SVEUČILIŠTE U ZAGREBU FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

OCJENJIVANJE ZAMORA BRODSKIH KONSTRUKCIJA

MAGISTARSKI RAD

BRANKO BLAGOJEVIĆ

ZAGREB, 2000.

SADRŽAJ:

	PREDO	GOVOR	i
	SAŽET	AK	ii
	SUMM	ARY	ii
	POPIS	KORIŠTENIH OZNAKA	vii
	KRATI	СЕ	xiv
1	UVOD		1
	1.1 Po	vijesni pregled	17
2	ZAMO	R BRODSKIH KONSTRUKCIJA	
	2.1 Me	hanizam umaranja materijala	19
	2.2 Pos	stupci proračuna zamora brodskih konstrukcija	21
	2.2.1	Spektralni postupak proračuna zamora	21
	2.2.1.	1 Modeliranje morskih valova	
	2.2.1.	2 Spektri energije valova	
	2.2.1.	3 Proračun valnih opterećenja	
	2.2.1.	4 Određivanje odziva konstrukcije	
	2.2.1.	5 Određivanje dinamičke izdržljivosti konstrukcije	
	2.2.1.	6 Proračun zamornog oštećenja	
	2.2.2	Pojednostavljeni (deterministički) postupak proračuna zamora	
	2.2.3	Analiza u vremenskom području	
	2.3 Op	terećenja brodske konstrukcije u procjeni zamora	
	2.4 Na	prezanja u procjeni zamora	
	2.4.1	Nazivno naprezanje	
	2.4.2	Žarišno (hot-spot) naprezanje	
	2.4.3	Vršno (notch) naprezanje	40
	2.4.4	Faktori koncentracije naprezanja	41

	2.5 Pro	jektne S–N krivulje (Wöhlerove krivulje)	42
	251	HSE S_N krivulie	13
	2.5.1	IIW S_N krivuje	
	2.3.2		
	2.6 Utj	ecajni parametri zamora	45
	2.6.1	Utjecaj oblika spektra naprezanja	46
	2.6.2	Utjecaj srednjeg naprezanja	47
	2.6.3	Utjecaj morske okoline (korozija)	48
	2.6.4	Ostali utjecajni parametri zamora	
	2.6.4.	l Utjecaj izrade	48
	2.6.4.2	2 Utjecaj materijala	49
	2.6.4.	3 Utjecaj zaostalih naprezanja	49
	2.6.4.4	4 Utjecaj debljine	49
	2.7 Ana	aliza pouzdanosti zamorne čvrstoće	50
2	DOSTU		20
3	PUSIU	PCI ZA UCJENU ZAMUKA	
	3.1 Op	čenito	
	3.2 Pos	tupak proračuna zamora Bureau Veritasa (BV)	41
	321	Onćenito	42
	3.2.1	Opteraćanja brodske konstrukcije	+2
	3.2.2	Optereenja brodske konstrukerje	13
	3.2.2.	1 Određivanje opterećenja	
	5.2.2.	1 Određivanje opterećenja 2 Slučajevi opterećenja	43 43 43
	323	 Određivanje opterećenja Slučajevi opterećenja Dugoročna raspodjela naprezanja 	43 43 45 45
	3.2.3	 Određivanje opterećenja Slučajevi opterećenja Dugoročna raspodjela naprezanja Određivanje nazivnog naprezanja 	43 43 45 47 49
	3.2.3 3.2.3. 3.2.3	 Određivanje opterećenja Slučajevi opterećenja Dugoročna raspodjela naprezanja Određivanje nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja 	43 43 45 47 49 49
	3.2.3 3.2.3. 3.2.3.2 3.2.4	 Određivanje opterećenja Slučajevi opterećenja Dugoročna raspodjela naprezanja Određivanje nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Izbor S–N krivulje 	43 43 45 47 47 49 49 50
	3.2.3 3.2.3. 3.2.3. 3.2.4 3.2.4	 Određivanje opterećenja Slučajevi opterećenja Dugoročna raspodjela naprezanja Određivanje nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Izbor S–N krivulje Vierojatnost oštećenja 	43 43 45 45 47 49 49 49 50 51
	3.2.3 3.2.3. 3.2.3. 3.2.4 3.2.4. 3.2.4.	 Određivanje opterećenja Slučajevi opterećenja Dugoročna raspodjela naprezanja Određivanje nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Izbor S–N krivulje Vjerojatnost oštećenja Utiecaj zaostalih naprezanja 	43 43 45 45 47 49 49 50 51
	3.2.3 3.2.3. 3.2.3. 3.2.4 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4.	 Određivanje opterećenja Slučajevi opterećenja Dugoročna raspodjela naprezanja Određivanje nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Izbor S–N krivulje Vjerojatnost oštećenja Utjecaj zaostalih naprezanja Utjecaj tlačnih naprezanja 	43 43 45 47 47 49 49 50 51 51
	3.2.3 3.2.3. 3.2.3. 3.2.4 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4.	 Određivanje opterećenja Slučajevi opterećenja Dugoročna raspodjela naprezanja Određivanje nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Vjerojatnost oštećenja Utjecaj zaostalih naprezanja Utjecaj tlačnih naprezanja Utjecaj izrade 	43 43 45 47 49 49 49 49 50 51 51
	3.2.3 3.2.3. 3.2.3. 3.2.4 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4.	 Određivanje opterećenja Slučajevi opterećenja Dugoročna raspodjela naprezanja Određivanje nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Vjerojatnost oštećenja Utjecaj zaostalih naprezanja Utjecaj tlačnih naprezanja Utjecaj izrade Utjecaj izrade 	43 43 45 47 49 49 49 50 51 51 51 51 51 51
	3.2.3 3.2.3. 3.2.3. 3.2.4 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4.	 Određivanje opterećenja Slučajevi opterećenja Dugoročna raspodjela naprezanja Određivanje nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Vjerojatnost oštećenja Utjecaj zaostalih naprezanja Utjecaj tlačnih naprezanja Utjecaj izrade Utjecaj materijala Utjecaj materijala 	43 43 45 47 47 49 50 51 51 51 51 51 52 52
	3.2.3 3.2.3. 3.2.3. 3.2.4 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4.	 Određivanje opterećenja Slučajevi opterećenja Dugoročna raspodjela naprezanja Određivanje nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Određivanje raspona nazivnog naprezanja Vjerojatnost oštećenja Vjerojatnost oštećenja Utjecaj zaostalih naprezanja Utjecaj tlačnih naprezanja Utjecaj izrade Utjecaj materijala Utjecaj morske okoline – korozija 	43 43 45 47 47 49 49 49 50 51 51 51 51 51 52 52 52
	3.2.3 3.2.3. 3.2.3. 3.2.4 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.4. 3.2.5	 Određivanje opterećenja	43 43 45 47 49 49 49 49 50 51 51 51 51 51 52 52 52 52 52 52 53
	3.2.3 3.2.3. 3.2.3. 3.2.4. 3.2.5. 3.2.6	 Određivanje opterećenja	43 43 45 47 49 49 49 50 51 51 51 51 51 51 52 52 52 52 52 53 53

	3.3 Po	stupak Germanischer Lloyda (GL)	55
	3.3.1	Općenito	
	3.3.2	Zamorna opterećenja	
	3.3.3	Određivanje dinamičke izdržljivosti	
	3.3.4	Projektne S–N krivulje i kategorije detalja	
	3.3.4	1 Utjecaj materijala – $f_{\rm m}$	
	3.3.4	2 Utjecaj srednjeg naprezanja – f_R	
	3.3.4	3 Utjecaj oblika zavara $-f_w$	60
	3.3.5	Procjena zamora spojeva na osnovu lokalnih naprezanja	60
	3.4 Po	stupak Lloyd's Register of Shipping (LR)	61
	3.4.1	Procjena zamora – razina 1	62
	3.4.2	Razine 2 i 3 FDA procedure	63
	3.4.2	1 Razina 2 FDA procedure	65
	3.4.2	2 Razina 3 FDA procedure	66
	3.4.3	Kriteriji prihvatljivosti projekta obzirom na zamor	66
	3.4.4	Jedinstveni pristup određivanju zamorne čvrstoće	67
2	4.1 Pro	pračun postupkom Bureau Veritasa	72
	4.1.1	Slučaj opterećenja 12 – lokacija 1	73
	4.1.1	1 Proračun opterećenja	73
	4.1.1	2 Proračun naprezanja	74
	4.1.1	3 Određivanje raspona naprezanja	75
	4.1.1	4 Proračun kumulativnog omjera oštećenja	77
	4.1.2	Ukupni kumulativni omjer oštećenja	78
	4.1.3	Zamorna pouzdanost	79
2	4.2 Pri	mjer proračuna zamornog oštećenja postupkom GL-a	80
	4.2.1	Proračun zamornog oštećenja za potpuno nakrcan brod – lokacija 2	
	4.2.1	1 Proračun opterećenja	80
	4.2.1	2 Proračun naprezanja	
	4.2.1	3 Izbor S–N krivulje	
	4.2.1	4 Određivanje omjera zamornog oštećenja <i>D</i>	
	4.2.1	5 Ukupno zamorno oštećenje	
4	4.3 Pro	oračun zamora programom ShipRight FDA (LR)	

5	AN	NALIZA UTJECAJNIH PARAMETARA	96
	5.1	Usporedba rezultata proračuna zamora	96
	5.1.	.1 Rezultati proračuna zamora tankera	96
	5.1.	.2 Rezultati proračuna zamora broda za rasute terete	97
	5.2	Utjecaj oblika razdiobe naprezanja	98
	5.2.	2.1 Faktori senzitivnosti	101
	5.2.	2.2 Weibullova razdioba	102
	5.3	Utjecaj morske okoline (korozija)	104
	5.4	Utjecaj izrade (tolerancije)	105
	5.5	Utjecaj izbora S–N krivulje	107
	5.6	Utjecaj kombinacije globalnog i lokalnog opterećenja	109
	5.6.	5.1 Faktori senzitivnosti kod kombiniranja opterećenja	110
	5.7	Moguća poboljšanja detalja brodske konstrukcije	111
6	ZA	AKLJUČAK	114
	LIT	TARATURA	116
	PRI	RILOZI	119
	ŽIV	VOTOPIS	131

SAŽETAK

U ovom radu uspoređeni su tipični postupci procjene zamorne čvrstoće brodske konstrukcije, s pristupom preko nazivnog, žarišnog i vršnog naprezanja uz upotrebu S–N krivulja. Usporedba postupaka provedena je na primjeru tankera s dvostrukom oplatom za nekoliko kritičnih lokacija spojeva uzdužnjaka boka i dna broda s poprečnim elementima brodske konstrukcije, a analiza parametara provedena je još i na jednom brodu za rasute terete. U radu su analizirani svi važni parametri koji utječu na veličinu zamornog oštećenja – parametar oblika Weibullove razdiobe naprezanja, utjecaj korozije, tolerancije izrade, pripadajuća S–N krivulja, te kombinacija lokalnih i globalnih opterećenja. Analiza je pokazala veliku osjetljivost zamornog oštećenja na male promjene parametra oblika razdiobe naprezanja, te veliki utjecaj korozije i tolerancija izrade, dok izbor S–N krivulja ima manji utjecaj na vrijednost zamornog oštećenja. Najveći problem razvoju jedinstvene pojednostavljene procedure za procjenu zamora predstavlja određivanje opterećenja, a posebno djelovanje vanjskog tlaka koji predstavlja najznačajniji dio zamornog opterećenja uzdužnjaka bokova broda.

