra zgloбно položenom, maksimalni ugibi mogu ležati u granicama 0,5 do 0,8 debljine ploče.

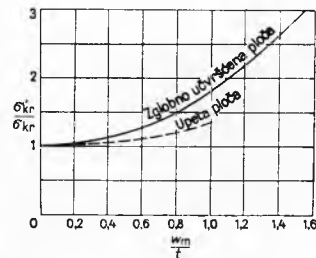
Ploče nepropusnih pregrada i paluba tankova imaju veće ugibe pa se ne mogu zanemariti vlačni naponi membrane; takve ploče treba smatrati gipkima. Kad su ukrepe na nepropusnim pregradama normalno raspodijeljene, te se ploče mogu zbog velikog odnosa njihovih strana smatrati neizmerno dugačkim,

može se promatrati samo savijanje jedne njihove pruge jedinične širine.

Izvijanje ploča. Limovi brodske konstrukcije su opterećeni, osim uzdužnim silama u vlastitoj ravnini, i poprečnim opterećenjem p , pa je pitanje koliko to opterećenje utječe na veličinu kritične sile. Pod djelovanjem uzdužnih sila pritiska limovi palube ili dna broda izvijaju se kao na sl. 8b. Uslijed male torzijske krutosti ukrepa, rubovi ploče nisu znatnije ukliješteni, pa se ploča računa za izvijanje kao da su joj rubovi zglobno položeni. U slučaju poprečnog opterećenja p , ploča se deformira prema sl. 8a, kao da su joj rubovi potpuno ukliješteni, što povisuje kritični napon izvijanja. Ipak, ako poprečno opterećenje p ne dostiže velike vrijednosti, ono nije kadro spriječiti izvijanje oplata prema sl. 8b. Na osnovu teorije gipkih ploča Levy je ispitao te odnose, i rezultati njegovih proračuna prikazani su u dijagramu na sl. 9. Iz tog dijagrama vidi se da poprečno opterećenje utječe znatno na veličinu kritičnog



Sl. 8. a Deformacije uslijed poprečnog opterećenja p ; b deformacije uslijed uzdužnih tlačnih sila T_x



Sl. 9. Povećanje kritičnog napona ploče uslijed djelovanja poprečnog opterećenja

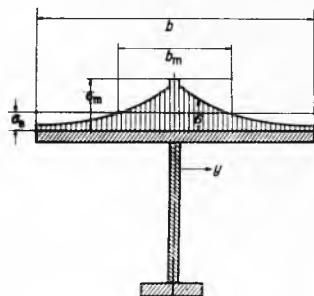
napona ako je odnos maksimalnog ugiba i debljine lima velik (avionske konstrukcije). Kako za brodske konstrukcije taj odnos redovito ne prelazi 0,4, povišenje kritičnog napona uslijed utjecaja poprečnog opterećenja je tako neznatno da ga praktički ne treba uzeti u obzir.

Korisna širina lima. Kad se savija nosač s vrlo širokim pojasevima, kao što su npr. polja oplata ukrućena ukrepama, normalni naponi nisu jednoliko raspodijeljeni po širini pojasa, kao što daje elementarna teorija savijanja greda. Zbog utjecaja tangencijalnih napona, koji uzrokuju kutne deformacije, normalni naponi opadaju to više što su dotična vlakna prirubnice dalje od struka (sl. 10). Da bi se to ipak moglo računati s jednostavnim formulama nauke o čvrstoći, pretpostavlja se da su naponi jednoliko raspodijeljeni sa svojom maksimalnom vrijednošću po jednoj manjoj, tzv. korisnoj širini prirubnice b_m , koja se određuje iz uvjeta da je ukupna normalna sila koju prenosi presjek u oba slučaja jednaka, dakle:

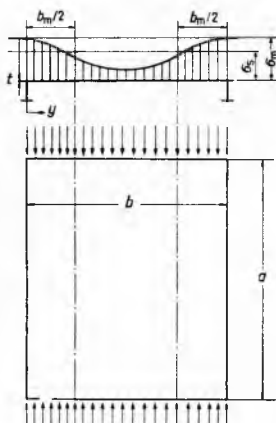
$$\sigma_m b_m = \int_{-b/2}^{+b/2} \sigma_s dy = \sigma_s b,$$

gdje je σ_m maksimalni, a σ_s srednji napon.

Tako definirana korisna širina naziva se širinom prve vrste. Kad je oplata, ukrućena ukrepama, napregnuta pritiskom, ne iscrpljuje se moć nošenja ploča prekoračenjima kritičnog napona, kao što je to slučaj kod vitkih štapova. Uslijed podrške koju ukrepe pružaju oplati do-



Sl. 10. Definicija korisne širine lima prve vrste



Sl. 11. Definicija korisne širine lima druge vrste

lazi nakon prekoračenja kritičnog opterećenja do pregrupacije napona, što uvjetuje njihovu nejednoliku raspodjelu (sl. 11). Da bi se moglo računati s jednolikom raspodjelom napona, definira se tzv. korisna širina druge vrste tako da sila koju prenosi odgovarajući dio oplata bude jednaka u oba slučaja.

Premda su pojmovi korisne širine prve i druge vrste iz osnova različiti, ipak se u praksi uvriježilo da se korisna širina računa u oba slučaja po istoj empirijskoj formuli $b_m = 40 \dots 60 t$, koju je na osnovu eksperimenata uveo Pietzker (1914). Dok se ta formula dosta dobro slaže s teorijskim rezultatima za korisnu širinu druge vrste, ona daje krive rezultate za korisnu širinu prve vrste (za koju se obično i upotrebljava), budući da ova uopće ne ovisi o debljini lima t , nego o rasponu nosača i obliku momentne plohe. Ipak se gore navedena formula održala u praksi jer daje rezultate koji obično leže na strani sigurnosti i jer je vrlo jednostavna.

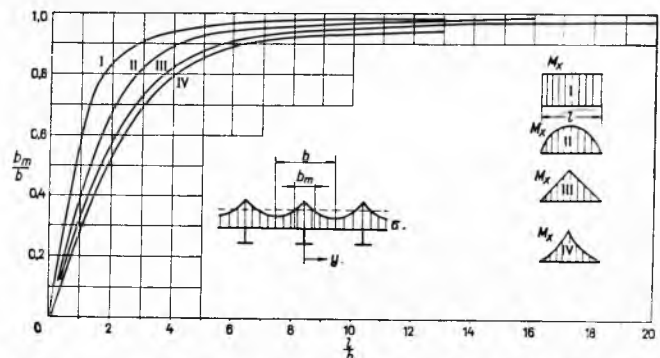
Međutim, na osnovu radova Chwalle (1936), Schade (1951) i drugih, koji su pomoću klasične teorije tankih ploča i pomoću Airyjeve naponske funkcije izračunali nejednoliku raspodjelu napona u širokim prirubnicama složenih nosača podvrgnutih savijanju, može se za praksu dati približan i dovoljno jednostavan proračun koji bolje odgovara stvarnosti. U tu svrhu služi Vollbrechtov dijagram iz 1952 (sl. 12) za razne slučajeve oblika momentne plohe. U dijagramu je nanesen omjer korisne i stvarne širine pojasa b_m/b kao funkcija odnosa udaljenosti nul-tačaka momentne plohe l i stvarne širine pojasa b . Kad je odnos l/b malen, mogu se umjesto tog dijagrama upotrijebiti jednostavne formule:

slučaj I (sl. 12): $b_m = 0,60 l$ za $l/b \leq 1$,

slučaj II: $b_m = 0,33 l$ za $l/b \leq 2$,

slučaj III: $b_m = 0,25 l$ za $l/b = 3$,

koje predstavljaju jednadžbe tangente u ishodištu na krivulje u dijagramu sl. 12.



Sl. 12. Određivanje korisne širine lima za razne oblike momentne plohe nosača

Korisna širina druge vrste može se računati u grubom približenju s pretpostavkom da nose samo dvije pruge lima uz ukrepe, svaka širine $b_m/2$. Za zglobno učvršćenje duge ploče formula za kritični napon izvijanja glasi:

$$\sigma_{kr} = \frac{\pi^2 E}{3(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b_m} \right)^2.$$

Ploča više ne može preuzeti nikakvu silu kad σ_{kr} dosegne granicu popuštanja materijala σ_r . Iz gornje formule proizlazi:

$$b_m = \pi t \sqrt{\frac{E}{3(1 - \mu^2) \sigma_r}}.$$

S vrijednostima $\mu = 0,3$ i $E = 2,1 \cdot 10^6$ kp/cm² dobiva se za $\sigma_r = 2300$ kp/cm² (Če 42), $b_m = 62,1 t$, a za $\sigma_r = 3600$ kp/cm² (Če 52) $b_m = 46,0 t$, što se približno poklapa s vrijednostima koje je dobio Pietzker. Tačniji proračun na osnovu teorije ploča dao je Bleich (1952) svojim formulama za korisnu širinu u zavisnosti od odnosa σ_{kr}/σ_m . Za dugačke ploče, $a = a/b \geq 1$ (uzdužni sistem gradnje), korisna širina je

$$b_m = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_m} \right) b.$$

Za kratke ploče, $\alpha \leq 1$, korisna širina je

$$b_m = \frac{1 + \alpha^4 + 2 \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_m}}{3 + \alpha^4} \cdot b.$$

Kad je $\alpha \ll 1$, može se ta formula pojednostavniti ako se postavi $\alpha^4 = 0$, pa je

$$b_m = \frac{1}{3} \left(1 + 2 \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_m} \right) b.$$

Moć nošenja ploče je iscrpna kad maksimalni napon dosegne granicu popuštanja. S povećanjem tog maksimalnog napona pada korisna širina lima. Njena najmanja vrijednost se dobiva ako se u gornjim formulama umjesto σ_t umjesto σ_m . Pomoću tako dobivenih formula može se izračunati maksimalni dopušteni srednji napon pritiska, koji leži iznad kritičnog napona izvijanja ploče. Iz odnosa:

$$\sigma_m b_m = \sigma_t b_m = \sigma_s b,$$

proizlazi:

$$\sigma_{s \max} = \frac{\sigma_t}{2} \left(1 + \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_t} \right) \quad \text{za } \alpha \geq 1$$

$$\sigma_{s \max} = \frac{\sigma_t}{3} \left(1 + 2 \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_t} \right) \quad \text{za } \alpha \ll 1.$$

Kod zakrivljenih nosača, kao što su npr. rebra u području uzvoja dna broda, opadanje napona u poprečnom smjeru dolazi još više do izražaja nego kod ravnih nosača jer limovi izmiču preuzimanju napona i u radijalnom smjeru. Za taj je slučaj Th. von Kármán (1933) za korisnu širinu prve vrste naveo formulu:

$$b_m = 1,08 \sqrt{R t},$$

gdje je R radijus zakrivljenosti nosača, a t debljina oplata. Kod uzdužnih sila, naprotiv, zakrivljeni limovi pokazuju mnogo veću stabilnost nego ravni, pa ulaze u račun cijelom širinom.

Opća čvrstoća broda

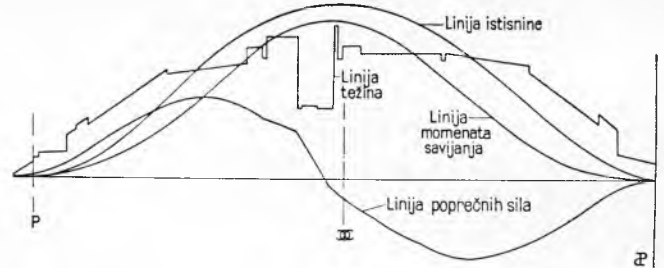
UZDUŽNA ČVRSTOĆA BRODA

Proračun uzdužne čvrstoće služi za dimenzioniranje uzdužnih konstruktivnih elemenata brodskog trupa, koji se kontinuirano protežu po većem dijelu njegove dužine. Da bi se odredili naponi, treba iz vanjskog opterećenja proračunati veličine poprečnih sila i momenata savijanja u pojedinim presjecima po dužini broda. Pri tzv. standardnom proračunu uzdužne čvrstoće zamišlja se brod u položaju statičke ravnoteže na brijegu ili dolu trohoidnog vala dužine jednake dužini broda, a visine jednake 1/20 dužine.

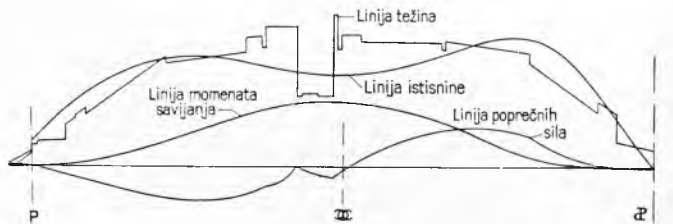
Raspodjela opterećenja po dužini broda dobiva se kao razlika raspodjele težine i raspodjele uzgona, predočenih tzv. linijom težine i krivuljom uzgona broda po jedinici dužine (sl. 13 i 14). Uzgon broda na jedinicu njegove dužine jednak je površini podvodnog poprečnog presjeka (rebra) na tom mjestu, pomnožen sa 1 i sa specifičnom težinom vode γ u kojoj brod plovi, dakle $F_L = A \cdot \gamma$. Budući da je γ konstantan, raspodjela uzgona po dužini broda prikazana je krivuljom površine rebara, a uzgon na svakom mjestu dobiva se množenjem ordinate te krivulje sa specifičnom težinom vode. Istisnina vanjske oplata uzima se u obzir tako da se vrijednost γ poveća za 0,01. Krivulja površine rebara odredi se pomoću Bonjeanovih krivulja u koje se ucrtta kontura vala prema pravilima trohoidne teorije valova, ili, jednostavnije, da se pojedine ordinate vala očitaju iz tablice 2.