SUMMARY

In this thesis a few typical procedures for fatigue strength assessment of ship structures have been compared, with approaches through nominal, hot spot and notch stress and use of S–N curves. Comparison of procedures has been performed on an example of a double hull tanker for a few critical locations at connections of side and bottom longitudinals with the transverse structure. Analysis of parameters has also been performed on one bulk carrier. All relevant parameters which influence determination of fatigue damage, have been analyzed – shape parameter of Weibull stress distribution, corrosion, tolerances, choice of S–N curves and combination of local and global loads. Analysis has showed great sensitivity of fatigue damage to small changes of Weibull shape parameter, and as well as great influence of corrosion and tolerances, while the choice of S–N curves has only a minor influence on fatigue damage. Important obstacle for development of a unified simplified procedure for fatigue assessment is fatigue design load which is the most difficult to unify, especially the distribution of external sea pressure which is the most important part of fatigue load on side longitudinals.

Popis korištenih oznaka

a	– dulja stranica ortotropne ploče, m
	– parametar u jonswap formuli
	– veličina pukotine kod loma, mm
	– visina bulb profila, cm
$a_{\rm v}$	– koeficijent ubrzanja
a _x	– bezdimenzijska vrijednost ubrzanja (prema ubrzanju sile teže g) u smjeru osi x
ay	– bezdimenzijska vrijednost ubrzanja (prema ubrzanju sile teže g) u smjeru osi y
Α	– parametar u Bretchneiderovom spektru, m ² /s ⁴
	– površina poprečnog presjeka, mm ²
$A_{\rm p}$	– površina poprečnog presjeka bulb profila, cm ²
$A_{\rm s}$	– efektivna smična površina, mm ²
b	– kraća stranica ortotropne ploče, m
b	– širina tanka mjerena pri vrhu, m
b_1	– širina najgornje neprekinute palube na $0.8L$ od krmene okomice, m
b_2	– širina vodne linije na 0.8L od krmene okomice, m
В	– parametar u Bretschneiderovoj formuli za spektar energije valova, s ⁻⁴
	– širina broda, m
$B_{\rm d}(x)$	– širina palube, m
Bi	– slučajna varijabla koja modelira sve neizvjesnosti kod određivanja opterećenja
\overline{B}	– srednja vrijednost B _i
С	- konstanta S-N krivulje ovisna o materijalu i tipu zavara, tipu opterećenja,
	žarišnoj konfiguraciji i okolnim uvjetima
C_{1-6}	 utjecajni koeficijent kod definiranja zamornog opterećenja po LR
C_{50}	– srednja vrijednost log C
C_{b}	– koeficijent istisnine
C_{F}	– koeficijent ovisan o uzdužnom položaju elementa konstrukcije (tablica registra)
$C_{\rm L}$	– uzdužni koeficijent
$C_{\rm p}$	– vrijednost konstante C za vjerojatnost oštećenja p
$C_{ m w}$	– koeficijent ovisan o valovima
C_{warp}	– faktor vitoperenja
d	 konstruktivni gaz broda (do ljetne teretne vodne linije), m
d(x,z)	– visina vode na palubi, m
d_{a}	– udaljenost od vrha zračnog ventila do vrha tanka, m
da/dN	– rast zamorne pukotine
$d_{ m c}$	 – udaljenost od točke opterećenja do vrha odjeljka, m
$d_{ m o}$	– referentna visina opterećenja, m
D	 – indeks akumuliranog zamornog oštećenja (kumulativni omjer oštećenja)
D_0	 kumulativni omjer oštećenja nakrcanog broda
D_0	– kumulativni omjer oštećenja broda u balastu

$D_{ m f}$	– slučajna varijabla koja opisuje neizvjesnosti kod Palmgren–Minerovog pravila
$\overline{D}_{ m f}$	– srednja vrijednost slučajne varijable $D_{\rm f}$
е	– ekscentricitet, mm
ea	– udaljenost promatrane točke od neutralne linije panela. cm
ex	– udaljenost od dna bulb profila do neutralne linije, cm
Ε	$-$ modul elastičnosti za čelik, $2.1 \cdot 10^5$ N/mm ²
$E(\Delta\sigma^m)$	– očekivana vrijednost (statističko očekivanje) od $\Delta \sigma^{m}$
E[D]	– očekivano oštećenje
f	– prosječna valna frekvencija, Hz
f_1	– faktor materijala za obični brodograđevnih čelik po GL
$f_{1,2,3}(x)$	– funkcije za određivanje momenta savijanja na položaju x po duljini uzdužnjaka
	za određeni tip opterećenja
$f_{ m i}$	 – faktor važnosti konstrukcijskog elementa po GL
$f_{ m m}$	– faktor utjecaja materijala po GL
$f_{\rm n}$	- faktor s obzirom na spektar naprezanja i broj ciklusa za proračun dopuštenog
	raspona naprezanja po GL
f_{R}	– faktor utjecaja srednjeg naprezanja po GL
$f_{ m s}$	 – dodatni faktor za analizu naprezanja u konstrukciji po GL
$f_{ m w}$	– faktor utjecaja oblika zavara po GL
F	– aksijalna sila, N
8	– gravitacijsko ubrzanje, 9.81 m/s ²
g(X)	 – funkcija graničnog stanja kod proračuna pouzdanosti
GM	– metacentarska visina, m
$\overline{H}_{1/3}$	– značajnu valnu visinu, m
h	– opterećenje teretom (unutrašnje opterećenje od tlaka tereta u tankovima), kN/m^2
h_1	– udaljenost središta opterećenja od vrha tanka, m
$h_{\rm d,max}$	– maksimalni tlak tereta, kN/m ²
$h_{ m d,min}$	– minimalni tlak tereta, kN/m ²
$h_{ m o}$	– opterećenje d_0 ili 10 p_0 (koji je veći), kN/m ²
$h_{ m s}$	- statički tlak tereta, kN/m ²
Н	– visina broda, m
$i_{\rm a}$ $(i_{\rm b})$	– jedinična krutost duljih (kraćih) ukrepa ortotropne ploče, m ³
Ι	– moment tromosti, m ⁴
Ii	– moment tromosti uzdužnjaka (uključivo i sunosiva širina), mm ⁴
$I_{\rm na}\left(I_{\rm nb}\right)$	– moment tromosti duljih (kraćih) ukrepa uključujući i nosivu širinu pojasa, mm ⁴
Ip	- moment tromosti bulb profila, cm ⁴
$I_{\rm pa}\left(I_{\rm pb}\right)$	– moment tromosti nosive širine duljih (kraćih) ukrepa za poprečnu os kroz
_	težište, m ⁴
k	– parametar oblika Weibullove razdiobe
<i>k</i> _p	 koeticijent koji ovisi o vjerojatnosti oštećenja
K	– faktor intenziteta naprezanja

	 koeficijent iz Schade–ovih dijagrama
ΔK	– raspon faktora intenziteta naprezanja
K _{Bi}	– faktor tipa opterećenja
K_{f}	 – zamorni faktor zareza koji uključuje utjecaj geometrije zavara
Ks	– geometrijski faktor koncentracije naprezanja = σ_s / σ_n
$K_{\rm s,tol}$	– korigirani geometrijski faktor koncentracije naprezanja za utjecaj tolerancija
Kt	– teoretski faktor koncentracije naprezanja $= \sigma_k / \sigma_n$
$K_{ m w}$	– faktor koncentracije naprezanja koji uračunava utjecaj zavara = σ_k / σ_s
l	– ukupni broj blokova spektra raspona naprezanja za zbrajanje
$l_{ m c}$	– duljina odjeljka, m
$l_{ m i}$	– raspon uzdužnjaka = razmak poprečnih okvira, mm
L	– konstruktivna duljina broda (na ljetnoj teretnoj vodnoj liniji), m
Loa	– duljina preko svega, m
$L_{ m pp}$	– duljina između okomica, m
т	– obrnuti nagib S–N krivulje
Δm	– promjena nagiba između gornjeg i donjeg segmenta S–N krivulje
m_0	– obrnuti nagib u području <i>N</i> ≤5·10 ⁶
$m_{ m H}$	– dodatna masa vode jednog odsječka broda, Ns ² /m ²
m _n	– spektralni moment n–tog reda, m ² /s ⁿ
m _s	– masa odsječka po jedinici duljine, kg/m
М	– faktor distribucije (slika 3.1)
	– moment savijanja, Nm
$M_{ m BF}$	– dodatni moment savijanja trupa uslijed udaranja pramca o valove, kNm
$M_{\rm SW}$	– moment savijanja trupa na mirnoj vodi, kNm
$M_{ m WH}$	 horizontalni moment savijanja duž broda, kNm
$M_{ m WV}$	– moment savijanja broda na valovima, kNm
n	– broj narinutih ciklusa naprezanja
na	– broj godina koje odgovaraju vremenu T
n _i	– broj ciklusa raspona naprezanja $\Delta \sigma_i$ u intervalu <i>i</i>
n _k	– broj intervala jednake duljine na koji se dijeli ukupni broj ciklusa
Ν	– broj ciklusa naprezanja do loma (broj izdržanih ciklusa prema S–N krivulji)
	– ukupni broj Marsden zona kroz koje prolazi brod
$N(\Delta \sigma_{ij})$	– broj ciklusa raspona naprezanja ∆σ _{ij}
$N_{\rm d}$	– granični broj ciklusa (kod dinamičke izdržljivosti)
$N_{ m H}$	– prigušenje, Ns/m ²
$N_{ m i}$	– srednji zamorni vijek kod konstantne amplitude raspona naprezanja
	– broj ciklusa do loma u intervalu <i>i</i>
$N_{\rm i}$	– broj izdržanih ciklusa naprezanja dobiven iz ispravljene S–N krivulje uzimajući
	da je $\Delta \sigma = \Delta \sigma_i$
$N_{ m L}$	– ukupni broj ciklusa za života broda
$N_{\rm R}$	– broj ciklusa naprezanja za odabranu razinu vjerojatnosti premašivanja $p = 1/N_R$

$N_{ m t}$	– ukupni broj ciklusa za očekivanog vijeka trajanja broda (20 godina)
$N_{ m u}$	– ukupni broj ciklusa u spektru odziva
p	– opterećenje (tlak), kN/m ²
	– vjerojatnosti oštećenja
	– odabrana razina vjerojatnosti premašivanja
$p(\Delta \sigma_{ij})$	– funkcija vjerojatnosti raspona naprezanja
$p_{\rm r}(\sigma_{\rm i})$	– vjerojatnost razine naprezanja σ_i
p_0	– osnovno vanjsko opterećenje, kN/m ²
$p_{ m c}$	– statičko opterećenje uslijed tereta, kN/m ²
$p_{ m d}$	– opterećenje morem (vanjsko opterećenje od tlaka mora), kN/m ²
$p_{\rm D}$	– opterećenje izloženih paluba (palube čvrstoće), kN/m ²
$p_{\rm d,t}$	– maksimalni dinamički tlak na vodnoj liniji $z_i = d_i$, kN/m ²
p_{j}	– vjerojatnost pojavljivanja j-tog stanja mora
$p_{ m o}$	– tlak sigurnosnih ventila, bar
$p_{ m v}$	 – tlak otvaranja prekotlačnog ventila, bar
P_{f}	 vjerojatnost zamornog popuštanja
Q	– smična sila, N
r _c	– trošenje materijala zbog korozije, mm/godini
R	– omjer naprezanja (minimalnog i maksimalnog naprezanja ciklusa)
R _d	– dinamička izdržljivost, N/mm ²
$R_{\rm eH}$	– najmanja gornja nazivna granica razvlačenja čelika, N/mm ²
R _p	– pouzdanost na zamorno popuštanje
S	– razmak ukrepa, m
s_1	– vertikalni promjenjivi pomak morske površine na boku broda unutar 0.4L od
	sredine broda, m
<i>s</i> _a	– razmak uzdužnih ukrepa ortotropne ploče, m
s _b	– razmak poprečnih ukrepa ortotropne ploče, m
S _D	– standardna devijacija kod analize parametra oblika k
s_i	– razmak uzdužnjaka, m
$s_{\rm L}$	– standardna devijacija od log C_{50}
$S_{\ln(T)}$	- standardna devijacija od ln(T)
S	– raspon naprezanja, N/mm ²
$S\left(\omega, \theta ight)$	– ordinata dvodimenzionalnog spektara energije valova, m ² /(rad/s)
S_{σ}	– ordinata spektra naprezanja (spektar odziva), (N/m ²) ² s
$S, S(\omega)$	– ordinata spektra energije valova, m ² /(rad/s)
S_{10-5}	– raspon naprezanja za razinu vjerojatnosti od $p = 10^5$, N/mm ²
$S_{ m B\zeta}$	– ordinata Bretscheniderovog (ITTC) spektra valova, m ² /(rad/s)
S_{ij}	– rasponi naprezanja za osnovne slučajeve opterećenja (11 – 22'), N/mm ²
$S_{ m J\zeta}$	 – ordinata JONSWAP spektra valova, m²/(rad/s)
$S_{ m k}$	– raspon vršnog naprezanja, N/mm ²
S _n	– raspon nazivnog naprezanja od idealizacije gredom, N/mm ²

$S_{\rm PM\zeta}$	– ordinata Pierson–Moskovitz spektra valova, m ² /(rad/s)
Sq	– raspon naprezanja na presjeku dva segmenta S–N krivulje, N/mm ²
$S_{\rm s}$	– raspon žarišnog naprezanja, N/mm ²
t	– vrijeme, s
	– debljina konstruktivnog elementa, mm
Δt	– vremenska promjena, s
t _p	– debljina bulb profila, cm
T	– trajanje pojedinog stanja mora, s
	– vrijeme do popuštanja detalja konstrukcije (vijek trajanja), s
	– slučajna varijabla kod proračuna pouzdanosti, s
\overline{T}	– srednji valni period, s
	– srednja vrijednost slučajne varijable T, s
$T_{\rm proj}$	– projektni vijek broda, 20 godina
$T_{\rm R}$	– period ljuljanja, s
T _s	– zahtjevani vijek trajanja u službi, s
v	– brzina broda, čv
V_1	-istisnina za gaz d_1 , m ³
$V_{\rm Df}, V_{\rm C}$ i $V_{\rm B}$	– koeficijenti varijacije slučajnih varijabli $D_{\rm f}, C$ i B
W	– poniranje, m
	– karakteristična vrijednost naprezanja, N/mm ²
$W_{\rm B}$	– moment otpora glavnog rebra za dno broda, m ³
$W_{\rm D}$	– moment otpora glavnog rebra za palubu, m ³
$W_{ m i}$	– moment otpora uzdužnjaka uključujući i sunosivu širinu, mm ³
$W_{ m LF}$	– moduli presjeka uzdužnjaka oko prirubnice po LR, mm ³
$W_{ m p}$	– moment otpora bulb profila, cm ³
$W_{\rm yy}, W_{\rm zz}$	– momenti otpora presjeka trupa za os y i z po LR, mm^3
x	 – udaljenost točke opterećenja po duljini broda, m
$x(\zeta_a,\omega,\varepsilon)$	– prijenosna funkcija za određenu valnu frekvenciju ω
$x_{\mathrm{p}}, y_{\mathrm{p}}, z_{\mathrm{p}},$	 koordinate promatrane točke opterećenja, m
Χ	 vektor osnovne slučajne varijable
у	 – udaljenost središta opterećenja od središnje okomice tanka, m
УАi	– poprečna koordinata najviše točke tanka kod nagiba broda za kut $A_{\rm R}$, m
Z	 vertikalna udaljenost središta opterećenja od osnovke, m
$\frac{-}{z}$	– razlika između apsolutnog pomaka broda u vertikalnom smjeru, m
ZAi	– vertikalna koordinata najviše točke tanka kod nagiba broda za kut $A_{\rm R}$, m
Zi	 vertikalna udaljenost i-tog uzdužnjaka od osnovice, m
ZNA	 – udaljenost neutralne osi poprečnog presjeka od osnovice, m
α	– faktor korekcije konstante C_p ovisno o omjeru naprezanja R
04	- nagio vala
α_0	– koenenjem koji uračunava vinjeme poneono za ukračaj/iskračaj, popravke

α_1	– dio životnog vijeka nakrcanog broda
α_2	– dio životnog vijeka broda u balastu
α _p	– faktor plovidbe
β	-indeks sigurnosti (Cornellov indeks)
γ	– parametar u JONSWAP formuli za spektar energije valova
γ _x	– uzdužno ubrzanje težišta odjeljka (compartment) za promatrano stanje mora, $\ensuremath{\text{m/s}^2}$
γ_y	– poprečno ubrzanje težišta odjeljka (compartment) za promatrano stanje mora, $\mbox{m/s}^2$
γ_z	– vertikalno ubrzanje težišta odjeljka (compartment) za promatrano stanje mora, $\mbox{m/s}^2$
δ	– relativni otklon između poprečne pregrade i okvirnog rebra, mm
Δ	– nosivost, tdw
3	– fazni pomak valova, rad
Δε	– fazna promjena, rad
ζ_{a}	– trenutna valna amplituda, m
$\zeta(t)$	– gibanje morske površine, m
η	– torzioni koeficijent
	– faktor prigušenja
θ	– smjer širenja valova, rad
	– posrtanje, rad
	– srednji kut korijena zavara, ^o
κ	– Smithov faktor korekcije
μ_{e}	– matematičko očekivanje kod analize parametra oblika k
μ_i	 vrijeme provedeno u i-toj Marsden zoni, s
ρ	 virtualni omjer stranica ortotropne ploče
$ ho_c$	– gustoća tereta, t/m ³
$\rho_{m.v}$	– gustoća mora, t/m ³
$\Delta \sigma$	– raspona naprezanja, N/mm ²
σ_1	– nazivno naprezanje savijanja na mirnoj vodi, N/mm ²
σ_2	– nazivno naprezanje savijanja od vertikalnih momenata na valovima, N/mm ²
σ_3	– nazivno naprezanje savijanja od horiz. momenata na valovima, N/mm^2
σ_4	– nazivno lokalno naprezanje savijanja od vanjskog ili unutarnjeg tlaka, N/mm ²
σ_{a}	– amplituda ciklusa naprezanja, N/mm ²
$\sigma_{a,i}$	– naprezanje i-tog uzdužnjaka od vanjskog opterećenja (tlak mora), N/mm ²
σ_{b}	– naprezanja savijanja, N/mm ²
$\sigma_{b,i}$	– naprezanje uslijed relativnog otklona konstrukcije, N/mm ²
$\sigma_{c,i}$	– naprezanje savijanja opločenja na potpuno upetim mjestima na kraćim
	stranicama ortotropne ploče, N/mm ²
$\Delta\sigma_i$	– raspon naprezanja bloka <i>i</i> , N/mm ²