Mnogo je teže konstruirati liniju težina po metru dužine. U tu svrhu se cijela težina broda dijeli u šest grupa: 1. trup, 2. oprema, 3. pogonski uređaj, 4. gorivo i voda, 5. posada s efektivima, 6. putnici i teret (na ratnim brodovima naoružanje) i svaka se

grupa dalje dijeli na niz podgrupa. Što je veći broj podgrupa to će tačnije biti određena krivulja težine. Težina svake podgrupe predočava se grafički trapezom (ili pravokutnikom) i to tako da dužina osnovke trapeza (pravokutnika) odgovara dužini na kojoj je na brodu raspoređena ta težinska podgrupa, površina trapeza (pravokutnika) je u nekom mjerilu jednaka težini podgrupe, a težište trapeza (pravokutnika) se po svom uzdužnom položaju poklapa s težištem podgrupe. Za razliku od ostalih težinskih grupa, težina trupa broda ne može se predočiti nekim jednostavnim geometrijskim likom. Težina trupa se predočava kombinacijom trapeza i pravokutnika, i to tako da se ukupna dužina broda podijeli na tri jednaka dijela, pa se težina srednjeg dijela prikaže kao pravokutnik a krajnjih dijelova kao trapez. Položaj težišta i površina tako dobivenog lika moraju odgovarati položaju težišta i težini trupa broda.



Sl. 13. Dijagram momenata savijanja i poprečnih sila za proračun uzdužne čvrstoće na valnom brijegu



Sl. 14. Dijagram momenata savijanja i poprečnih sila za proračun uzdužne čvrstoće na valnom dolu

Konačnu raspodjelu svih težina broda prikazuje raspodjela površine ispod linije težina, dobivene zbrajanjem ordinata pojedinih trapeza odnosno pravokutnika, koji predočuju pojedine težinske grupe i podgrupe.

Ukupna težina broda Δ , predstavljena površinom ispod linije težina, jednaka je uzgonu broda F_L , predstavljenom površinom ispod krivulje istisnine, što znači da i te dvije površine moraju biti jednake. Težište broda i hvatište sile uzgona leže na istoj okomici, pa i težište površine ispod linije težina i težište površine ispod krivulje istisnine moraju ležati na istoj okomici. U proračunu čvrstoće broda na valovima raspodjela istisnine i težine broda mora zadovoljavati ta dva uvjeta ravnoteže. Ravnotežni položaj broda na valovima obično se nađe mijenjajući uzdužni položaj i nagib broda na valu tako dugo dok se ne ispune uvjeti ravnoteže, odnosno može se odrediti računski rješavanjem jednadžbi ravnoteže. Kad je brod u ravnotežnom položaju, razlika između ordinata linije težina i krivulje uzgona daje ordinate krivulje koja prikazuje raspodjelu opterećenja broda po dužini, q .

Momenti savijanja i poprečne sile. Kad je nacrtana ta linija opterećenja q , krivulje poprečnih sila Q i momenata savijanja M dobivaju se na poznati način:

$$Q_x = \int_0^x q dx \quad \text{i} \quad M_x = \int_0^x Q dx = \int_0^x \int_0^x q dx dx$$

Integracija se izvodi obično numerički.

Poprečne sile prouzrokuju napone smicanja, a momenti savijanja normalne napone. Za dimenzioniranje uzdužnih veza mjerodavni su normalni naponi, a za njihove međusobne spojeve u uzdužnom smjeru (npr. šavove) naponi smicanja. Maksimalne vrijednosti poprečnih sila nastupaju približno na četvrtini dužine

Tablica 2

ORDINATE TROHOIDNOG VALA U DIJELOVIMA NJEGOVE VISINE h

Konstruktivska rebra	0 10	1 9	2 8	3 7	4 6	5 5
Valni brijeg	0	0,068	0,280	0,579	0,872	1
Valni dol	1	0,0872	0,579	0,280	0,068	0

broda, a maksimalna vrijednost momenta savijanja oko njene sredine.

Za trgovačke brodove sa strojarnicom u sredini maksimalne vrijednosti momenata savijanja daje proračun za valni brijeg, a za trgovačke brodove sa strojarnicom na krmi (npr. tankere) i za dugačke i vitke ratne brodove (npr. razarače) maksimalne momente savijanja daje proračun za valni dol. Da se dobiju najnepovoljnije vrijednosti, obično se u proračunu za valni brijeg izostavljaju sve težine potrošnih zaliha, smještene u sredini broda, a u proračunu za valni dol, te težine na krajevima broda. U svrhe pretprojektiranja može se u grubom približnu naći veličina maksimalnog momenta savijanja prema formuli $M_{max} = \Delta L/C$, gdje je Δ istisnina broda, L dužina broda između perpendikulara, C koeficijent prema tablici 3.

Tablica 3

VRIJEDNOSTI KOEFICIJENTA C ZA FORMULU $M_{max} = \frac{\Delta L}{C}$

Tip broda	Položaj broda za M_{max}	Koeficijent C
Veliki i brzi brodovi	valni brijeg	30
Veliki teretno-putnički brodovi	valni brijeg	33...36
Veliki teretni brodovi	valni brijeg	34
Mali teretni brodovi	valni brijeg	33
Tankeri ($\Delta = 15\ 000$ do $25\ 000$ t)	valni dol	45
Brodovi srednje veličine za prijevoz rude (strojarnica u sredini broda)	valni brijeg	35...37
Brodovi za Kanal	valni brijeg i valni dol	30
Riječni brodovi s malim gazom	mirna voda	18...24
Razarači	valni dol	20...25

Ovaj standardni proračun poprečnih sila i momenata savijanja još se uvijek upotrebljava u brodogradnji, ali on ima niz nedostataka pa je zbog toga njegova primjena vrlo ograničena. Ti nedostaci su posljedica toga da proračun počiva na nekim pretpostavkama koje ne moraju biti tačne: 1. Što je veća visina vala to su i veći momenti savijanja. Pitanje je da li odabrana visina vala od $1/20$ njegove dužine, odnosno dužina jednaka dužini broda, daje u svakom slučaju najnepovoljnije vrijednosti. Osim toga, valovi uzburkanog mora nisu ni trohoidni ni pravilni. 2. Brod se ne nalazi na valovima u položaju statičke ravnoteže, nego se na njima giba ponekad i žestoko, što uzrokuje sile inercije i sile otpora vode, koje dakako utječu na veličinu momenata savijanja. 3. Pritisak vodnih čestica na uronjenu površinu brodske oplate ne upravlja se po hidrostatičkom zakonu. Uslijed rotacije vodnih čestica vala, u valnom brijegu vlada manji a u valnom dolu veći pritisak nego na istoj dubini na mirnoj vodi (Smithov efekt), što daje manje opterećenje broda u poređenju s opterećenjem pretpostavljenim u standardnom proračunu. Uslijed prisutnosti brodskog trupa u valu remeti se gibanje vodnih čestica, one se reflektiraju o brodsku oplatu, što ima za posljedicu daljnju promjenu opterećenja.

Zbog toga standardni proračun ne daje stvarne vrijednosti napona u materijalu, nego može služiti samo za dimenzioniranje na osnovu uspoređivanja. To jest, ako se je pokazalo da neki izvedeni brod u eksploataciji ima dovoljnu uzdužnu čvrstoću, onda se to može reći i za novoprojektirani brod slične konstrukcije, ukoliko su za oba broda istim standardnim načinom proračuna dobivene iste vrijednosti naprezanja. Mada je još 1898 Krylov prikazao proračun uzdužne čvrstoće broda koji uzima u obzir njegovo gibanje na valovima, a od onda se taj način proračuna sve više usavršavao, ipak se on zbog svoje kompliciranosti nije uspio uvesti u praksu. Osim toga, standardni proračun uzdužne čvrstoće daje za momente savijanja vrijednosti veće od stvarnih, pa zbog toga njegovi rezultati sadrže u sebi stanovit faktor sigurnosti.

Razvitak brodogradnje i porast dimenzija brodova zahtijevao je proračun stvarnih napona u materijalu, kako bi se ovaj što bolje iskoristio. Zbog golemih dimenzija supertankera, npr., već malo smanjenje debljine limova može dati velike uštede na težini, a osim toga, standardnim proračunom se za limove tih brodova izračunavaju tolike debljine da nastaju teškoće u tehnološkoj obradi i zavarivanju.

Da bi se odredile stvarne vrijednosti momenata savijanja i izbjegle pri tom teškoće matematičke prirode, prešlo se je na sis-

tematsko ispitivanje modela pojedinih tipova brodova na valovima. Ukupni moment savijanja na valnom brijegu ili dolu dijeli se na moment savijanja u mirnoj vodi i na dodatni moment savijanja uslijed prolaza valova. Kao što je već rečeno, moment savijanja u mirnoj vodi, M_s , odredi se iz linije raspodjele opterećenja po dužini broda dvostrukim integriranjem. Moment savijanja za mirnu vodu može se za pojedine tipove brodova odrediti i pomoću empirijskih formula uz primjenu korekcijskih koeficijenata za određeni raspored težina. Dodatni moment savijanja uslijed prolaza valova može se odrediti pomoću formula dobivenih ispitivanjima modela. Općeniti izraz za te formule glasi:

$$M_v = C \rho g h L^2 B,$$

gdje je M_v dodatni moment savijanja uslijed prolaza valova, C bezdimenzijski koeficijent koji se određuje na osnovu pokusa s modelima, ρ gustoća vode u kojoj brod plovi, g akceleracija sile teže, h visina vala, L dužina broda, B širina broda. Za velike tankere Vedeler i Abrahamsen dali su formulu

$$\text{za valni brijeg: } M_v = 1,55 \cdot 10^{-2} \delta h L^2 B \gamma$$

$$\text{za valni dol: } M_v = 1,44 \cdot 10^{-2} \frac{\delta + 0,8}{1,6} h L^2 B \gamma;$$

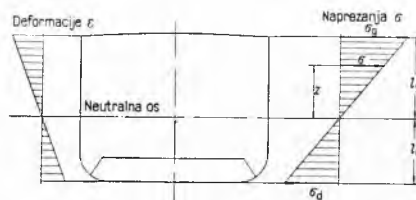
za teretne brodove vrijede Abrahamsenove formule:

$$\text{za valni brijeg: } M_v = 0,75 \cdot 10^{-2} (\delta + 0,8) h L^2 B \gamma$$

$$\text{za valni dol: } M_v = 0,90 \cdot 10^{-2} (\delta + 0,8) h L^2 B \gamma,$$

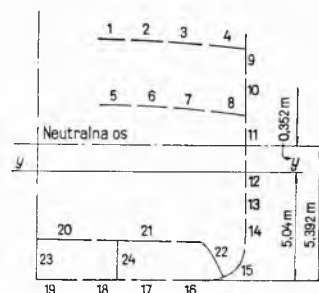
gdje je δ koeficijent istisnine, $\gamma = \rho g$ specifična težina morske vode. Ukupni moment savijanja brodskog trupa M jednak je dakle: $M = M_s + M_v$. Pomoću eksperimenata s modelima može se također uzeti u obzir i djelovanje nepravilnih valova uzburkanog mora, tako da se rezultati ispitivanja daju pomoću tzv. spektara momenata savijanja, iz kojih se onda mogu na osnovu statističke teorije izračunati najvjerojatnije maksimalne vrijednosti.

Normalni naponi računaju se po osnovnim formulama za savijanje greda. Prema tome i za savijanje brodskog trupa pretpostavlja se da se pojedini poprečni presjeci samo zakreću jedan prema drugome, ali ne deformiraju, tj. da ostaju ravni. To znači da je raspodjela deformacija i napona linearna (sl. 15). Mjerenja izvršena na brodskim konstrukcijama potvrdila su tu pretpostavku.



Sl. 15. Linearna raspodjela napona i deformacija pri savijanju brodskog trupa

Proračun normalnih napona σ u pojedinim poprečnim presjecima brodskog trupa svodi se uz poznatu raspodjelu momenata savijanja na određivanje momenata tromosti, odn. momenata otpora tih presjeka. U račun za moment tromosti presjeka ulaze samo tzv. uzdužne veze broda, koje se protežu po dovoljnoj dužini broda i ispunjavaju uvjete kontinuiranosti. Ti su uvjeti da su one čvrsto povezane među sobom i s konstrukcijom brodskog trupa — tako da slijede njegove deformacije pa se u njima javljaju isti naponi kao i u susjednim dijelovima konstrukcije — i da nisu oslabljene velikim izrezima i otvorima. Glavne su uzdužne veze brodskog trupa: vanjska oplata, oplata dna i paluba (pojas izvan otvora za grotla), hrptenica, pa podveze i uzdužna rebra ako je osigurana njihova kontinuiranost na prolazu kroz poprečne pregrade (obično koljenom koje prolazi kroz pregradu). Spojne



Sl. 16. Primjer proračuna momenta tromosti presjeka brodskog trupa i položaja neutralne linije (uz tabl. 4)

uglovnice zakivane konstrukcije (npr. uglovnica palubne proveze) obično se ne uzimaju u račun zbog velikog oslabljenja presjeka (mnogobrojnih rupa za zakovice) i nedovoljne kontinuiranosti.