$\Delta\sigma_{ij}$	– raspon naprezanja s vjerojatnošću premašivanja $1/N_{\rm R}$, N/mm ²
$\sigma_{i,j}$	– vrijednosti jediničnih naprezanja, N/mm ²
σ_k	– vršno naprezanje, N/mm ²
σ_{m}	– membransko naprezanje, N/mm ²
σ_{m}	– srednje naprezanje, N/mm ²
σ_{max}	– najveće gornje naprezanja ciklusa, N/mm ²
$\Delta\sigma_{max}$	– najveći raspon narinutog naprezanja unutar spektra naprezanja, N/mm ²
σ_{min}	– najveće donje naprezanja ciklusa, N/mm ²
σ_n	– nazivno naprezanje, N/mm ²
σ_{nl}	– nelinearna komponenta vršnog naprezanja, N/mm ²
$\Delta\sigma_p$	– dozvoljeni raspon naprezanja, N/mm ²
$\Delta\sigma_q$	– raspon naprezanja na spoju dva segmenta S–N krivulje, N/mm ²
$\Delta\sigma_r$	– veličina intervala spektra odziva, N/mm ²
$\Delta\sigma_R$	– ekstremni raspon naprezanja koji se očekuje u N _R ciklusa, N/mm ²
	– referentna vrijednost pogonske čvrstoće S–N krivulje u $2 \cdot 10^6$ ciklusa
	naprezanja po GL, N/mm ²
$\Delta \sigma_{R}$	– modificirani raspon naprezanja, N/mm ²
$\Delta\sigma_{Rc}$	– ispravljena referentna vrijednost pogonske čvrstoće Wohlerove krivulje u $2 \cdot 10^6$
	ciklusa naprezanja, N/mm ²
σ_{s}	– žarišno naprezanje, N/mm ²
τ_n	– smično naprezanje, N/mm ²
φ	– projektni kut poprečnog nagiba broda, ^o
φ	– smjer napredovanja broda obzirom na valove, ^o
Φ	– maksimalni kut ljuljanja broda, rad
ψ	 – faktor međudjelovanja lokalnog i globalnog opterećenja
ω	– valna frekvencija, rad/s
ω _e	– frekvencija susretanja, rad/s
ω_p	– vršna frekvencija, rad/s
$\overline{\Omega}$ –	– parametar naprezanja

Kratice:

ABS	– American Bureau of Shipping
BL	– Osnovica (base line)
BV	– Bureau Veritas
CL	– Centralna linija
DNV	– Det Norske Veritas
FDA	– Fatigue Design Assessment
GL	– Germanischer Lloyd
HP	– Holand profil (bulb profil)
HRB	– Hrvatski registar brodova
HSE	– Health and Security Executive
IACS	- International Association of Classification Societies
IIW	 International Institute of Welding
KR	- Korean Register of Shipping
LR	 Lloyd's Register of Shipping
NOV	– Novogradnja
R	– Rebro broda
RAO	 Response Amplitude Operator
SDDG	 Structural Detail Design Guide
VLCC	 Very Large Crude Carrier

1 UVOD

Više od polovice od 10000 tankera i brodova za rasute terete u svjetskoj floti, u vrijeme izrade ovoga rada, starije je od 15 godina, a dio je stariji i od 30 godina. Samo u razdoblju od 1990. do 1994. izgubljeno je 45 brodova, uz gubitak više od 300 ljudskih života. Ove tragedije posebno su se odrazile i na onečišćenje okoline, osobito zagađivanje mora od izlijevanja nafte, a izazvale su i velike materijalne gubitke kao i gubitke poslova. Značajan, ali neutvrdiv, dio ovih nesreća povezan je s zamornim oštećenjima brodskih konstrukcija.

Statistika pokazuje da je približno 15% svih zamijećenih oštećenja brodova direktno povezano s popuštanjem konstrukcije [1]. Zamor, posebno u sprezi s korozivnim djelovanjem okoline, je značajan izvor oštećenja. Nesreće na moru posljedica su i drugih uzroka, osim zamora, kao što su požari, sudari i nasukivanja, ali većinu oštećenja konstrukcije uzrokuju pukotine.

Pukotine nastaju zato što je lokalni diskontinuitet, tj. nehomogenost u materijalu, u svojoj neposrednoj blizini prouzročio lokalnu koncentraciju naprezanja [2]. Akumuliranjem plastičnih deformacija uslijed djelovanja promjenjivog opterećenja pukotine se s vremenom povećavaju, te kada neki detalj konstrukcije dovoljno oslabi dolazi do naglog loma. Važno je naglasiti činjenicu da nastanak zamornih pukotina u najvećoj mjeri zavisi o stanju naprezanja koje prevladava na mjestima pogodnim za nastanak pukotina. Pukotine mogu nastati na različitim mjestima brodske konstrukcije, a najčešće nastaju na mjestima povećane koncentracije naprezanja i to [3]:

- duž izreza na spoju poprečnih okvira i uzdužnjaka,
- na krajevima koljena i drugim mjestima diskontinuiteta konstrukcije, posebno na uzdužnim elementima,
- na spojevima s ukrepama i drugim sekundarnim elementima konstrukcije,
- na uzdužnjacima bokova broda izrađenim od čelika povišene čvrstoće.

Pokazalo se da na tankerima s dvostrukom oplatom starima 3 do 4 godine pukotine najčešće nastaju upravo na spojevima uzdužnjaka boka, izrađenih od čelika povišene čvrstoće, s primarnim konstrukcijskim elemenatima kao što su okvirna rebra i pregrade [4]. Kako su zamorne značajke čelika povišene čvrstoće slične običnim brodograđevnim čelicima, veće dozvoljene razine naprezanja mogu prouzročiti kraći životni vijek konstrukcijskih detalja obzirom na zamor. Uz pretpostavku da je zamorni vijek trajanja funkcija treće potencije raspona naprezanja, očigledna je važnost proučavanja zamora brodskih konstrukcija.

Tijekom svoga života, brodska konstrukcija izložena je vremenski promjenjivim razinama naprezanja, uslijed valnih opterećenja, sila inercije izazvanih ubrzanjem broda i drugih dinamičkih opterećenja, kao što su ona prenesena putem porivnih strojeva i brodskih vijaka.

Pokazalo se da je pulsirajući hidrodinamički tlak na trup broda, uslijed valova i gibanja broda, glavni uzrok zamornog oštećenja uzdužnjaka boka [5],[6].

Zamor, tj. nastanak pukotine i njen rast uslijed promjenjivog opterećenja, kao i nestabilni lom od zareza i pukotina, oblici su oštećenja brodova i pomorskih objekata, koji su izazvali značajno zanimanje u proteklih nekoliko godina. Razlozi su između ostalih i:

- veća iskoristivost brodskih konstrukcija uslijed optimiziranja poboljšanim analizama,
- intenzivnija upotreba čelika povišene čvrstoće kao i pojednostavljenje konstrukcijskih detalja i tehnika izrade,
- rastući broj ostarjelih brodskih konstrukcija, s nedostatkom održavanja,
- povećana osjetljivost javnosti obzirom na zaštitu ljudskih života i okoline.

Napravljeno je puno istraživanja na tom području, a u većini slučajeva istraživani su makroskopsko ponašanje materijala kao i modeli njihovog opisivanja, dok su rješenja sa mikroskopske i metalurške strane rijetko direktno primjenjiva na inženjerskom polju. To je uglavnom uslijed složenosti procesa oštećivanja od promjenjivog opterećenja i rasipanja karakteristika materijala.

Zahtjevi iz prakse podržali su razvoj postupaka procjene zamora brodskih konstrukcija, kao i donošenje odgovarajućih pravila i smjernica projektiranja obzirom na zamor. Općenito, proračun zamora je iznimno složeni postupak u kojem udio imaju ulazna opterećenja, vrste materijala, konstruktivna uređenja detalja, i izrada, svaka od kojih se može identificirati kao problematično područje određenih tipova brodova. Proračun zamornog oštećenja još uvijek nije uobičajena komponenta projektnog procesa, premda je uočena važnost zamora za sigurnost brodske konstrukcije.

Cilj ovog rada je analiza i usporedba tipičnih proračuna zamora brodskih konstrukcija pojedinih klasifikacijskih zavoda, a za potrebe razvoja pojednostavljenog praktičnog postupka provjere zamorne čvrstoće brodske konstrukcije u projektiranju, odnosno za ocjenu vijeka trajanja brodskih konstrukcija s obzirom na zamor. Ovim proračunom trebalo bi osigurati da u predviđenom vijeku korištenja broda mogućnost nastanaka i širenja zamornih pukotina bude svedena na što je moguće manju mjeru. Rad je, osim za potrebe projekta 'Istraživanje utjecajnih parametara na pogonsku čvrstoću brodskih konstrukcija, strojeva i opreme', namijenjen i svima koji su zainteresirani za područje zamora brodskih konstrukcija: klasifikacijski zavodi, brodogradilišta, projektanti, fakulteti i studenti.

U tekstu su često pojavljuju riječi zamor i umor, što čitatelja može zbuniti i navesti na razmiljšljanje koju je riječ zapravo ispravno upotrijebljavati. Nomenklatura u ovom radu rezultat je dogovora stručnjaka iz područja brodogradnje, strojarstva i lingvistike, stoga se u radu govori o zamoru brodskih konstrukcija i umoru materijala.

1.1 Povijesni pregled

Prva sustavna ispitivanja lomova uslijed promjenjivog opterećenja, u razdoblju 1850.-tih do 1860.-tih godina, provodio je August Wöhler vezano uz probleme učestalih lomova željezničkih osovina, koji je prvi uočio slučajeve loma konstrukcije kod kojih je naprezanje bilo niže od granice popuštanja. Njegovi zaključci o produljenju radnog vijeka s opadanjem amplitude opterećenja (Wöhlerova ili S–N krivulja) i postojanju donje vrijednosti amplitude naprezanja ispod koje lom neće nastupiti ni kod beskonačnog ponavljanja opterećenja (dinamička izdržljivost ili trajna dinamička čvrstoća) temeljne su postavke i današnjeg izučavanja umora materijala. Wöhler je također uočio da je za umor materijala važniji raspon naprezanja od samog maksimalnog naprezanja [7].

Tijekom razdoblja od 1870. do 1890.-tih godina niz istraživača nastavio je Wöhlerov klasični rad. Gerber je istraživao utjecaj srednjeg naprezanja, a Goodman je predložio pojednostavljenu teoriju srednjeg naprezanja. Krajem 19. stoljeća Bauschinger je otkrio različito ponašanje materijala kod dinamičkog u odnosu na statičko ispitivanje, te je pokusima pokazao da se granica popuštanja, vlačna ili tlačna, reducira nakon suprotnog opterećenja koje izaziva i plastične deformacije (Bauschingerov efekt) [8].

Krajem 19. i početkom 20. stoljeća upotrijebljen je i optički mikroskop za nastavak istraživanja mehanizma umora materijala. Uočene su lokalne linije klizanja koje dovode do formiranja mikropukotina. 1920. godine Griffith objavljuje rezultate teoretskih proračuna i rezultate pokusa krhkog loma stakla. On je otkrio da čvrstoća stakla zavisi o veličini mikroskopske pukotine. Ako je σ nazivno naprezanje kod loma, i *a* veličina pukotine kod loma vrijedi da je $\sigma\sqrt{a}$ = konst. Između ostalog Griffith je otkrio da je stvarna čvrstoća materijala znatno niža od teorijske (očekivane), što objašnjava činjenicom da materijal **uvijek** sadržava pukotine. Ovim pionirskim radom Griffith postaje utemeljiteljem mehanike loma 1924. godine.

Gough je značajno doprinosi razumijevanju mehanizma umora materijala, te izdaje knjigu o umoru metala. Moore i Kommers izdaju prvu opsežnu američku knjigu o umoru metala 1927. godine. 1929./1930. Haigh prezentira svoje racionalno objašnjenje razlike odziva čelika povišene čvrstoće i običnog konstrukcijskog čelika na zamor kod prisutnosti zareza. Upotrijebio je koncept analize zamornog produljenja i samo–naprezanja koje su kasnije detaljno razvili drugi istraživači. J.O. Almen točno je objasnio poboljšanje zamorne čvrstoće od tlačnih naprezanja u površinskom sloju izazvanih čekićanjem. Horger je pokazao da površinsko valjanje može spriječiti rast pukotina. 1937. Neuber objašnjava da je srednje naprezanje u malom volumenu materijala u korijenu zareza puno važnije od vršnog naprezanja u samom dnu zareza. Za vrijeme II. Svjetskog rata namjerna upotreba tlačnog samo–naprezanja bila je uobičajena u izradi avionskih motora i oklopnih vozila.

Krhki lomovi zavarenih konstrukcija brodova serije "Liberty" pokrenuli su razmišljanja vezana uz postojeća oštećenja konstrukcije kao i utjecaj koncentracije naprezanja. Mnogi od lomova započeli su na mjestima znatne koncentracije naprezanja, tj. na rubovima grotala, kvadratnim izrezima i zavarima. 1945. Miner je formulirao kriterij linearnog kumulativnog oštećenja predložen od Palmgrena još 1924. (Palmgren–Minerov zakon).

Veliki doprinos istraživanju umora materijala 50-tih godina napravljen je uvođenjem elektrohidrauličkih ispitnih sustava (umaralice), koje su omogućile ispitivanja stvarnim opterećenjima uzoraka, komponenti i čitavih mehaničkih sustava. Elektronski mikroskop omogućio je bolje razumijevanje osnovnih zamornih mehanizama. Irwin prvi uvodi faktor intenziteta naprezanja *K*, koji je prihvaćen kao osnova linearno elastične mehanike loma i predviđanja vremena rasta zamorne pukotine. Manson i Coffin 60-tih godina postavljaju temelje današnjih istraživanja zamora putem analize deformacija u zarezu. Paris i Erdogan 1963. godine pokazuju da se rast zamorne pukotine da/dN najbolje može opisati preko raspona faktora intenziteta naprezanja ΔK (Paris–Erdoganov zakon): $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$, gdje su *C* i *m* konstante materijala [9]. Ovaj zakon je i danas najviše upotrebljavani način proračuna rasta pukotine i procjene preostalog životnog vijeka dijela s pukotinom.

Sve više istraživanja umora materijala i zamora konstrukcija provodi se i u današnje vrijeme, u aktivan je i mali broj hrvatskih znanstvenika, pa vrijedi navesti neke od radova: Božić [10], [11], [12] Senjanović, Parunov, Tomašević [13], [14], [15], Rudan [16], [17], Domazet [18], Vulić [2], Žiha, Ivančević [19], [20], uz ispriku svima koji ovdje nisu spomenuti.

2 ZAMOR BRODSKIH KONSTRUKCIJA

Lom brodskih konstrukcija uzrokovan pukotinama pri promjenjivom naprezanju koje je manje od čvrstoće materijala, tzv. zamorni lom, vrlo se često javlja u službi broda. Zamor je lokalna pojava koja se kod brodskih i pomorskih konstrukcija javlja kod detalja koji su neodgovarajuće projektirani, izrađeni i održavani.

U brodskim konstrukcijama, zamorne pukotine općenito nastaju na mjestima samih zavara gdje postoje visoke koncentracije naprezanja koje su posljedica postupka zavarivanja, te na mjestima kao što su izrezi, otvori i rubovi limova gdje se zbog nagle promjene geometrije, prekinutosti ili neporavnatosti detalja javljaju povećana naprezanja.

Mehaničke značajke čelika kao konstrukcijskog materijala, tehnologija izrade i posebno prisutnost zavara donose još niz problema specifičnih za čelične konstrukcije, kao što su zaostala naprezanja, srednja naprezanja, utjecaj okoline (korozija) i netočnosti, a pored ovih postoje i uobičajeni problemi vezani uz utjecaj mjerila, izradu, kontrolu kvalitete.

2.1 Mehanizam umaranja materijala

Vrlo male pukotine (naprsline) redovita su pojava u konstrukcijama i njihovim dijelovima i kao takve su za konstrukciju bezopasne. Znanost o materijalima pokazuje da uvijek prisutni mikroskopski defekti, u obliku nepravilnosti u kristalnoj rešetki metala, nastaju zbog niza nesavršenosti u procesu izrade. Zamor predstavlja rast i stapanje ovih nepravilnosti, nakon čega slijedi formiranje pukotine te njeno širenje do konačnog puknuća. Proces oštećenja od zamora uobičajeno se dijeli u tri faze [21]:

- Faza I. iniciranje pukotine,
- Faza II. rast pukotine,
- Faza III. lom.

Prva faza u procesu oštećenja od umora materijala predstavlja iniciranje pukotine. Pukotine se mogu inicirati na više načina, no važno je istaknuti da se najčešće počinju formirati na slobodnoj površini, stoga je važno stanje površine kod ispitivanja otpornosti na zamor. Nesavršenost procesa izrade i obrade materijala je glavni uzrok površinskih oštećenja. Osjetljivost na površinska oštećenja raste s vlačnom čvrstoćom materijala – općenito vrijedi što je materijal čvršći to je veći utjecaj stanja površine na zamor. Poseban slučaj iniciranja pukotine javlja se kod promjenjivog opterećenja, a predstavlja stvaranje ekstruzija i intruzija na površini metala [22]. Intruzije su zapravo izvori koncentracije naprezanja i mjesta inicijacije pukotina. Ova pojava posljedica je kristalične strukture metala koji se sastoje od velikog broja kristala ili zrna, od kojih svako zrno ima različita mehanička svojstva u različitim smjerovima. Djelovanjem promjenjivog opterećenja dolazi do klizanja zrna po ravninama, te do povećanja broja linija klizanja. Udruživanjem više linija klizanja i njihovim rastom nastaje zamorna pukotina. Kada je pukotina inicirana ona će se širiti u ravnini maksimalnog smičnog naprezanja. Klizanje je uglavnom i uvjetovano smičnim naprezanjem, pa što su veće amplitude smičnog naprezanja i veći broj ciklusa ono je izraženije. Područje prve faze zauzima samo mali dio površine loma, a broj ciklusa zamornog vijeka koji se odnosi na prvu fazu ovisi o veličini naprezanja. Povećanjem razine naprezanja, skraćuje se faza iniciranja pukotine, pa tako kod vrlo malih naprezanja (visokociklički zamor), većina zamornog vijeka predstavlja vrijeme iniciranja pukotine, a kod vrlo velikih naprezanja pukotine nastaju vrlo rano.

Druga faza predstavlja stvaranje makropukotine (tehničke pukotine) iz niza mikropukotina iniciranih u prvoj fazi procesom klizanja duž ravnina. Ovdje dolazi do promjene smjera rasta pukotine, a kada će do toga doći ovisi o veličini vlačnog naprezanja. Kod vrlo velikih vlačnih naprezanja (niskociklički zamor) faza iniciranja pukotine je neprimjetna, tj. druga faza zauzima gotovo cijelo područje lomne površine [23]. Područje visokocikličkog i niskocikličkog zamora vrlo je teško razgraničiti, a najčešće se u postupcima za ocjenu zamora brodskih konstrukcija pretpostavlja granica ~10⁴ do 10⁵ ciklusa do loma [24],[25]. U kojoj će se ravnini širiti pukotina ovisi o stanju naprezanja – najčešće je to okomito na pravac maksimalnog vlačnog naprezanja. Pukotina raste brzinom od ~10⁻⁸ do 10⁻³ mm po ciklusu [25].

Nakon prvih dviju faza dolazi do naglog širenja pukotine i nestabilnog loma konstrukcije. Kod materijala sklonih krhkom lomu ova faza započinje u trenutku kada je postignuta kritična duljina pukotine, dok kod rastezljivih materijala početak loma ovisi o naprezanju.