Primjer proračuna momenta tromosti jednog presjeka broskog trupa prikazan je u sl. 16 i tablici 4. Iz te tablice se dobiva: $\Sigma A = 6755,9 \text{ cm}^2$, $\Sigma M = 17176 - 14795,2 = 2380,8 \text{ cm}^2 \cdot \text{m}$, $\Sigma A z^2 = 175464,5 \text{ cm}^4$, $\Sigma I = 820 \text{ cm}^4$.

Položaj neutralne osi je:

$$\frac{\Sigma M}{\Sigma A} = \eta = \frac{2380,8}{6755,9} = 0,352 \text{ m.}$$

Ako se pretpostavlja os $y-y$ nalazi 5,04 m iznad osnovke, tada je položaj neutralne osi: $5,04 + 0,352 = 5,392 \text{ m}$ iznad osnovke. Moment tromosti presjeka za os $Y-Y$ je:

$$I_{yy} = \Sigma A z^2 + \Sigma I = 175464,5 + 820 = 176284 \text{ cm}^4 \cdot \text{m}^2.$$

Moment tromosti za neutralnu os:

$$\frac{1}{2} I_{nl} = I_{yy} - \Sigma A \eta^2 = 176284 - 6756 \cdot 0,352^2 = 175444 \text{ cm}^4 \cdot \text{m}^2.$$

Ukupni moment tromosti za neutralnu os je $I_{nl} = 350888 \text{ cm}^4 \cdot \text{m}^2$.

Tablica 4

PRIMJER PRORAČUNA MOMENTA TROMOSTI PRESJEKA I POLOŽAJA NEUTRALNE LINIJE JEDNOG PRESJEKA BRODSKOG TRUPA PREMA SL. 16.

Broj	Element	Dimenzije cm	Površina A, cm ²	Položaj z za os y-y, m	Moment I A·z, cm ³ ·m	Moment II A·z ² , cm ⁴ ·m ²	Moment tromosti I, z za vlastitu os, cm ⁴ ·m ²
1	Oplata palube A	112×1,2	134,2	8,05	1080	8700	—
2	"	198×1,2	237,9	7,99	1898	15140	—
3	"	183×1,2	219,9	7,90	1731	13680	—
4	Proveza palube A	193×1,7	328,0	7,76	2540	19700	—
5	Oplata palube B	127×1,05	133,2	5,46	729	3980	—
6	"	206×1,05	216,0	5,40	1165	6300	—
7	"	213×1,05	224,0	5,28	1182	6250	—
8	Proveza palube B	140×1,25	175,0	5,17	901	4660	—
9	Završni voj	228×2,00	456,0	6,87	3139	21590	198
10	Vanjska oplata	236×1,70	401,0	4,68	1780	8350	186
11	"	236×1,55	366,0	2,42	886	2140	170
12	"	138×1,55	214,0	0,68	145	98	34
		58,4×1,55	90,5	-0,29	-26,2	7,6	2
13	"	168×1,55	260,0	-1,30	-338,2	439,9	61
14	"	208×1,55	322,2	-3,02	-973,0	2940	116
15	Voj uzvoja	244×1,7	415,0	-4,58	-1905	8750	25
16	Voj dna	234×1,7	398,0	-4,95	-1970	9750	—
17	"	234×1,7	398,0	-5,00	-1990	9950	—
18	"	214×1,7	364,0	-5,02	-1829	9150	—
19	"	70×2,2	154,0	-5,56	-780	3950	—
20	Kobilični voj						
	Oplata						
	dvodna	274×1,45	398,0	-3,88	-2040	7910	—
21	"	438×1,2	526,0	-3,88	-1545	6000	—
22	Završna ploča	25×1,45	36,3	-3,88	-141	547	—
		103×1,45	149,2	-4,27	-636,6	2720	13
23	Hrptenica	117×0,725	85,0	-4,46	-379,9	1692	10
24	Bočni interkostalni nosač	$\frac{1}{2}(109 \times 1,0)$	54,5	-4,43	-241,9	1070	5
	Suma		6755,9		+2380,8	175464,5	820

Ako su pojedine uzdužne veze od različitog materijala, kao na čeličnim brodovima s gornjom palubom od aluminijske legure ili s drvenom palubom, odnosno s drvenim pokrovom palube (drvene trenice ne preuzimaju vlačne napone zbog nedovoljne kontinuiranosti na spoju, nego samo napon pritiska), treba cjelokupni presjek reducirati pomoću Hookeova zakona na jedan materijal.

Ali kako se brodski trup, kao šuplji tankostjeni nosač, ne ponaša pri savijanju jednako kao greda punog presjeka, treba u takvu proračunu primijeniti stanovit korekcije. Zbog gubitka na stabilnosti pod naprezanjem pritiskom u vlastitoj ravni i uslijed ugiba od vertikalnog opterećenja u poprečnom smjeru (teret na palubi, pritisak vode itd.), odnosno početnog ugiba, pojedini limovi ne preuzimaju onaj dio opterećenja koji bi na njih otpadao prema običnom proračunu, pa su zato susjedni dijelovi drukčije napregnuti. Naponi dakle nisu jednoliko raspodijeljeni u pojedinim horizontalnim slojevima presjeka trupa. Zbog toga se pri proračunu uzdužne veze trupa podijele u dvije grupe, u gipke i krute. Krute su one kod kojih se može zanemariti utjecaj izvijanja, poprečnog opterećenja i početnog ugiba, a gipke one kod kojih se to ne može. Krute veze su obično uzdužni nosači i pripadajuća sudjelujuća širina lima koja se savija zajedno s njima, a može se uzeti da je jednaka $\frac{1}{4}$ manjeg razmaka između uzdužnih i poprečnih

ukrepa; gipke su veze ostali limovi vanjske oplata, dna i palube broda. Naponi σ u krutim vezama razlikovat će se općenito od napona σ_c u gipkim vezama. Da bi se naponi mogli izračunati po uobičajenoj jednostavnoj formuli $\sigma = M/W$, treba pojedine presjeka gipkih veza reducirati tako da bude ispunjen uslov: $A_{red} \sigma = A \sigma_c$.

Ako se umjesto stvarne površine gipkih veza A uvrsti u tablicu za proračun momenta tromosti njihov reducirani presjek

$$A_{red} = \frac{\sigma_c}{\sigma} A = \varphi A,$$

dobiva se reducirani presjek broskog trupa u kojemu sve veze imaju jednaku krutost. U uzdužnom sistemu gradnje utjecaj početnog ugiba i poprečnog opterećenja povećava kritični napon ploče, ali to je teško računski uzeti u obzir pa se zanemaruje, čime se, pored toga što se pojednostavnjuje račun, povećava i sigurnost. Redukcijski koeficijent φ je prema tome jednak $\varphi = 1$ ako je

$\sigma < \sigma_{kr}$, odnosno $\varphi = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma}$ ako je $\sigma > \sigma_{kr}$. Kritični napon izvijanja za

slobodno položenu ploču iznosi prema teoriji ploča:

$$\sigma_{kr} = 800 \left(\frac{100t}{b} \right)^2,$$

u kp/cm^2 ako se debljina ploče t i razmak uzdužnih ukrepa b uvrste u formulu u cm. Redukcija se računa samo na pritisnutoj strani presjeka broskog trupa, na vlačnoj strani $\varphi = 1$, tj. sve veze nose jednoliko po cijeloj širini presjeka. Za poprečni sistem gradnje srednji normalni napon gipkih veza dobiva se iz jednadžbe:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{kr}} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{kr}} - \frac{3(1-\mu^2)}{t^2 \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right)} \left[\left(\frac{f+h}{1 + \frac{\sigma_c}{\varphi \sigma_{kr}}} \right)^2 - h^2 \right],$$

gdje je a stranica polja ploče na koju djeluju normalni naponi od uzdužnog savijanja broskog nosača, b stranica polja ploče okomita na te napone (tj. razmak između susjednih uzdužnih veza), h početni ugib, f ugib od poprečnog opterećenja za potpuno uklještenu krutu ploču, t debljina ploče, μ Poissonov koeficijent kontrakcije ($\mu = 0,3$), φ odnos kritičnih napona izvijanja potpuno uklještena i na svim rubovima slobodno položene ploče.

Ugib od poprečnog opterećenja p daje jednadžba:

$$f = k \cdot \frac{p a^4}{E t^3},$$

gdje se za koeficijent k uvrstavaju vrijednosti koje daje teorija ploča u zavisnosti od omjera a/b . Početni ugib može se za zakivane brodove odrediti po empirijskoj formuli

$$h = \frac{a}{1000t} (3,5 - t) [h, a i t \text{ u cm}];$$

za zavarene brodove on je 2 do 2,5 puta veći.

Kritični napon izvijanja za slobodno položenu ploču u poprečnom sistemu g dnje ($a/b < 1$) iznosi:

$$\sigma_{kr} = 200 \left(\frac{100t}{a} \right)^2 \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right) [\text{kp/cm}^2 \text{ za } a, t i b \text{ u cm}].$$

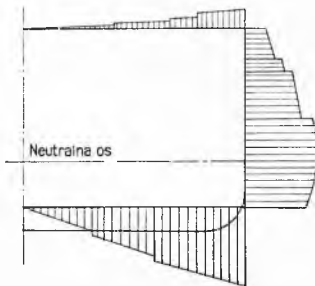
Poprečno opterećene ploče smatraju se potpuno uklještenima na rubovima, pa je za njih

$$\varphi = 4,00 - 2,81 \frac{a}{b} + 1,34 \frac{a^2}{b^2}.$$

Ako nema poprečnog opterećenja, onda je $\varphi = 1$ i $f = 0$, pa se σ_c odredi iz gornje formule u zavisnosti od σ najzgodnije na taj način da se njihova zavisnost predoči grafički. Budući da su naponi σ i σ_c međusobno zavisni, može se moment tromosti reduciranog presjeka broskog trupa naći samo pomoću postepenih aproksimacija. U prvoj aproksimaciji pretpostavi se $\varphi = 1$ (u uzdužnom sistemu gradnje) ili $\varphi = 0$ (u poprečnom sistemu gradnje), pa se izračunaju momenti tromosti i naponi na uobičajeni način. S tim naponima σ određuju se onda naponi σ_c u gipkim vezama i redukcijski faktori. Ti redukcijski faktori služe zatim za određivanje reduciranih površina uzdužnih veza s kojima se ponovo računaju normalni naponi σ . Postupak se nastavlja dok razlike između dva uzastopna približenja ne postanu manje od

5...10%. Ako se to ne postigne u drugom ili, najviše, trećem približenju, onda raspored uzdužnih veza nije ispravan, pa ga treba promijeniti.

Naponi smicanja (tangencijalni naponi) računaju se prema elementarnoj teoriji savijanja po formuli: $\tau = Q/SI\Sigma t$, gdje je Σt suma debljina svih limova koje zahvaća dotični horizontalni presjek (dvije debljine limova vanjske oplata i debljine limova svih uzdužnih pregrada). Tangencijalni naponi služe uglavnom pri dimenzioniranju spojnih sredstava uzdužnih veza (varova ili zakovicā), a njihov raspored po jednom poprečnom presjeku trupa prikazan je na sl. 17.



Sl. 17. Raspored naponā smicanja po jednom presjeku brodskog trupa

Ugibna linija brodskog trupa je krivulja koja spaja težišta pojedinih presjeka savinutog nosača. Nju treba odrediti pri proračunu uzdužne čvrstoće ako njene ordinate ne smiju preći

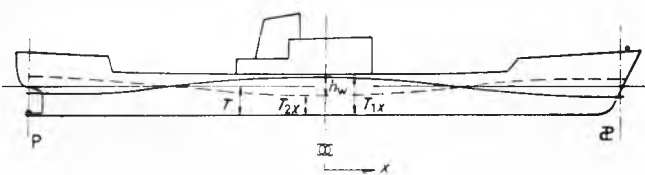
stanovitu propisanu veličinu, npr. zbog ugradnje propellerske osovine, zbog specijalnih uređaja za gađanje na ratnim brodovima, zbog održanja gaza u dopuštenim granicama pri prolazu broda kroz kanale i splavnice. Osim toga ugib izaziva drukčiju raspodjelu istisnine broda po dužini, a to znači i momenata savijanja, nego što je pretpostavljeno. Da bi se taj utjecaj mogao zanemariti, treba veličinu ugiba držati u stanovitim granicama.

Elementarna teorija savijanja nosača punog presjeka može se primijeniti i na tankostjeni nosač kakav je brodski trup, ako se umjesto stvarnih uzmu u račun reducirane površine presjeka. Prema diferencijalnoj jednadžbi elastične linije

$$\frac{d^2w}{dx^2} = -\frac{M}{EI}$$

dobiva se krivulja ugiba w dvostrukom integracijom iz M/EI . Kako je modul elastičnosti E konstantan, nanosi se u dijagram raspodjela vrijednosti M/I po dužini broda.