Slika 2.1: Shematski prikaz procesa umaranja materijala [18]

2.2 Postupci proračuna zamora brodskih konstrukcija

Proračun promjenjivih opterećenja u prošlosti nije bio područje od interesa brodograđevnih inženjera, uglavnom zbog složenosti. Razvojem numeričkih metoda i računala uklonjeno je i to ograničenje. U posljednjih nekoliko godina znatno je naraslo zanimanje za problem zamora brodskih i pomorskih konstrukcija, uglavnom zbog sve lakših optimiziranih konstrukcija i sve složenijih postupaka projektiranja, ali još uvijek proračun zamora nije uobičajena komponenta projektnog procesa.

Dva osnovna skupa podataka su invarijabilno potrebna za određivanje zamornog vijeka brodske konstrukcije: karakteristike materijala (spojeva), koje su dane kroz S–N krivulje, i dugoročna raspodjela naprezanja (ili histogram naprezanja) konstrukcije. Za određivanje raspodjele naprezanja potrebno je uključiti sve promjene naprezanja koje se javljaju za vijeka trajanja broda, a za to je potrebno razmotriti stanja krcanja, utjecaj valova, odziv gibanja, brzinu broda i rezultirajuće opterećenje i odziv konstrukcije.

Postupci proračuna zamora brodskih konstrukcija dijele se obzirom na to kako je određena dugoročna raspodjela naprezanja [26]:

- složeni cjeloviti postupak direktnog spektralnog proračuna,
- pojednostavljeni postupak proračuna zamora.

Zamorno oštećenje može se odrediti i pristupom baziranim na mehanici loma, na osnovi poznate dugoročne raspodjele naprezanja [27],[28]. U ovom slučaju, između ostalih zahtjeva, potrebno je znati vrijednost rasta zamorne pukotine materijala umjesto S–N krivulja.

2.2.1 Spektralni postupak proračuna zamora

Spektralni postupak zajedno sa statističkom ocjenom očekivanog stanja mora je posebno prikladan za proračun naprezanja izazvanih valovima. Ovaj postupak se izvodi u frekventnom području za proračun spektra naprezanja. Prirodno stanje mora promatra se kao superpozicija različitih elementarnih pravilnih valova, a odziv konstrukcije na svaki elementarni val smatra se linearno zavisnim o valnoj visini.

Spektar valova i statistički podaci primjenjuju se za određivanje kratkoročnog spektra odziva (naprezanja) za određenu kombinaciju stanja mora, brzine i smjera broda, te stanja krcanja. Dugoročna raspodjela naprezanja i odgovarajuće zamorno oštećenje određuje se utvrđivanjem značajnog udjela svakog kratkoročnog spektra ili određivanjem vjerojatnosti

pojavljivanja svakog od njih. Osnovne pretpostavke spektralnog proračuna su normalna raspodjela kratkoročnih valnih opterećenja i linearni odzivi obzirom na valnu visinu.

Za primjenu ovog postupka potrebno je prethodno proračunati intenzitet i frekvencije opterećenja slučajnog stanja mora. Odziv konstrukcije kod slučajnog stanja mora može se odrediti sumiranjem efekata pojedinačnih pravilnih valova čija kombinacija simulira slučajno stanje, a tražena raspodjela naprezanja za proračun zamora se onda konstruira na osnovu utvrđenih valnih podataka.

Glavna prednost spektralnog postupka je točnost, a nedostatak dugotrajnost proračuna zbog potrebe analiziranja velikog broja slučajeva valnih opterećenja. Za jedan tanker potrebno je analizirati približno 300 slučajeva opterećenja [25].

Nelinearna opterećenja se ne uzimaju u obzir, iako se pokazalo da je nelinearni utjecaj hidrodinamičkog tlaka na bokove broda od velikog značenja. Ovaj utjecaj posljedica je isprekidanog zapljuskivanja od valova i jako je zavisan o valnoj visini i oplakanoj površini. Problem nelinearnog odziva broda moguće je riješiti primjenom nelinearnih prijenosnih funkcija koje se dobivaju iz momenata gibanja broda višeg reda [29],[30].

Postupak spektralnog proračuna sastoji se od sljedećih koraka:

- modeliranje morskih valova,
- proračun valnih opterećenja,
- određivanje odziva konstrukcije,
- određivanje izdržljivosti konstrukcije,
- proračun zamornog oštećenja.

2.2.1.1 Modeliranje morskih valova

Fizikalne i statističke značajke gibanja morske površine opisane su matematički pomoću slučajnih funkcija. Geometriju morske površine i njenu dinamiku modeliramo sumom harmonijskih funkcija, različitih amplituda i frekvencija, te faznim pomakom koji je slučajna veličina.

Stanje mora može se opisati modelima u dva različita vremenska razdoblja: kratkoročni model kod kojeg je stanje mora opisano skupom parametara i približno se smatra stacionarnim stanjem, i dugoročni model koji se definira variranjem skupa parametara kratkoročnog modela. Parametri kojima se može opisati stanje mora su podaci o valovima koji uključuju značajnu valnu visinu $\overline{H}_{1/3}$, koja se definira kao očekivana vrijednost jedne trećine najviših valova,

srednji valni period \overline{T} , koji predstavlja vrijeme između dva uzastopna prolaza nulte razine morske površine i smjer širenja valova θ .

Pri razmatranju kratkoročnog stanja mora, gibanje morske površine $\zeta(t)$ opisano je na određenom mjestu kao stacionarni (u kratkom periodu ~1 do 3 sata), uskopojasni, gausovski slučajni proces. Unutar svakog stanja mora raspodjela valne energije prikazana je funkcijom gustoće spektra energije valova.

2.2.1.2 Spektri energije valova

Spektar valova je značajni ulazni podatak kod proračuna zamora (i pouzdanosti) brodskih konstrukcija, jer prikazuje raspodjelu valne energije za određene raspone frekvencija. Uz pretpostavku da je gibanje valne površine $\zeta(t)$ slučajni proces koji slijedi normalnu razdiobu (gausovski proces), vrijedi da je:

$$\overline{T} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_1}} \tag{2.1}$$

gdje je:

*m*_n spektralni moment *n*-tog reda,

$$m_{\rm n} = \int_{0}^{\infty} \omega^{\rm n} S_{\zeta}(\omega) d\omega.$$
(2.2)

Ako se nadalje pretpostavi da je proces gibanja morske površine uskopojasni (što znači da su vrhovi valova raspodijeljeni po Rayleighovoj distribuciji) onda je:





Slika 2.2: Spektar energije valova [31]

Oblik valnog spektra određenog trenutačnim promatranjima morskih valova značajno se razlikuje ovisno o geografskoj lokaciji, trajanju vjetra, fazi rasta i smirivanja oluja i postojanju tzv. 'mrtvog mora'. Postoji nekoliko empirijskih formulacija funkcije gustoće spektra energije valova za idealne uvjete [31]:

- Pierson - Moskovitz spektar:

$$S_{\rm PM\zeta} = A\omega^{-\xi} e^{-B\omega^{-\eta}}, \quad \omega > 0,$$
 (2.4)

- Bretschneiderov spektar za otvoreno more:

$$S_{\rm B\zeta}(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(\frac{-B}{\omega^4}\right),\tag{2.5}$$

– JONSWAP spektar za obalna područja:

$$S_{J\zeta}(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right] \gamma^a.$$
(2.6)

Potpuniji prikaz stanja morske površine dobije se upotrebom dvodimenzionalnog spektra (Slika 2.4):

$$S(\omega, \theta) = S(\omega) f(\theta)$$
(2.7)

gdje je:

 θ – smjer širenja valova,

$$f(\theta) - \text{funkcija širenja definirana u obliku: } f(\theta) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta, & \text{za} \left(-\frac{\pi}{2} \le \theta \le \frac{\pi}{2}\right), \\ 0, & \text{u ostalim slučajevima} \end{cases}$$

Karakteristični parametri valnog spektra $\overline{H}_{1/3}$, \overline{T} određeni su dugogodišnjim mjerenjima gibanja morske površine. Tako dobiveni podaci poslužili su za izradu morskih atlasa koji svjetska mora dijele na niz zona, tzv. Marsdenove zone (Slika 2.3).

Slika 2.3: Marsden zone [31]

Slika 2.4: Dvodimenzionalni valni spektar [31]

Kod spektralnog postupka proračuna zamora potrebno je odrediti vrijeme izloženosti broda određenom stanju mora. Zbog nemogućnosti određivanja vremenskog trenutka u kojem je brod izložen određenim morskim valovima, uzima se kao pretpostavka da je trajanje izloženosti broda određenom stanju valova jednako trajanju određenog stanja mora, što znači da je brod izložen određenom stanju mora unutar svake Marsdenove zone onoliko dugo koliko kroz

određenu zonu plovi. To je donekle konzervativna pretpostavka jer uz današnje mogućnosti prognoze vremena i opremljenost radarima velikog dometa brodovi mogu izbjeći ekstremna stanja mora.

Poznavajući rutu plovidbe broda može se onda odrediti učestalost pojavljivanja različitih stanja mora kao srednja vrijednost značajnih udjela valnih parametara pojedinih zona:

$$\left(\overline{H}_{1/3},\overline{T}\right)_{\text{vijeka trajanja broda}} = \sum_{i=1}^{N} \mu_i \left(\overline{H}_{1/3},\overline{T}\right)_i$$
(2.8)

gdje je:

 $(\overline{H}_{1/3},\overline{T})_i$ – odnosi se na *i*–tu Marsdenovu zonu kojom prolazi brod,

 μ_i – vrijeme provedeno u *i*-toj zoni,

N – ukupni broj zona kroz koje prolazi brod [32].

2.2.1.3 Proračun valnih opterećenja

Odzivi izazvani djelovanjem morskih valova općenito mogu biti niske i visoke učestalosti. Odzivi niske učestalosti posljedica su uglavnom relativno sporih gibanja trenutne valne površine, dok su visoko–frekventni odzivi posljedica djelovanja potpuno drugačijih mehanizama kao npr. udaranje pramca o valove ili zalijevanje [33]. U proračunu zamora brodskih konstrukcija razmatraju se, za sada, samo odzivi od njihanja broda na morskim valovima – vertikalni i horizontalni momenti savijanja brodskog trupa i lokalni promjenjivi tlak od valova na vanjsku oplatu i palubu.

Sile na trup broda mogu se jednostavno odrediti poznatom metodom odsječaka (strip method). Kod ove metode brod se dijeli na prizmatične odsječke za koje se različite sile (hidrodinamički tlak, inercija, prigušne sile) računaju odvojeno primjenom dvodimenzionalne teorije strujanja fluida, a ukupna sila se dobije integracijom po duljini broda. Dvije vrlo restriktivne pretpostavke ovog postupka su linearizacija rubnih uvjeta diferencijalnih jednadžbi strujanja fluida, te linearizacija jednadžbi gibanja broda. S ovim pretpostavkama sustav brod – valovi postaje linearan, te se rješenje sustava (spektar odziva) lako dobiva u frekventnom području linearnom superpozicijom odziva na pravilnim valovima

Veza spektra valova i spektra odziva ostvarena je preko prijenosnih funkcija opterećenja ili tzv. amplitudnih operatora odziva – RAO (Response Amplitude Operator). Prijenosna funkcija $\Phi(\omega)$, koja za različite frekvencije modelira odziv pravilnog sinusoidnog vala jedinične amplitude, obično se određuje proračunima baziranim na jednadžbama njihanja broda primjenom linearne potencijalne teorije valova ili eksperimentalno ispitivanjima modela u bazenima.

Za zadani smjer i brzinu broda, potrebne su dvije valne pozicije (pomaknute u fazi za 90°) za proračun opterećenja. Ukupni broj slučajeva opterećenja može biti vrlo velik (2 x broj valnih perioda x broj smjerova valova).

Metoda dvodimenzionalnih odsječaka daje zadovoljavajuće rezultate za male valove i male amplitude odziva za sile na trup broda ili za odziv njihanja broda, ali, zbog pretpostavke linearnosti sustava brod–valovi, ne daje dovoljno točne vrijednosti za djelovanje tlaka na brodsku konstrukciju u slučaju ekstremnih vanjskih uvjeta [34],[35].

Nelinearni odzivi od opterećenja tlaka mora na brodsku oplatu, mogu se dobiti primjenom teorije odsječaka drugog reda, primjenom kvazistacionarnog uskopojasnog nelinearnog modela [36] ili dugotrajnom simulacijom u vremenskoj domeni [37].

Primjenom teorije odsječaka drugog reda problemi nelinearne dodatne mase i prigušne sile na valovima mogu se riješiti u frekventnom području pomoću tzv. Volterrinog modela drugog reda, uz pretpostavku da ovise o kvadratu valne amplitude. Volterrin model drugog reda je u osnovi statistička metoda za rješavanje kvadratnih odnosa veličina u stacionarnom stohastičkom procesu [38]. Prednosti ovog postupka su:

- formulacija problema u frekventnom području, što znači da se upotrebljava ispravna frekvencijska zavisnost dodatne mase i prigušenja,
- metoda je generalizacija linearne metode odsječaka, pa je linearno rješenje identično za obje metode,
- lako se uključuju vibracije trupa,
- neki efekti udaranja pramca o valove su uključeni,
- metoda je proračunski brza.

Nedostaci postupka su:

- u primjeni kod ekstremnih vanjskih uvjeta; u tom slučaju je pretpostavka kvadratne ovisnosti sila o valnoj amplitudi nedovoljno dobra,
- ograničena je na simetrične vertikalne odzive (poniranje, posrtanje, vertikalni momenti savijanja); nedostatak je u tome da se kod velikih brodova koji plove koso na valove javljaju horizontalni momenti savijanja trupa istog reda veličine kao i vertikalni momenti.

Alternativni postupak nelinearne analize opterećenja je primjena kvazistacionarnog uskopojasnog nelinearnog modela, koji se može primijeniti na manje pravilne nelinearnosti nego metoda odsječaka drugog reda. Ovaj pristup se pokazao pogodnim za analizu zamora, obzirom da daje zadovoljavajuću točnost, a jedonstavniji je od simulacije u vremenskom području [38].

Ideja je zadavanje sinusoidnog vala:

$$\zeta(t) = \zeta_a \cos\phi, \quad \phi = \omega t + \varepsilon, \tag{2.9}$$

i pronalaženje odgovarajućeg stalnog stanja (steady-state) nelinearnog odnosa sile i odziva (tj. nakon nekog vremena odziv postaje periodičan s valnom frekvencijom):

$$X(t) = X(\zeta_a, \omega, \varepsilon) \tag{2.10}$$

Iako odziv nije više sinusoidan pretpostavlja se da će X(t) pokazivati periodičko ponašanje stalnog–stanja. X(t) se radije smatra funkcijom faznog pomaka valova ε nego apsolutnog vremena t. Vremenske promjene duljine Δt su ekvivalentne faznim promjenama $\Delta \varepsilon = \omega \Delta t$. Jedan ciklus stalnog–stanja odziva predstavlja prijenosnu funkciju $x(\zeta_a, \omega, \varepsilon)$ za određenu valnu frekvenciju ω . Odziv se onda računa rješavanjem nelinearnih jednadžbi gibanja [38]:

$$\begin{bmatrix} \int_{L} f_{1}(x) dx & \int_{L} x \cdot f_{1}(x) dx \\ -\int_{L} x \cdot f_{1}(x) dx & \int_{L} x^{2} \cdot f_{1}(x) dx \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{w} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_{L} f_{2}(x) dx \\ \int_{L} x \cdot f_{2}(x) dx \end{bmatrix},$$
 (2.11)

gdje je:

w - poniranje, $\theta - \text{posrtanje,}$ L - duljina broda, $f_1(x) = m_{\text{H}}(x, \overline{z}) + m_{\text{s}}(x) + \rho d(x, \overline{z}) B_{\text{d}}(x),$ $f_2(x) = \left[\frac{\partial m_{\text{H}}(x, \overline{z})}{\partial \overline{z}} \cdot (\dot{w}) + x\dot{\theta} + \kappa(x)\dot{\zeta}(x, t) - v\frac{\partial m_{\text{H}}(x, \overline{z})}{\partial x} + N_{\text{H}}(x, \overline{z})\right],$

ms – masa odsječka po jedinici duljine,

 $d(x,\overline{z})$ – visina vode na palubi,

 $B_{\rm d}(x)$ – širina palube,

 κ – Smithov faktor korekcije,

 \overline{z} – razlika između apsolutnog pomaka broda u vertikalnom smjeru i razine mora,

N_H – prigušenje,

 $m_{\rm H}$ – dodatna masa vode po jedinici duljine,

- x udaljenost po duljini broda,
- v brzina broda.

2.2.1.4 Određivanje odziva konstrukcije

U ovoj fazi potrebno je odrediti prijenosne funkcije naprezanja za svaku kritičnu lokaciju transformacijom prethodno određenih prijenosnih funkcija opterećenja (npr. $\Phi_M(\omega)$ za momente savijanja i $\Phi_p(\omega)$ za tlak valova). Takva transformacija općenito zahtijeva potpunu trodimenzionalnu analizu brodske konstrukcije kojom se dobiju naprezanja za svaki pravilni val jedinične amplitude. Općenito se smatra da su prijenosne funkcije opterećenja i prijenosne funkcije naprezanja istovrsnog oblika za razmatrani raspon frekvencija te se potrebna strukturna analiza izvodi na računalima kao statička, linearna, elastična analiza metodom konačnih elemenata.

Kada su poznate prijenosne funkcije naprezanja, odziv konstrukcije može se prikazati u obliku spektra naprezanja, koji se određuje iz spektra valova pomoću prijenosnih funkcija naprezanja:

$$S_{\sigma}(\omega_{\rm e}) = \left| \Phi_{\sigma}(\omega_{\rm e}) \right|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega_{\rm e})$$
(2.12)

gdje je:

 ω_e – frekvencija susretanja.

Prijenosne funkcije i spektar valova potrebno je izraziti preko frekvencije susretanja umjesto preko valne frekvencije. Kako je prijenosna funkcija naprezanja za valnu frekvenciju ω određena za specifične operativne uvjete: brzinu broda *v*, gaz *d* i smjer napredovanja broda obzirom na valove ϕ , vrijednosti ordinata ostaju nepromijenjene, a apscisa se transformira sa [39]:

$$\omega_{\rm e} = \omega - 2\pi\omega^2 \frac{v}{g} \cos(\phi). \qquad (2.13)$$

Za valni spektar vrijedi da je nezavisan o operativnim uvjetima i energija spektra valova na bazi frekvencije susretanja i frekvencije valova mora biti ista, tj:

$$\int S_{\zeta}(\omega_{\rm e}) d\omega_{\rm e} = \int S_{\zeta}(\omega) d\omega.$$
(2.14)

Transformacija se vrši preko formula (2.13) i:

$$S_{\zeta}(\omega_{\rm e}) = \frac{S_{\zeta}(\omega)}{1 - 4\pi \frac{\nu}{g} \omega \cdot \cos(\phi)}$$
(2.15)

Proračun odziva konstrukcije potrebno je provesti za veliki broj različitih stanja opterećenja: različite kombinacije savijanja trupa i lokalnog opterećenja tlaka valova s raznim

operativnim uvjetima broda – brzina broda, smjer napredovanja obzirom na valove, gaz – balast ili nakrcan brod. U praksi se ipak razmatra samo ograničeni broj stanja opterećenja.

Za jedan tanker može se, npr., uzeti: 2 tipa opterećenja (momenti savijanja trupa i lokalni tlak valova), gdje se za svaki tip opterećenja promatraju 2 stanja gaza (nakrcan brod i balast), jedna brzina broda v, 8 smjerova valova θ (u razmacima od 45°). Ukoliko brod plovi kroz, npr., 4 zone (4 spektra valova), te se za svaku zonu promatra 12 značajnih visina valova $\overline{H}_{1/3}$ (familija spektara valova), ukupni broj spektara odziva koje treba proračunati je:

2 x 2 x 1 x 8 x 4 x 12 = 1536!