Momenti savijanja u horizontalnoj ravnini. Osim u vertikalnom smjeru brodski trup se savija i u horizontalnom. Horizontalne sile koje prouzrokuju momente savijanja mogu nastati i u mirnoj vodi ako se brod nagne uslijed različitih veličina horizontalnih komponentena pritiska vode na oba boka broda, ali te su sile relativno male, pa se mogu zanemariti. Veći horizontalni momenti nastaju uslijed različite visine valova na oba boka broda.



Sl. 18. Određivanje horizontalnih momenata savijanja brodskog trupa

Njihov red veličine može se dobiti promatranjem položaja broda na valu koji je jednake dužine kao brod (sl. 18). Ako su T_{2x} i T_{1x} gazovi na oba boka broda u istom poprečnom presjeku brodskog trupa i ako se brod smatra konzolom ukliještenom na sredini dužine, maksimalni je horizontalni moment savijanja na tom mjestu:

$$M_h = \int_0^{L/2} \frac{1}{2}(T_{2x}^2 - T_{1x}^2) \gamma x dx.$$

Pretpostavivši valove sinusoidnoga oblika, može se pisati:

$$T_{2x} = T - \frac{h_w}{2} \cos \frac{2\pi x}{L},$$

odnosno:

$$T_{1x} = T + \frac{h_w}{2} \cos \frac{2\pi x}{L}.$$

Uvrštenjem te vrijednosti u gornju formulu za M_h dobiva se

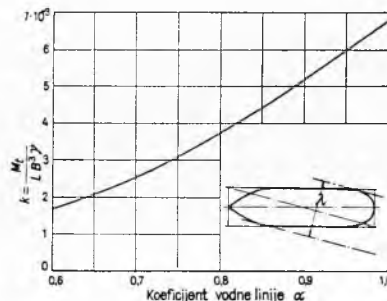
$$M_h = \frac{L^3 h_w T \gamma}{2\pi^2}.$$

Kako je položaj valova pretpostavljen na sl. 18 relativno rijedak, da bi se dobila realna slika, računa se s manjom visinom vala prema formuli $h_w = 0,1 L^{0,6}$. S tom veličinom gornja formula dobiva konačni oblik:

$$M_h = 0,005 L^{2,6} T \gamma.$$

Mjerenja na brodovima pokazala su da maksimalni momenti savijanja u horizontalnoj ravnini nastupaju kad brod plovi pod kutom od 20...50° na valove. Oni mogu iznositi i do 40% izmjenog maksimalnog vertikalnog momenta savijanja.

Torzijski momenti. Kad valovi nadolaze koso, brod je izvrgnut torzijskim momentima jer sile uzgona u pojedinim presjecima brodskog trupa ne djeluju u uzdužnoj simetralnoj ravnini, nego s jedne ili druge njezine strane. Na brod djeluju torzijski momenti i na mirnoj vodi ako se on nagne na jedan bok zbog nejednolike raspodjele momenata statičkog stabiliteta po dužini broda. Na pramčanom i krmenom dijelu broda prevladavaju uslijed oštih formi vodnih linija momenti težina (moment statičkog stabiliteta je negativan), a u sredini uslijed punijih formi prevladavaju momenti forme (moment statičkog stabiliteta je pozitivan). Treća komponenta torzijskog momenta nastaje uslijed dinamičkog djelovanja sila pri ljuljanju broda.



Sl. 19. Određivanje torzijskog momenta brodskog trupa

Abrahamsen je pronašao (1958) da je utjecaj valova na torzijske momente najveći kad oni dolaze u smjeru dijagonale paralelepipeda opisanog brodskoj formi (sl. 19) i kad je dužina vala samo malo veća od širine broda B . Za taj torzijski moment on navodi jednadžbu

$$M_t = k L B^3 \gamma,$$

gdje je k faktor zavisn od koeficijenta vodne linije α . Ova formula izvedena je pod pretpostavkom da je visina vala h jednaka jednoj desetinki njegove dužine, uzimajući u obzir Smithov efekt. Kad je izračunat torzijski moment, tangencijalni naponi koje on prouzrokuje u brodskom trupu mogu se izračunati po poznatoj formuli za torziju tankostjenog sandučastog nosača $\tau = M_t/2 A t$, gdje je $A = BH$ površina pravokutnika opisanog presjeku brodskog trupa na polovici dužine, a t debljina oplata na dotičnom mjestu. Ta formula vrijedi samo za zatvoreni presjek. Tangencijalni naponi znatno narastu na mjestima palube između grotala i uzrokuju također velike normalne napone, koji se povećavaju smanjenjem razmaka između grotala i povećanjem njihove dužine.

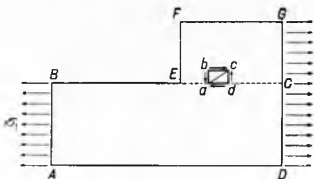
Osnovne veze brodskog trupa koje preuzimaju moment torzije jesu: vanjska oplata, oplata dna i pokrov palube. Kad je pokrov palube po njenoj cijeloj dužini od čelika i kad su dimenzije grotala manje, rijetko je potrebno ugrađivati bilo kakva ukrutenja za preuzimanje torzijskog momenta. Ipak, kad su otvori za grotla veliki, najviše napregnute veze su palubna proveza i limovi palube između proveze i uzdužne pražnice grotla, a također poprečna polja palube između grotala (ako su uska). U tim vezama javljaju se znatni normalni naponi. Poprečne pregrade, poprečni nosači i uzdužni nosači brodske konstrukcije slabo se suprotstavljaju torzijskim momentima. Na otpornost protiv torzije bitno utječu zatvorene konture u poprečnom presjeku brodskog trupa koje čine dvodno, palube, uzdužne pregrade itd. Ipak taj utjecaj nije

ni izdaleka tako velik kako bi se moglo zaključiti iz teorije torzije tankostjenih cijevi. Mjerenja na brodovima pokazala su da su za preuzimanje dodatnih napreznja uslijed torzijskih momenata obično dovoljna pojačanja na uglovima grotla koja se postavljaju za preuzimanje koncentracije napona uslijed naglog smanjenja presjeka.

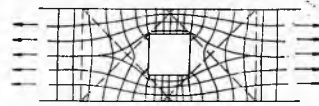
Koncentracija napona je pojava da naponi znatno porastu na mjestima gdje se naglo mijenja presjek opterećenog nosača, a u odnosu na mnogo manje napone okolnih mjesta. Koncentracije napona javljaju se na bezbroj mjesta u brodskoj konstrukciji. Svaki otvor, kao što su npr. prozori ili vrata u nosećem zidu, prouzrokuje znatno povećanje napona uz rub otvora. Najznačajnije koncentracije napona, koje mogu ugroziti ne samo mjestimičnu nego i opću čvrstoću broda, javljaju se na uglovima grotala i na krajevima dugog mosta. Pukotine nastale uslijed koncentracije napona na tim mjestima bile su uzrok da su se za vrijeme Drugoga svjetskog rata prvi serijski građeni zavareni brodovi prelomili nadvoje.

Koncentracije napona su naročito opasne na zavarenim brodovima, pa se zato na njih danas, kad se brodovi uglavnom zavaruju, obraća puna pažnja. Na elastičnijem zakovičnom spoju svaka koncentracija napona pri deformaciji spoja mogla se raspodijeliti na veći presjek i na taj način više ili manje kompenzirati. Zavareni spoj se ponaša mnogo kruće zbog zaostalih napona koji stvaraju dvoosno ili čak troosno naponsko stanje, pa su deformacije nemoguće te dolazi do pukotina koje se naglo šire sve dalje po šavu, pa na znatno oslabljenom presjeku mogu izazvati i prelom broda nadvoje. Zbog toga treba ispravnom konstrukcijom (postepenim prijelazima, npr. zaobljenjem uglova grotla), smanjiti koncentracije napona na najmanju moguću mjeru, a još preostalo povišenje napona preuzeti ugradnjom odgovarajućih pojačanja (npr. pojačanjima limova palube oko uglova grotla i ispod krajeva dugog mosta).

Na sl. 20 prikazano je opterećenje jednog ugla grotla (zbog simetrije, na ostalim uglovima slika bi bila ista). Na presjeku po liniji *EC* moraju djelovati naponi smicanja (da budu uravnoteženi odsječeni dijelovi *EFGC* i *ABCD*). Ona su najveća uz ugao grotla *E*, smanjuju se sve više po liniji *EC*, a na jednoj stanovitoj udaljenosti od grotla iščezavaju, pa se normalni naponi raspodjeljuju opet jednoliko po presjeku *DG*. Smjer djelovanja napona smicanja pokazan je na jednom diferencijalnom elementu lima palube uz ugao grotla na sl. 20. Rezultirajući naponi na

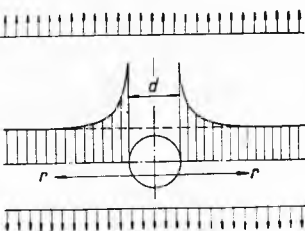


Sl. 20. Opterećenje jednog ugla grotla



Sl. 21. Naponske trajektorije kod kvadratnog izreza

tom mjestu neće dakle više teći horizontalno, nego će se zaokrenuti prema gore. Spojnica smjerova napona u svim pojedinim tačkama daje tzv. naponske trajektorije (sl.21). Njihov razmak pokazuje veličinu naponâ, koji su to veći što su trajektorije gušće.



Sl. 22. Raspored napona na presjeku kroz kružni izrez

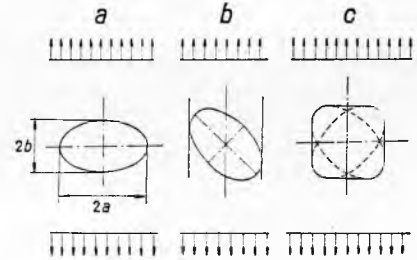
Obojica su našli za *k* vrijednost 2,5·3. Inglis (1913) je odredio vrijednost za *k* teorijski, metodama teorije elastičnosti. Za kružni izrez promjera *d* on daje ovaj izraz za raspored napona na horizontalnom presjeku kroz izrez (sl. 22):

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + \frac{d^2}{8r^2} + \frac{3}{32} \frac{d^4}{r^4} \right),$$

gdje je σ_0 jednoliki napon po presjeku dovoljno udaljenom od izreza, a *r* apscisa tačke za koju se određuje napon σ . Za maksimalni napon ($r = d/2$) daje ta formula: $\sigma = 3 \sigma_0$, dakle faktor

$k = 3$. Za elipsast izrez (sl. 23 a) $k = 1 + \frac{2a}{b}$ na krajevima ve-

like osi, odnosno, ako se uvrsti izraz $q = b^2/a$ za radijus zakrivljenosti elipse, $k = 1 + 2\sqrt{a/q}$. Što je manji omjer radijusa zakrivljenosti prema poprečnoj dimenziji to je veći faktor *k*;



Sl. 23. Različiti oblici elipsastih izreza

on postaje neizmerno velik kad je $q = 0$, pa se elipsa pretvara u pravocrtnu pukotinu. Na sl. 23 b predočena je elipsa čija velika os zatvara kut 45° sa smjerom napona. Maksimalni naponi nastaju između krajeva velike osi i dirališta tangenata paralelnih sa pravcem napona. Faktor koncentracije na mjestima dirališta tangenata dobiva se po formuli

$$k = 1 + \frac{a}{b} + \frac{b}{a},$$

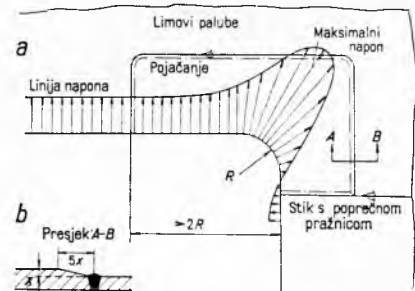
odnosno:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{a}{q}} + \sqrt{\frac{q}{a}}.$$

Ako je $a = 3b$, onda je u diralištu $k = 4,33$, a njegova maksimalna vrijednost $k_{max} = 4,66$. Sl. 23 c prikazuje četverouglasti otvor koji nastaje ako se ucrtaju dvije elipse nagnute pod 45° i odstrani materijal između horizontalnih i vertikalnih tangenata. Maksimalni naponi nastaju kao i u prijašnjem slučaju u okolini dirališta tangenata paralelnih sa pravcem napona na elipsu, a to znači na uglovima izreza. Za kvadratni izrez sa stranicom 6 m je dužina veće poluosi $a = 4,2$, pa ako uglovi imaju radijus zakrivljenosti $q = 15$ cm, onda je faktor koncentracije napona $k = 1 +$

$$+ \sqrt{\frac{4,2}{0,15}} + \sqrt{\frac{0,15}{4,2}} = 6,48.$$

Ako je grotlo zaprema polovicu širine palube, srednji je napon u oslabljenom presjeku dva puta veći od napona σ_0 po punom presjeku. Maksimalni napon je dakle 3,24 puta veći od tog srednjeg napona. Raspodjela napona na jednom



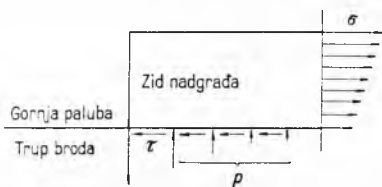
Sl. 24. Ugao grotla s raspodelom napona

uglu grotla prikazana je na sl. 24. Klehn je našao da je najpovoljniji radijus zaobljenja grotla jednak 1/10 njegove širine. Maksimalni napon leži na sredini između početka i sredine zakrivljenja.

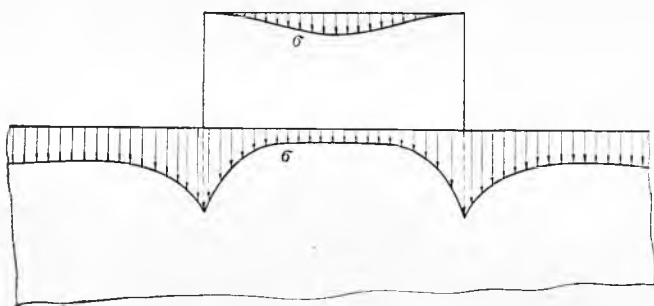
Pojačanje koje preuzima koncentracije napona na uglovima grotla mora imati veću dužinu u smjeru uzdužne nego u smjeru poprečne praznice. Kod zavarenih pojačanja važan je postepeni prijelaz (sl. 24 b). Spoj uzdužne i poprečne praznice treba pre-

mjestiti u zonu manjih napona. Naponi opadaju u poprečnoj pražnici i u poljima limova između dva grotla, pa se zato ova ni ne uzimaju u račun pri proračunu uzdužne čvrstoće.

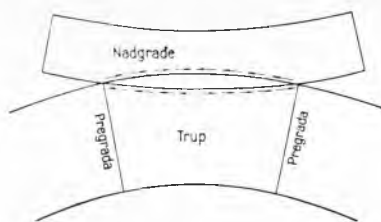
Koncentracije napona javljaju se ispod svakog nadgrađa; na krajevima dugog mosta one su najopasnije za opću čvrstoću brodskog nosača jer padaju u zonu maksimalnog momenta savijanja. Nadgrađa samo djelomično preuzimaju opterećenja od savijanja brodskog trupa, pa su ona više ili manje efikasna za uzdužnu čvrstoću



Sl. 25. Djelovanje sila na nadgrađe pri savijanju brodskog trupa



Sl. 26. Raspored napona u gornjoj palubi i palubi nadgrađa



Sl. 27. Uslijed djelovanja napona smicanja nadgrađe nastoji da se savije na suprotnu stranu nego brodski trup

broda, što uglavnom zavisi od njihove dužine. Na sl. 25 prikazano je kako se krajevi nadgrađa dovode do djelovanja pomoću napona smicanja τ , budući da krajnje pregrade nadgrađa ne mogu prenijeti normalne sile sa gornje palube na palubu nadgrađa, pa je ova zbog toga na krajevima bez napona (sl. 26). Pod djelovanjem napona smicanja τ nadgrađa će se saviti na suprotnu stranu nego brodski trup (sl. 27) i smanjiti napone u palubi nadgrađa, kako su i utvrdila mjerenja na brodovima. Zidovi nadgrađa i paluba na koje je nadgrađe učvršćeno protive se tom savijanju silama p (sl. 25) pa se nadgrađe može saviti samo toliko koliko dopušta fleksibilnost čitave konstrukcije. Uslijed pojava napona p i τ , koje uzrokuju zakretanje i nagomilavanje trajektorija napona oko krajeva nadgrađa, javljaju se na tim mjestima koncentracije napona (sl. 26). Zbog toga treba pojačati limove palube ispod krajeva dugog mosta i voditi ih još na stanovitoj dužini ispod mosta. Naprotiv, limovi palube mosta na njegovim krajevima mogu biti tanji od ostalih. Howgard je prvi pokazao (1931) da istraživanja o udjelu nadgrađa u općoj čvrstoći broda ne smiju imati za krajnji cilj samo određivanje dimenzija limova nadgrađa, nego i racionalnu podjelu materijala po cijelom presjeku brodskog trupa. Dok se ne spozna ponašanje nadgrađa u zajednici s trupom, ne može se ni odrediti njegov udio u općoj čvrstoći broda. Zbog toga je u novije vrijeme niz autora pokušao riješiti taj problem određivanjem sila koje djeluju na nadgrađa (v. sl. 25) pomoću metoda teorije elastičnosti. Iako taj rad još nije doveden do završetka, on je ipak dao osnove za dimenzioniranje nadgrađa (Caldwell 1957). Danas je za velike putničke brodove problem nadgrađa manje zaoštrjen jer se na njima mnogo primjenjuju aluminijске legure. Zbog manjeg modula elastičnosti javljaju

se u limovima od aluminijških legura uz jednake deformacije manji naponi nego u čeliku. Jaeger je pokazao (1955) da se za nadgrađa mogu upotrijebiti limovi aluminijških legura čije se dimenzije samo neznatno razlikuju od dimenzija čeličnih limova, što dovodi do velikih ušteda na težini.

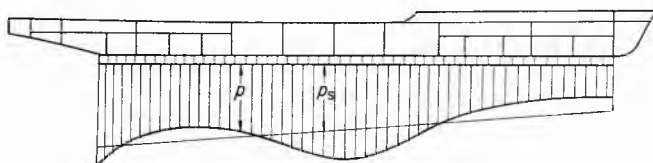
POPREČNA ČVRSTOĆA

U poprečnom smjeru brodski nosač je opterećen pritiskom vode, teretom na palubi i u skladištima, vlastitom težinom konstrukcijskih elemenata i dinamičkim silama koje nastaju uslijed inercije masa pri ljuljanju broda i uslijed udara valova. To opterećenje preuzimaju u prvom redu poprečne pregrade a zatim okviru koji se sastoje od rebrenice, rebara i sponje.

Uslijed mnogo veće krutosti, poprečne pregrade preuzimaju veći dio opterećenja nego poprečni okviru, koji su osim toga na većem dijelu svoje dužine otvoreni (grotla), pa je njihova moć nošenja efikasna samo po sredini razmaka između dvije pregrade ako je taj razmak velik, kao što je to na trgovačkim brodovima. U proračunu uzimaju se kao fiksni oslonci okviru: vanjska oplata, palube, dno i uzdužne pregrade, a kao pomični oslonci: opore i uzdužne pražnice grotla. Zanemaruje se preluk sponje i uzvoj dna, tako da se okviru sastoje samo od ravnih štapova. Za opterećenje pritiskom vode računa se visina od spojnice valnih bregova plus nagib broda od 20° . U tu svrhu se brod postavi na valni brijeđ i dol, kao u proračunu uzdužne čvrstoće, pa se potegne krivulja koja spaja valne bregove. Vlastita težina konstrukcijskih elemenata i dinamička opterećenja uslijed sila inercije i udara valova, odnosno udara o obalu kad brod pristaje uz nju, obično se ne uzimaju u obzir. Obično se pretpostavlja da su prostori unutar broda prazni, osim čvrsto ugrađenih tereta (kotlova, strojeva itd.), jer se tako dobiva nepovoljnije opterećenje. Opterećenje paluba uzima se u obzir, i na najgornjoj palubi redovito se pretpostavlja 0,5 m vodenog stupca. Proračun okviru provodi se po jednoj od poznatih metoda statike građevinskih konstrukcija. Na ratnim brodovima, gdje su razmaci pregrada mali, 90% poprečnog opterećenja preuzimaju poprečne pregrade; proračun okviru nema smisla, pa se rebra, rebrenice i sponje računaju samo kao lokalno ukrepljenje oplata. Zbog toga se za ratne brodove obično i upotrebljava uzdužni sistem gradnje. Kako je poprečna čvrstoća osigurana poprečnim pregradama, može se uzdužna čvrstoća znatno poboljšati kontinualnim uzdužnim rebrima. Uzdužna rebra ulaze u račun uzdužne čvrstoće s punim presjekom, a kontroliraju se za složeno savijanje uslijed poprečnih sila od pritiska vode i uzdužnih sila od općenitog savijanja brodskog trupa.

ČVRSTOĆA BRODA PRI DOKOVANJU

Za brodove građene po uzdužnom sistemu može dokovanje predstavljati najnepovoljniji slučaj opterećenja za hrptenicu, poprečne pregrade i okvirna rebra, pa je ono zbog toga i mjerodavno za njihovo dimenzioniranje. Kad se brod dokuje, njegovu težinu preuzimaju potklade. Zbog elastičnosti podloge i brodske konstrukcije pritisak potklada je proporcionalan ordinatama ugibne linije broda. Međutim, ugibna linija ne može se odrediti dok se ne zna opterećenje, a opterećenje je opet zavisno od ugibne linije, pa se pritisci od potklada mogu naći samo pomoću računa sukcesivnih aproksimacija. U tu se svrhu pretpostavi pravocrtna podjela pritiska, s tim da je ukupni pritisak prikazan površinom trapeza (sl. 28).



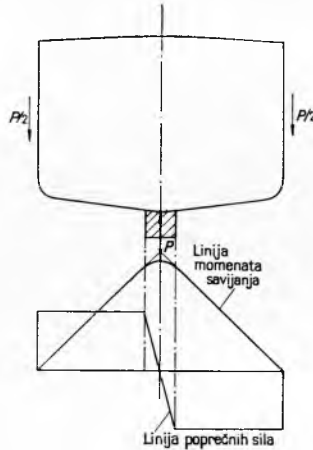
Sl. 28. Raspored pritiska od potklada prilikom dokovanja

Ta površina mora biti jednaka površini ispod linije težina (koja se nanosi analogno kao i u proračunu uzdužne čvrstoće), a težišta obiju površina moraju ležati na istoj okomici. Razlika između ordinata linija težina i pritiska daje intenzitet opterećenja, iz kojeg se četverostrukom integracijom dobije ugibna linija. Na taj način određena linija ugibanja postavlja se u mjerilu pritiska na dijagram tako da bude opet ispunjen uvjet jednakosti površina i

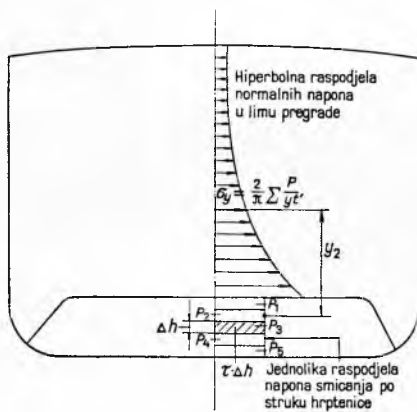
uvjet položaja težišta. Kako će se ona općenito razlikovati od pretpostavljene pravocrtne podjele pritiska, ponavlja se račun s raspodjelom pritiska određenom u prethodnom proračunu. Postupak se ponavlja sve dok razlika između linija ugibanja (pritiska) dobivenih u dva uzastopna proračuna ne bude po volji mala.

S tako određenom raspodjelom pritiska proračunava se hrptenica kao nosač na više oslonaca jednom od metoda za rješavanje statički neodređenih sistema. Kao fiksni oslonci hrptenice služe poprečne pregrade. Osim momenata savijanja treba odrediti i oslonačke reakcije jer one opterećuju poprečne pregrade. Poprečna pregrada se smatra nosačem na dva oslonca (vanjska oplata) opterećenim koncentriranom silom od pritiska potklada (sl. 29). Zapravo je taj slučaj opterećenja pretjerano nepovoljan jer dvodno raspodjeljuje koncentriranu silu potklada na veću površinu i time smanjuje njen utjecaj. Osim toga, kad je omjer dužine nosača prema njegovoj visini tako malen, više ne vrijedi zakon raspodjele napona po elementarnoj teoriji savijanja, nego tu raspodjelu treba odrediti pomoću Airyjeve naponske funkcije. Osim napona od savijanja treba još odrediti dodatne napone pritiska u vertikalnom smjeru od lokalnog djelovanja koncentrirane sile P .

Zbog jakih pojava koje čine oplata dna i oplata dvodna, za sve nosače dvodna može se smatrati da je napon smicanja jednoliko



Sl. 29. Opterećenje poprečne pregrade pri dokovanju



Sl. 30. Raspodjela sila smicanja po struku hrptenice i vertikalnih sila pritiska u limu pregrade

raspodijeljen po njihovom struku. Djelovanje sile P na pregradu može se približno odrediti ako se sila smicanja kontinualno raspodijeli po struku hrptenice u nekoliko (npr. pet) pojedinačnih sila P_1, P_2, \dots, P_5 , pa se zatim proračunaju vertikalni naponi izazvani u limu pregrade djelovanjem pojedinih sila i svi ti naponi zbroje (sl. 30). Vertikalni naponi opadaju od hvatišta sile P_i po hiperbolnom zakonu (Schnadel 1935) prema formuli:

$$\sigma_{yi} = \frac{2 P_i}{\pi y_i t_i'}$$

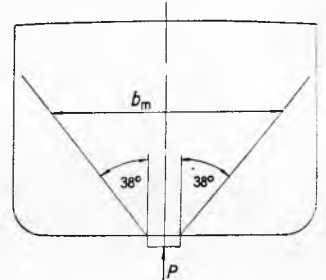
gdje je y_i udaljenost hvatišta sile P_i od mjesta na pregradi za koje se traži napon; t_i' reducirana debljina lima na tom mjestu; $t_i' = t_i + A/d$ (t_i je stvarna debljina lima, A površina, d razmak presjeka ukrepa).

Superpozicijom tako proračunatih pojedinačnih napona

$\sigma_y = \sum_{i=1}^5 \sigma_{yi}$ dobiva se tok napona kroz pregradu. Na brodovima bez dvodna prenosi se reakcija potklade direktno na lim pregrade.

Hiperbolno opadanje vertikalnih napona pritiska može se uzeti u obzir prema Schnadelu tako da se računa s korisnom širinom lima pregrade koja se linearno povećava od hvatišta sile P prema gore. Taj se linearni zakon raspodjele odredi tako da se povuku od korisne širine hrptenice pravci nagnuti pod 38° prema vertikali (sl. 31).

Za izvijanje je mjerodavan srednji napon koji se u prvom približenju može naći na osnovu linearne (umjesto hiperbolne) raspodjele napona, čime proračun daje rezultat s izvjesnim faktorom sigurnosti. Budući da je središnja ukrepa pregrade obično spojena s hrptenicom, prelazi na nju jedan dio momenata od savijanja hrptenice. Taj dio može se izračunati iz odnosa momenata tromosti presjeka hrptenice i ukrepe, pa se onda kontroliraju dimenzije ukrepe pregrade još i za te dodatne napone.



Sl. 31. Povećanje korisne širine lima s udaljenošću od hvatišta koncentrirane sile P

PRORAČUN ČVRSTOĆE POJEDINIH ELEMENATA BRODSKE KONSTRUKCIJE

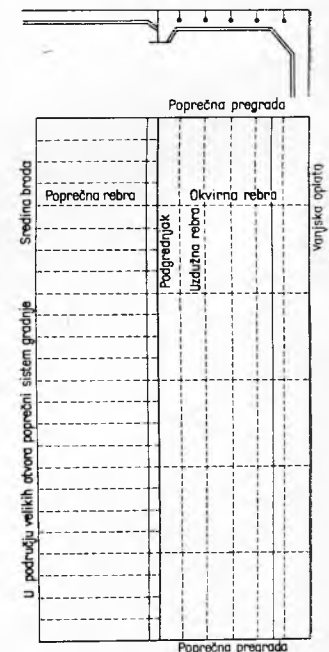
Palube i sistemi njihova podupiranja. Palube se sastoje od oplata i ukrepa. Od položaja palube u brodu i njenog značenja za njegovu uzdužnu i lokalnu čvrstoću zavise opterećenja i način rasporeda ukrepa (uzdužni, poprečni i mješoviti sistem gradnje), a prema tome i njihove dimenzije. Paluba je podvrgnuta naporima u uzdužnom smjeru, jer je ona element broskog trupa, kao nosača, koji čini njegov gornji pojas, a u vertikalnom smjeru je opterećena težinom vlastitih konstrukcijskih elemenata i teretom koji se na njoj nalazi.

Uzdužne sile u ravnini palube određuju se računom uzdužne čvrstoće broda. Glede vlačnih uzdužnih sila treba samo kontrolirati da li one proizvode napone manje od dopuštenih, a u pogledu napona pritiska treba izvršiti i kontrolu za izvijanje. Vertikalno opterećenje se obično pretpostavlja da iznosi 0,5 m vodenog stupca; vlastita težina se redovno zanemaruje. Nepropusne palube treba osim toga računati za opterećenje od pritiska vode prilikom ispitivanja nepropusnosti. Ispod većih koncentriranih tereta (npr. lokomotiva, ratnog materijala itd.) stavlja se posebna ukrepljenja. Terete koji ne djeluju neposredno na oplatu palube (npr. meso obješeno na sponje) preuzimaju sponje, a oplata ulazi u račun samo kao korisna širina lima.

Oplata se računa za složeno savijanje. Tako dobiveni naponi u uzdužnom smjeru zbrajaju se s naponima iz uzdužne čvrstoće. Naponi u poprečnom smjeru sastavljaju se s naponima u uzdužnom smjeru pomoću formule za reducirani napon. Uslijed simetričnosti konstrukcije i opterećenja, opločenje se smatra potpuno uklještenim na rubovima uz uzdužne i poprečne veze.

U poprečnom sistemu gradnje sponje se računaju kao dio poprečnoga broskog okvira. U uzdužnom sistemu gradnje uzdužna rebra se računaju za složeno savijanje kao nosači uklješteni na okvirnim rebrima i pregradama (sl. 32).

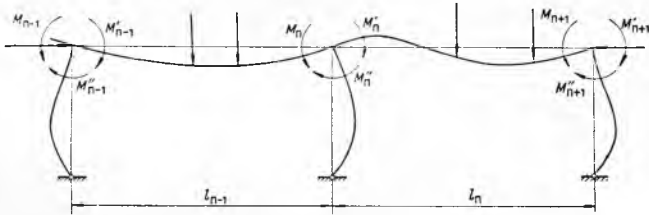
Za složeno savijanje računaju se također podgrednjaci. Oni su opterećeni u poprečnom smjeru cjelokupnim opterećenjem



Sl. 32. Konstrukcija palube po mješovitom sistemu gradnje

onog polja palube koje podupiru. U većini slučajeva dovoljno je da se onaj dio podgređnjaka koji se nalazi između dvije pregrade proračuna uz pretpostavku da su mu krajevi ukliješteni u pregrade. Ako postoje velike razlike u razmacima pregrada i ako su momenti tromosti presjeka podgređnjaka u pojedinim rasponima vrlo različiti, treba provesti proračun kao za kontinualan nosač preko bar dva polja. Često se raspon podgređnjaka između pregrada dijeli na manje dijelove postavljanjem upora. Ispravan raspored tih upora od velikog je značenja za čvrstoću podgređnjaka jer omogućuje prenošenje opterećenja na dno broda. Osim uporama, podgređnjaci su poduprti i sponjama, koje čine elastična uporišta. Zbog elastičnog podupiranja podgređnjaka može uz nepovoljno odabrani omjer raspona i momenata tromosti presjeka podgređnjaka i sponja doći u sredini raspona do prevelikih ugiba, tako da su sponje na tom mjestu jače opterećene nego kad ne bi bilo podgređnjaka. Zbog toga treba pri dimenzioniranju podgređnjaka paziti da naponi u njemu ne pređu dopuštene i da njegov ugib ne izazove dodatno opterećenje sponja.

Zbog toga što su upore čvrsto povezane s podgređnjacima, na njih se osim reaktivne sile pritiska prenosi i jedan dio momenta



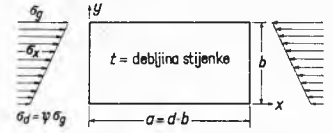
Sl. 33. Opterećenje podgređnjaka i upora

ukliještenja, koji ih napreže savijanjem (sl. 33); to se mora uzeti u obzir kad se proračunavaju naponi pritiska ili kritični naponi. Sile pritiska na upore i dio momenta ukliještenja koji one preuzimaju određuju se proračunom okvirne konstrukcije prema sl. 33. Na upore koje su spojene s podvezama ili sponjama ne prenose se momenti ukliještenja od savijanja tih nosača, pa se one računaju samo za pritisak i izvijanje. Pri proračunu upora treba uzeti u obzir i slučaj poprečnog opterećenja uslijed udara tereta prilikom ukrćavanja ili ljuljanja broda.

U konstrukciji grotla spajaju se uzdužne praznice s podvezama, a poprečne s krajnjim sponjama grotla, tako da nastaje rešetka s gredama promjenljivog momenta tromosti. Kruti oslonci te rešetke su poprečne pregrade i bokovi broda, a upore, ako postoje, tvore pomične oslonce. Rešetka je opterećena akcijama polusponja koje se podupiru na uzdužne praznice. Kad su otvori za grotla veliki (npr. na riječnim brodovima), treba provjeriti i čvrstoću palubne proveze. Ta se proveza smatra nosačem koji je potpuno ukliješten na poprečnim praznicama i savija se u ravlini palube uslijed akcija okvirnih rebara. U tom proračunu treba uzeti u obzir opterećenja okvirnih rebara prilikom pristajanja broda i udaranja o obalu. Osim čvrstoće treba ispitati i stabilnost konstrukcije palube, pa se računaju kritični naponi kako za pojedina polja oplata (kao ortotropne ploče) tako i za cjelokupno polje palube između poprečnih pregrada (kao rešetka ili izotropna ploča). Zatim još treba kontrolirati napon torzije i bočnog savijanja uzdužnih ukrepljenja. Najmanji od tih kritičnih napona mjerodavan je za stabilnost konstrukcije. Za brodove koji su izvrgnuti velikim uzdužnim silama, osobito silama pritiska (tankeri, razarači), takav proračun pokazuje da je uzdužni sistem gradnje povoljniji od poprečnog.

U području velikih otvora palube (grotla, otvora strojarnice, dimnjaka itd.), koje skoro uopće ne doprinosi uzdužnoj čvrstoći, može se upotrijebiti poprečni sistem gradnje, zbog njegove jednostavnije izvedbe (v. sl. 32). Uzdužna rebra ulaze s punim presjekom u proračun uzdužne čvrstoće i u slučaju naprezanja zatezanjem i u slučaju naprezanja pritiskom i zato treba uvijek osigurati njihov kontinuitet (npr. na prolazu kroz poprečne pregrade) i obilno ih dimenzionirati. Ako je čvrstoća uzdužnih rebara manja, smanjuje se i dopušteno opterećenje, a prema tome i opća čvrstoća broskog trupa.

Konstrukcija bokova i jednostavnog dna broda. Oplata bokova kao element čvrstoće broskog trupa napregnuta je savijanjem, jer se može smatrati njegovim strukom. Ali dok su normalni naponi od savijanja paluba i dna broda jednoliko raspodijeljeni po cijeloj njihovoj širini, normalni se naponi vanjske oplata mijenjaju po linearnom zakonu. Osim normalnih javljaju se i tangencijalni naponi, koji se dobivaju iz proračuna uzdužne čvrstoće. Proračun čvrstoće limova vanjske oplata analogan je proračunu oplata paluba, a konačno je mjerodavan poredbeni napon, koji ne smije biti veći od dopuštenog. Formule po kojima se kontrolira izvijanje limova vanjske oplata uzimaju u obzir linearnu raspodjelu normalnih i tangencijalnih napona, pa se zato razlikuju od analognih formula za kontrolu stabilnosti paluba i dna broda.



Sl. 34. Lim vanjske oplata podvrgnut normalnim naponima koji se ravnaaju po linearnom zakonu

Kad su normalni naponi linearno raspoređeni, može se napon σ_x na bilo kojoj udaljenosti y od donjeg ruba, u kojoj je napon σ_d , izraziti formulom:

$$\sigma_x = \sigma_g \left[\psi + (1 - \psi) \frac{y}{b} \right],$$

gdje je σ_g napon gornjih vlaknaca, b širina ploče, $\psi = \frac{\sigma_d}{\sigma_g}$

odnos napona donjih i gornjih vlaknaca (sl. 34). Kritični napon pri izvijanju može se odrediti prema formuli $\sigma_{kr} = k \sigma^*$, gdje je

$$\sigma^* = \frac{\pi^2 E}{3(1 - \mu^2)} \frac{t^2}{b^2}$$
 kritični napon pri izvijanju neizmjerne duge

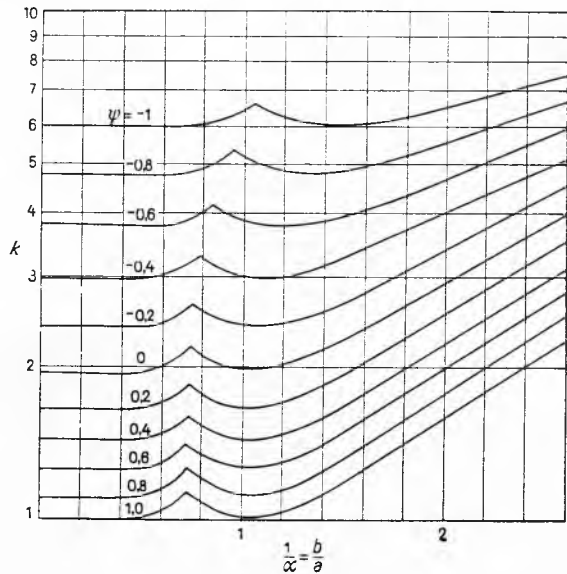
ploče, k koeficijent koji se uzima iz dijagrama na sl. 35 u zavisnosti od odnosa stranica ploče b/a i odnosa napona ψ u donjim i gornjim vlakancima. Za ploče koje su napregnute jednolikim tangencijalnim naponima može se računati kritični tangencijalni napon prema formuli:

$$\tau = k \sigma^*, \text{ gdje je}$$

$$k = 1,334/a^2 + 1, \text{ za } a = a/b \leq 1, \text{ odnosno } k = 1,334 + 1/a^2 \text{ za } a \geq 1.$$

Kad su ploče napregnute jednolikim normalnim i tangencijalnim naponima, kritični napon može se približno izračunati po formuli:

$$\left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^2 = 1 + \frac{\sigma}{\sigma_0},$$



Sl. 35. Dijagram za određivanje kritičnog napona pravokutne ploče podvrgnute ekscentričnom pritisku

gdje su τ_0 i σ_0 kritični naponi pri izvijanju za naprezanje čistim smicanjem odn. pritiskom.

Kritični napon pri izvijanju vanjske oplata zavisi od σ^* , pa kao i za oplatu paluba, tako i ovdje vrijedi da se stabilnost konstrukcije može postići s manjom težinom ugrađenog materijala ako se upotrijebi uzdužni sistem gradnje, jer je onda širina ploče b mala. Ipak se u trgovačkoj brodogradnji bokovi brodova za prijevoz suhog tereta grade po poprečnom sistemu, zbog jednostavnije konstrukcije i većeg volumena skladišta za komadni teret, a najgornja paluba i dno broda (gdje naponi pritiska postizavaju maksimalne vrijednosti) izvode se obično po uzdužnom sistemu.

Uzdužna rebra moraju teći neprekinuto, da bi se mogle uzeti u račun čvrstoće za puni presjek. Ona treba da osiguraju oplatu protiv izvijanja i da podijele oplatu u dugačka i uska polja, kako bi naponi limova u uzdužnom smjeru, uslijed bočnog pritiska vode (koji se aritmetički zbrajaju s naponima iz uzdužne čvrstoće), bili maleni. U proračunu oplata dna treba ispitati da li uzdužna rebra služe kao fiksni oslonci ili samo kao rebrasta ukrućenja ploča koje se oslanjaju na uzdužne nosače i rebrenice. Zato treba izračunati posebno ugibe uzdužnog rebra i posebno ugibe ploče pod vanjskim opterećenjima. Ako je ugib rebra 7 do 10 puta manji od ugiba ploče, može se rebro praktički smatrati fiksnim osloncem. Na razmacima između pregrada uzdužna rebra su poduprta okvirima koji osiguravaju poprečnu čvrstoću. Okviri podupiru uzdužne veze u stanovitim razmacima, da bi mogle preuzeti pritisak vode te da ne bi došlo do njihova izvijanja.

Poprečna rebra računaju se kao dio okvirne konstrukcije rebrenica-rebro-sponja. Tom okviru služe kao fiksni oslonci uzdužne pregrade, spoj paluba s bokovima broda i spoj dna s bokom na uzvoju. Uzdužni nosači kao što su hrptenice, interkostalni nosači i proveze smatraju se fiksnim osloncima samo u blizini poprečnih pregrada, inače se tretiraju kao pokretni oslonci.

Uzdužna rebra računaju se za složeno savijanje kao potpuno ukliještena na okvirnim rebrima. Bočne proveze, ako su dovoljno dimenzionirane, sačinjavaju zajedno s okvirnim rebrima rešetku koja se računa za savijanje ili složeno savijanje. Kad su manjih dimenzija, proveze se računaju kao i uzdužna rebra. Za proračun uzdužnih veza na bokovima i dnu broda služi ovaj kriterij:

$$0,2 \leq \frac{d L^3 i}{a l^3 I} \leq 5,0,$$

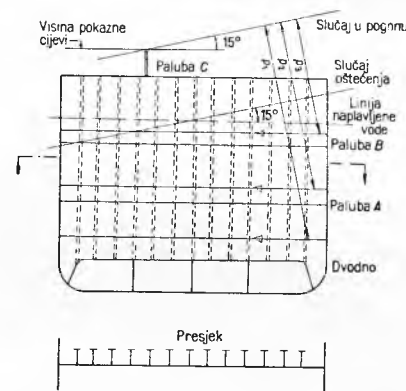
gdje je L dužina rešetke (obično razmak između poprečnih pregrada), l širina rešetke (obično razmak između bokova i uzdužnih pregrada), a razmak između glavnih (manje razmaknutih) greda (razmaci okvirnih rebra), d srednji razmak ukrštenih greda (bočne proveze, hrptenica, uzdužni nosači dna), i moment tromosti presjeka glavnih greda, I srednji moment tromosti presjeka ukrštenih greda. Ako je gornji izraz manji od 0,2, ukrštene se grede mogu smatrati fiksnim osloncima za glavne grede. Ako je taj izraz veći od 5, glavne grede služe kao fiksni oslonci ukrštenim, pa treba provesti i proračun okvirnih rebra. Okvirna rebra se smatraju krutim okvirima kojima kao fiksni oslonci služe uzdužne pregrade i čvorovi u kojima se spajaju palube i dno broda s bokovima.

Upore izjednačuju progib palube i dna broda i smatraju se pomičnim osloncima. Ako su obične konstrukcije, one su opterećene samo uzdužnom silom, a ako su koljenima povezane s okvirnim rebrima, opterećene su na svojim krajevima još dodatnim momentima. Okvirna rebra opterećena su reakcijama uzdužnih veza i pritiskom vode što ga na njih prenosi oplata. Ako uzdužne veze nose opterećenje zajedno s okvirnim rebrima kao rešetka, a upore su postavljane u velikim razmacima, proračunava se složena konstrukcija koja se sastoji od rešetkastih sistema dna i palube međusobno spojenih okvirima.

Proračun dvodna. Konstrukcija dvodna sastoji se od unutarnje i vanjske oplata, uzdužnih nosača i poprečnih nosača. U prvom približenju može se ta konstrukcija smatrati rešetkom koju čine uzdužni nosači i rebrenice. Oplata ulazi u račun samo kao korisna širina lima. Toj rešetki su fiksni oslonci poprečne pregrade (gdje se smatra potpuno ukliještenom) i bokovi broda (gdje je elastično

ukliještena ili približno zgloбно učvršćena), a opterećena je razlikom između tereta i ostalih težina (uključivši i vlastitu težinu) smještenih na dnu broda i vanjskog pritiska vode. U tom proračunu zanemaruje se torzijska krutost pojedinih nosača. Na taj način odredio je Schilling (1925) napon u konstrukcijskim elementima dvodna. Schnadel je uzelo u obzir i torzijske napone, smatrajući dvodno ortotropnom pločom, za koju je izveo diferencijalnu jednačinu i dao rješenja. Taj proračun usavršio je Schade (1937) uzvešći u obzir da hrptenice imaju jače dimenzije nego ostali nosači. Osim proračuna treba još provesti kontrolu čvrstoće oplata uslijed pritiska vode ili ulja u ćelijama dvodna. Proračun je analogan kao za nepropusne pregrade.

Nepropusne pregrade i pregrade tankova. Pri proračunavanju čvrstoće pregrada razlikuju se pregrade koje su stalno pod pritiskom, kao što su one koje ograničuju tankove za vodu ili ulje, i pregrade koje dobivaju pritisak samo u slučaju oštećenja broda. Pregrade pod stalnim pritiskom proračunavaju se redovno na osnovu elastičnih deformacija kao i ostali elementi brodskog trupa. Visina stupca vode uzima se pri tom od odušne cijevi plus 15° nagib broda. Za pregrade koje dobivaju puno opterećenje samo u slučaju oštećenja, dakle možda jedanput u životu broda, dopuštaju se plastične deformacije pod opterećenjem, jer male deformacije pri statičkom opterećenju ne smetaju ako je sačuvana nepropusnost pregrade. One se mogu proračunavati ili na osnovu elastičnih deformacija s povećanim dopuštenim naponima ili na osnovu određivanja granične moći nošenja konstrukcije, uzimajući u obzir

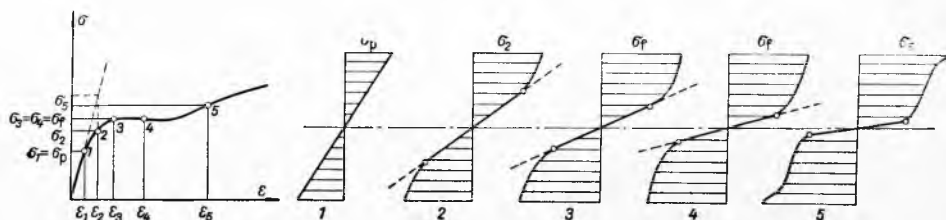


Sl. 36. Određivanje opterećenja nepropusne pregrade

plastične deformacije. Visina vodenog stupca računa se pri tom od vodne linije na kojoj plovi brod u slučaju oštećenja plus 15° nagib broda (sl. 36).

U proračunu na osnovu elastičnih deformacija računa se s ovim dopuštenim naponima σ_{dop} za redovito stanje u pogonu: za limove 2900, za ukrepe 2500, a za stanje oštećenja: za limove 3000, za ukrepe 2800 kp/cm². U proračunu na osnovu plastičnih deformacija treba odrediti granično opterećenje koje može preuzeti konstrukcija a da se ne slomi. To opterećenje mora biti najmanje jednako stvarnom opterećenju pomnoženom s koeficijentnom sigurnosti, koji se uzima 30-40% viši nego u prvom slučaju.

Kad se prekorači granica popuštanja, deformacije rastu brže nego naponi, što pri savijanju dovodi do jednoličnije raspodjele napona po presjeku, dakle i do njegove veće iskoristivosti. Raspo-

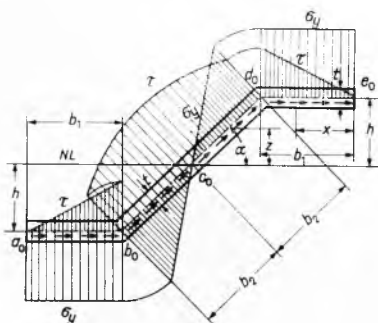


Sl. 37. Određivanje raspodjele napona po presjeku jednog nosača opterećenog na savijanje, nakon prekoračenja granice popuštanja

djela napona, a prema tome i veličina vanjskog momenta koji se može preuzeti (granično opterećenje), određuje se na osnovu poznate krivulje napon-rastezanje za dotični materijal (sl. 37) ili se pretpostavlja, obično u vidu dvaju pravaca, da bi proračun bio jednostavniji. Značenje plastičnog savijanja za proračun čvrstoće konstrukcije ne sastoji se samo u povećanju momenta savijanja nego i u povoljnijoj raspodjeli sila u statički neodređenim sistemima. Tako se, npr., na limovima nepropusnih pregrada, koje se mogu smatrati uklještenima na ukrepama, javljaju na tim mjestima, kad se prekorači granica popuštanja, tzv. plastični zglobovi (jer se konstrukcija uslijed brzog porasta deformacija ponaša kao da je na tim mjestima zglobno učvršćena), koji uvjetuju da daljnji porast opterećenja preuzimaju momenti u polju, dok se i na tom mjestu ne postigne granica popuštanja, čime je moć nošenja ploče iscrpena.

Razlikuju se dva načina konstrukcije nepropusnih pregrada: one se sastoje ili od ravne oplata s ukrepama ili od tzv. naboranih limova. Pri prvom načinu konstrukcije ukrepe se obično postavljaju vertikalno bez poprečnih nosača ako je odnos širine prema visini pregrade veći od 2. Ako je taj odnos manji od 2, korisno je ugraditi poprečne nosače da se smanji raspon vertikalnih ukrepa. Za uske i visoke pregrade pramčanog i krmenog pika dobiva se lakša konstrukcija ako se ukrepe postavljaju horizontalno. Da se postigne što manja težina, važno je i uskladiti razmak ukrepa s debljinom oplata i izabrati ispravan način spajanja ukrepa s dnom i palubama broda. Ako ukrepe nisu spojene s dnom i palubama, smatra se pri proračunu da su one zglobno položene na tim mjestima. Za postizanje uklještenja ukrepa na krajevima nije dovoljan spoj s koljenom, nego treba i konstrukciju dna ili palube na spoju s koljenom adekvatno učvrstiti. U uzdužnom sistemu gradnje prirodno je da se koljena ukrepe spajaju s uzdužnim vezama, samo je time uslovljen razmak ukrepa. Oplata se proračunava, zbog velikog odnosa stranica b/a pojedinih ploča, pod pretpostavkom cilindričnog savijanja, za traku jedinične širine opterećenu kontinualnim opterećenjem. Kako su ugibi veliki u odnosu na debljinu ploče, ne smiju se pri njihovom određivanju zanemariti vlačna naprezanja membrane. Ukrepe zajedno sa korisnom širinom lima računaju se kao nosači preko više oslonaca opterećeni trokutastim ili trapeznim opterećenjem. Kao fiksni oslonci služe platforme i palube, a kao pomični, horizontalni nosači, ako se momenti tromosti njihova presjeka i presjek vertikalnih ukrepa znatnije ne razlikuju. Proračun se onda može provesti kao i za rešetku. Kad su horizontalni nosači većih dimenzija, mogu se i oni smatrati fiksnim osloncima, čime se proračun znatno pojednostavnjuje.

Za naborane pregrade s vertikalnim borama približan proračun, koji se dobro slaže s rezultatima eksperimenata, naveo je Jaeger (1955). Ako se jedan polual borâ smatra kao greda koja se oslanja na palubu, dno broda i horizontalne ukrepe, a opterećena je hidrostatičkim pritiskom po trokutu ili trapezu, može se izračunati dijagram momenata savijanja i poprečnih sila kao i u slučaju ukrepa ravnih pregrada po Clapeyronovim jednadžbama ili kojoj



Sl. 38. Dijagram normalnih napona σ i tangencijalnih napona τ na jednom polualu naborane pregrade

drugoj metodi za rješavanje kontinualnih nosača preko više oslonaca. S tim vrijednostima računaju se normalni i tangencijalni naponi po formulama

$$\sigma_y = \frac{M_y z}{I} \quad \text{i} \quad \tau = \frac{Q S}{I l}$$

Os y prolazi po visini, a os x po širini pregrade: os z je okomita na ravninu pregrade. Dijagrami tih napona nanoseni su po jednom polualu borâ na sl. 38. Geometrijske karakteristike jednog poluala borâ daju ove formule:

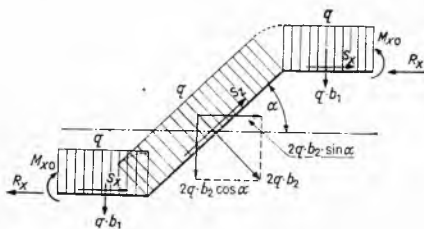
$$\text{Površina presjeka: } A = 2 t (b_1 + b_2).$$

$$\text{Statički moment za neutralnu liniju: } S = h t \left(b_1 + \frac{b_2}{2} \right).$$

Moment tromosti presjeka s obzirom na neutralnu liniju:

$$I = 2 h^2 t \left(b_1 + \frac{b_2}{3} \right).$$

Djelovanje susjednih dijelova na odijeljeni dio borâ može se zamijeniti normalnim silama R_x i momentima uklještenja M_x na



Sl. 39. Sile koje djeluju u ravnini presjeka jednog poluala bore

presječenim dijelovima, koji uvjetuju dodatne napone σ_x u naboranom limu (sl. 39). Iz uvjeta ravnoteže jednog poluala borâ jedinične visine dobiva se:

$$R_x = S_x + S_z \frac{\cos \alpha}{2} + b_2 q \sin \alpha,$$

$$S_z \sin \alpha = Q_1 = 2 q (b_1 + b_2 \cos \alpha),$$

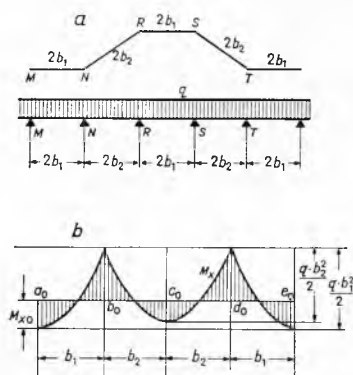
gdje su S_x i S_z rezultante tangencijalnih napona po dužini stranice b_1 , odnosno $2 b_2$. Prema tome je:

$$S_x = \frac{1}{3} \tau b_1 = \frac{Q_1 h t b_1^2}{2 I}.$$

Moment M_{x0} može se odrediti iz uvjeta simetrije (kutovi zaokreta u krajnjim presjecima jednog poluala borâ moraju biti jednaki nuli) kao:

$$M_{x0} = \frac{q}{6} \cdot (b_1^2 + 2 b_1 b_2 - 2 b_2^2).$$

Raspodjela momenata M_x po širini pregrade nalazi se promatrajući horizontalnu traku jedinične širine kao kontinuiranu gredu preko više oslonaca, pri čemu te oslonce čine valovi naboranog

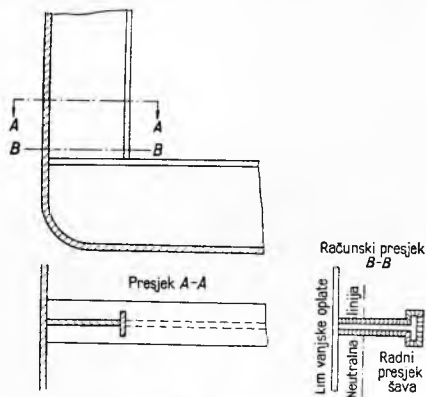


Sl. 40. Raspodjela po širini pregrade: a opterećenja q , b momenta savijanja M_x

lima (sl. 40). Osim čvrstoće potrebno je ispitati i stabilnost konstrukcije pregrade. Za pritisnuti pojas pruge lima računa se kritični napon kao za ploču elastično uklještenu na rubovima.

Sredstva spajanja. Sa stanovišta proračuna čvrstoće zavarenih spojeva u brodogradnji se razlikuju ovi tipovi tih spojeva: a) šavovi koji spajaju pojas profila sa strukom, b) čeonii šavovi po cijelome opsegu (npr. sučeljci vanjske oplata), c) čeonii šavovi

samo po jednom dijelu presjeka (npr. sučeljci pojasa nosača), d) bočni šavovi samo po jednom dijelu opsega (npr. spoj uzdužnih rebara s nepropusnim pregradama), e) bočni šavovi po cijelome opsegu (npr. učvršćenje upora). Šavovi koji spajaju pojedine elemente profila (u tu grupu spadaju i šavovi vanjske oplata, pokrova palube i dna broda) napregnuti su smicanjem. Kad se spajaju rebra



Sl. 41. Spoj rebra s rebrenicom jednog riječnog broda

ili sponje s vanjskom oplatom, pojedini presjeci tih nosača po šavovima obično imaju i jedan neprekinuti dio, tj. lim oplata, tako da se proračunski presjek sastoji samo djelomično od zavarenog šava (sl. 41). U proračun ulazi cijeli presjek ako šavovi u neprekinutom limu vanjske oplata leže dovoljno daleko od promatranog šava, s time da se dobiveni naponi usporede s dopuštenim naponima posebno za zavareni šav, a posebno za kontinualni materijal konstrukcije.

J. Uršić

VIBRACIJE BRODSKOG TRUPA

Sile proizvedene rotacijom propelera, a isto tako i neuravnotežene sile glavnih i pomoćnih brodskih strojeva, mogu izazvati periodske deformacije brodske konstrukcije, koje se nazivaju vibracijama brodske trupa. Umjerene vibracije trupa mogu biti neprijatne putnicima i posadi, a mogu dovesti u pitanje i ispravno funkcioniranje preciznih i osjetljivih brodskih uređaja i instrumenata. Vrlo žestoke vibracije postaju, s jedne strane, za čovjeka fiziološki nepodnošljive, a s druge strane mogu prouzročiti lokalne lomove na brodskoj konstrukciji ili opremi.

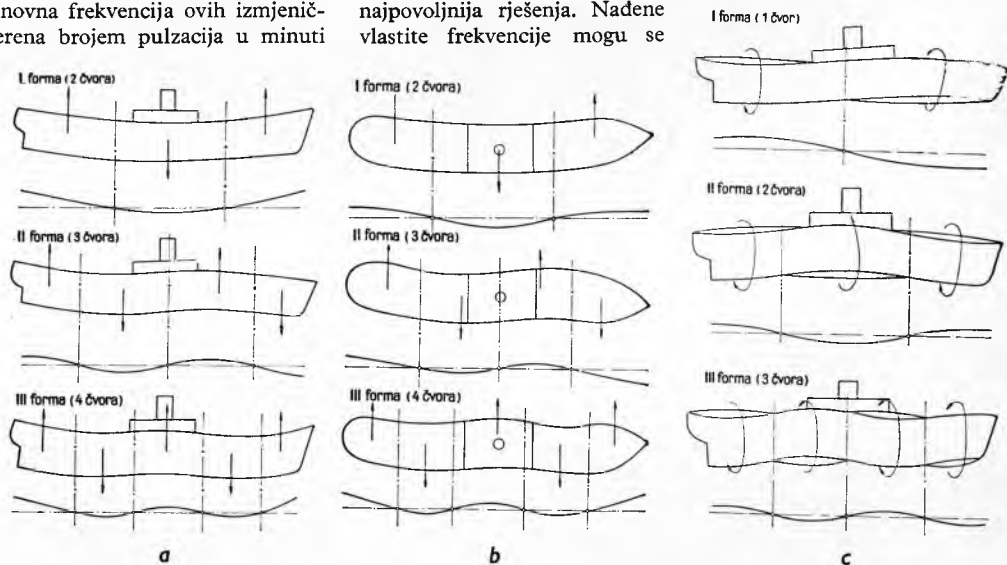
Uzročnici vibracija trupa broda. S razloga što krila propelera za vrijeme rotacije stvaraju u svojoj bližjoj okolini polje povećanog pritiska koje i samo rotira, kao i zbog činjenice da krila rade u nehomogenom sustrujanju, nastaju izmjenične hidrodinamičke sile. Te sile prenose se na trup bilo neposredno, u obliku varijabilnog pritiska vode, bilo posredno, preko reakcija u statvenoj cijevi i ležajima propelerske osovine. Osnovna frekvencija ovih izmjeničnih sila (krilna frekvencija), mjerena brojem pulzacija u minuti (f_k), jednaka je umnošku broja krila propelera (z) i broja okretaja u minuti (n) propelerske osovine ($f_k = z n$). Već pri projektiranju se mora voditi računa o intenzitetu ovih sila na taj način da se boljim oblikovanjem krmnog dijela trupa i bolje konstruiranim privjescima što više smanji nehomogenost sustrujanja u ravni propelera, kao i da se dovoljno velikim razmacima između krila propelera i susjednih dijelova trupa, statve i kormila, oslabi varijabilni pritisak vode na te dijelove i tako smanji direktan prenos periodskih hidrodinamičkih sila na trup.

Neuravnotežene periodske sile glavnih i pomoćnih strojeva,

kao i neuravnoteženost masa osovinog voda i propelera, predstavljaju drugu grupu izazivača vibracija trupa. Na njihov intenzitet je moguće utjecati boljim uravnoteženjem strojeva. U slučaju klipnih motora ta uravnoteženost zavisi od izbora tipa motora, od broja cilindara, redosljeda paljenja, ugradnje protivutega na radilici itd. Posebno treba voditi računa o uravnoteženju mase propelera, kao i o jednakosti uspona njegovih krila.

Vrste brodskih vibracija. Brodski trup je elastična prostorna rešetka čija elastičnost i težina variraju od presjeka do presjeka, i to na način koji u stanovitaj mjeri zavisi od tipa i stanja opterećenosti. Kao i puni nosači promjenljivog presjeka, tako i brodski trup može vibrirati na bezbroj načina, pri čemu svakom obliku titranja odgovara određena vlastita frekvencija. Vlastite ili slobodne vibracije brodske trupa mogu biti vertikalne, horizontalne ili torzijske, već prema tome da li su vibracijski pomaci trupa horizontalni, ili vertikalni, ili se pak radi o uvijanju trupa oko uzdužne brodske osi. Ako je trup izvrgnut periodskim uzbuđnim silama čija je frekvencija jednaka jednoj od vlastitih frekvencija trupa, doći će do rezonantnih vibracija vrlo velikih amplituda. Vjerojatnost pojave rezonantnih vibracija trupa je prilično velika, s jedne strane zbog velikog broja pojasa vlastitih frekvencija (svaka od vlastitih frekvencija može imati različite numeričke vrijednosti s obzirom na opterećenje broda), a s druge strane zbog čitavog niza pomeračajnih frekvencija koje proizlaze iz promjenljive brzine propelera i nesinusoidnog karaktera većine uzbuđnih sila. Srećom nisu sve rezonancije opasne ni dostižive, pa se u praksi nastoje izbjeći samo niže rezonantne frekvencije. Gdje je to moguće nastoji se da rezonancije sa nižim vlastitim frekvencijama trupa padnu u područje dovoljno ispod normalne brzine pogonskog stroja ili propelera. Na taj način isključuje se mogućnost da se rezonancije izazvane višim harmoničnim članovima uzbuđnih sila pojave u normalnom području brzina. Osim rezonantnih vibracija trupa kao kontinuiranog rešetkastog nosača, javljaju se na brodu i lokalne vibracije, tj. vibracije više ili manje samostalnih objekata i dijelova broda, kao mosnih konstrukcija, jarbola, dijelova oplata i sl., koji nisu integralni dio rešetke trupa. Svi ti dijelovi imaju, razumljivo, svoje vlastite frekvencije i mogu doći u rezonanciju sa vibracijama osnovnog dijela trupa, za koji su na određeni način vezane. Sa praktičnog stanovišta bilo bi potpuno neracionalno izračunati sve lokalne vlastite frekvencije na brodu, s tim prije što je lokalnim zahvatima, najčešće ukrućenjima, relativno lako izbjeći rezonantne lokalne vibracije pojedinih manjih objekata. Oblici titranja trupa nazivaju se jednočvornim, dvočvornim, tročvornim itd. prema broju čvorova, tj. mjesta na trupu koja praktički ne vibriraju (sl. 1 a, b, c).

Određivanje vlastitih frekvencija trupa. S obzirom na vrlo slabe, gotovo nikakve mogućnosti promjene vlastitih frekvencija trupa završenog, kompletiranog broda, prijeko je potrebno da se još u fazi projektiranja proračunaju ili bar ocijenjene najvažnije kritične frekvencije brodske trupa, te da se izmjenama na projektu potraže najpovoljnija rješenja. Nadene vlastite frekvencije mogu se



Sl. 1. Vibracije brodske trupa. a) Fleksijske vertikalne vibracije, b) fleksijske horizontalne vibracije, c) torzijske vibracije