2.2.1.5 Određivanje dinamičke izdržljivosti konstrukcije

Dinamička izdržljivost zavarenih spojeva uobičajeno se daje preko S–N (Wöhlerovih) krivulja. S–N krivulje daju odnos između broja ciklusa naprezanja do loma *N* i raspona nazivnog naprezanja $\Delta \sigma$: $(\Delta \sigma)^m \cdot N = C$, gdje su *m* i *C* konstante S–N krivulje ovisne o materijalu i tipu zavara, tipu opterećenja i okolnim uvjetima. Raspon naprezanja definira se kao razlika najvećeg gornjeg naprezanja ciklusa σ_{max} i najvećeg donjeg naprezanja ciklusa σ_{min} : $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$.



Slika 2.5: Tipična S–N krivulja u log–log skali [40]

S–N krivulje se određuju pokusima na uzorcima (epruvete), koji se podvrgavaju promjenjivom naprezanju konstantne amplitude do loma, a životni vijek (vijek trajanja spoja) definira se kao broj ciklusa do loma. Najveće promjenjivo naprezanje koje uzorci izdrže bez pojave loma nakon praktički beskonačnog broja ciklusa – predočeno graničnim brojem ciklusa N_d – naziva se dinamička izdržljivost R_d . Kod brodograđevnih (konstrukcijskih) čelika, S–N krivulja se asimptotski približava vrijednosti dinamičke izdržljivosti. Uobičajena vrijednost graničnog broja ciklusa za čelik je $N_d = 10^7$ ciklusa. Odgovarajuće S–N krivulje utvrđuju se za svaki detalj konstrukcije. Ovaj ključni dio analize zamora detaljno je opisan u poglavlju 2.5.

2.2.1.6 Proračun zamornog oštećenja

Akumulirano zamorno oštećenje D za kratkoročni period, tj. jedno stanje mora i i za određeni slučaj opterećenja j, može se odrediti iz izraza:

$$D_{ij} = N_t \int_0^\infty \frac{p(\Delta \sigma_{ij})}{N(\Delta \sigma_{ij})} d(\Delta \sigma)$$
(2.16)

gdje je:

 $\Delta \sigma_{ij}$ – raspon naprezanja s vjerojatnošću premašivanja 1/N_R, N_t – ukupni broj ciklusa za očekivanog vijeka trajanja broda, $N(\Delta \sigma_{ij})$ – broj ciklusa raspona naprezanja $\Delta \sigma_{ij}$, $p(\Delta \sigma_{ij})$ – funkcija vjerojatnosti raspona naprezanja.

Uz pretpostavku da je valni spektar uskopojasni, što je opravdano za brodsku konstrukciju [37], raspon naprezanja za svaki kratkoročni period slijedi Rayleighovu razdiobu:

$$p\left(\Delta\sigma_{ij}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{\sigma_{ij}^{2}}{8m_{0}}\right), \qquad (2.17)$$

gdje je:

 m_0 spektralni moment nultog reda.

U pristupu preko S–N krivulja, procjena zamora se osniva na pretpostavci da je potrebno razmatrati samo raspone promjenjivih naprezanja za određivanje dinamičke izdržljivosti, jer njihov stalni (nepromjenjivi) dio nema utjecaja na razliku koja definira raspon naprezanja.

Naprezanja σ_{ij} , određuju se za svaki pojedini slučaj opterećenja i sumiraju uzimajući u obzir fazni pomak komponenti naprezanja. Za svaki kratkoročni period stanja mora, rezultirajuće naprezanje za određenu valnu amplitudu ζ_a i frekvenciju ω određuje se za npr. za 4 tipa opterećenja na način:

$$\sigma_{ij}(\zeta_{a},\omega,\varepsilon) = \sigma_{savijanja trupa} + \sigma_{lok. deformacija} + \sigma_{unutarnji tlak} + \sigma_{vanjski tlak} .$$
(2.18)

Raspon naprezanja je onda:

$$\Delta \sigma = \max \left[\sigma_{ij} (\zeta_{a}, \omega, \varepsilon) \right] - \min \left[\sigma_{ij} (\zeta_{a}, \omega, \varepsilon) \right], \qquad (2.19)$$

gdje je:

 $\epsilon \in [0, 2\pi]$ – fazni pomak.

Kod određivanja dugoročnog zamornog oštećenja moraju se uzeti u obzir trajanje pojedinog stanja mora T (ruta plovidbe), manevriranje broda, promjena brzine broda v, pa je *očekivano* oštećenje [38]:

$$E[D] = \frac{T}{C} \iint_{\overline{H}_{1/3}} \iint_{\overline{T}} \iint_{\zeta \Omega} \iint_{v \Theta} v \left(S_{\zeta} \left(\zeta_{a}, \omega, \varepsilon, \phi \right) \right)^{m} f \left(\zeta_{a}, \omega \middle| \overline{H}_{1/3}, \overline{T} \right) \cdot f \left(v, \phi \middle| \overline{H}_{1/3}, \overline{T} \right) f \left(h_{1/3}, t \right) d\zeta d\omega dh_{1/3} dt dv d\phi$$

$$(2.20)$$

gdje je:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} ,$$

C, m – konstante izabrane S–N krivulje,

 $f(\zeta_a, \omega | \overline{H}_{1/3}\overline{T})$ –funkcija raspodjele valne amplitude ζ_a i frekvencije ω određenog stanja mora,

$$f\left(v,\phi\middle|\overline{H}_{1/3}\overline{T}\right)$$
 – uračunava utjecaj manevriranja broda.

Koristeći spektralni pristup, moguće je proračunati zamorno oštećenje za svaku rutu, ako su poznati valni podaci (spektri valova) za određenu rutu.

2.2.2 Pojednostavljeni (deterministički) postupak proračuna zamora

Proračun zamornog oštećenja se i kod pojednostavljene metode zasniva na upotrebi S–N krivulja u sprezi s Palmgren–Minerovim pristupom akumuliranja zamornog oštećenja, koji zanemaruje složene aspekte mehanike loma (nastanak i rast pukotine). Jedna od najvažnijih pretpostavki ovog postupka je nezavisnost zamornog vijeka o redoslijedu opterećenja brodske konstrukcije.

Palmgren–Minerovo pravilo kaže da ukoliko oštećenje od jednog ciklusa raspona naprezanja $\Delta \sigma_i$ iznosi $1/N_i$, gdje je N_i srednji zamorni vijek kod konstantne amplitude raspona naprezanja $\Delta \sigma_i$, onda se kumulativno oštećenje *D* uzrokovano rasponima naprezanja $\Delta \sigma_1$, $\Delta \sigma_2$, ... $\Delta \sigma_n$ primijenjeno u n_1 , n_2 , ... n_k ciklusa, može odrediti superpozicijom i iznosi [8]:

$$D = \sum_{i=1}^{i=n_{k}} \frac{n_{i}}{N_{i}}$$
(2.21)

gdje je:

 $n_{\rm i}$ – broj ciklusa raspona naprezanja $\Delta \sigma_{\rm i}$ u intervalu *i*,

 $N_{\rm i}$ – broj ciklusa do loma u intervalu *i*,

 $n_{\rm k}$ – broj intervala jednake duljine na koji se dijeli ukupni broj ciklusa.

Za određeni spektar odziva je:

$$n_{\rm i} = N_{\rm u} \cdot p_{\rm r} \left(\sigma_{\rm i}\right) \Delta \sigma_{\rm r}, \qquad (2.22)$$

gdje je:

 $N_{\rm u}$ – ukupni broj ciklusa u spektru odziva, $p_{\rm r}(\sigma_{\rm i})$ – vjerojatnost razine naprezanja $\sigma_{\rm i}$, $\Delta\sigma_{\rm r}$ – veličina intervala spektra odziva [39].

Uvođenjem određene S–N krivulje, za koju je omjer raspona naprezanja i broja ciklusa do popuštanja linearan:

$$N \cdot \left(\Delta\sigma\right)^{m} = C \tag{2.23}$$

gdje je:

N – broj ciklusa do popuštanja (loma),

 $\Delta \sigma$ – raspon naprezanja popuštanja kod *N* ciklusa,

C-konstanta S-N krivulje,

m – obrnuti nagib S–N krivulje.

Kada $\Delta \sigma_r \rightarrow 0$ dobije se:

$$D = \frac{N_{\rm u}}{C} \int_{0}^{\infty} \Delta \sigma^{\rm m} p(\sigma_{\rm i}) d\sigma_{\rm r} = \frac{N_{\rm u}}{C} E(\Delta \sigma^{\rm m})$$
(2.24)

gdje je:

 $E(\Delta \sigma^{\rm m})$ očekivana vrijednost (statističko očekivanje) $\Delta \sigma^{\rm m}$.

Osnovna razlika pojednostavljenog i spektralnog postupka proračuna zamora je u načinu određivanja dugoročne raspodjele naprezanja. Usporedbom dugoročnih raspodjela naprezanja mjerenih na različitim tipovima brodova s dugoročnim ekstrapolacijama primjenom raznih razdioba vjerojatnosti, utvrđeno je da se dugoročna raspodjela naprezanja brodske konstrukcije od slučajnog valnog opterećenja može približno prikazati dvoparametarskom Weibullovom razdiobom vjerojatnosti [40]. Funkcija gustoće vjerojatnosti Weibullove razdiobe je:

$$p(\sigma) = \frac{k}{\Delta\sigma_{\rm R}} \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{\rm R}}\right)^{\rm k-1} {\rm e}^{-\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{\rm R}}\right)^{\rm k}}$$
(2.25)

gdje je:

 $\Delta \sigma$ – raspon naprezanja,

k – parametar oblika Weibullove razdiobe,

 $\Delta \sigma_{\rm R}$ – ekstremni raspon naprezanja koji se očekuje u $N_{\rm R}$ ciklusa, tj. s vjerojatnošću premašivanja $1/N_{\rm R}$,

 $N_{\rm R}$ – broj ciklusa koji odgovara razini vjerojatnosti premašivanja $1/N_{\rm R}$.

Uz ovu pretpostavku može se pokazati da je zamorno oštećenje D:

$$D = \frac{\alpha_{\rm i} N_{\rm L}}{C} \frac{\Delta \sigma_{\rm R}^{\rm m}}{\left(\ln N_{\rm R}\right)^{\rm m/k}} \mu \cdot \Gamma \left(1 + \frac{m}{k}\right)$$
(2.26)

gdje je:

 $N_{\rm L}$ – ukupni broj ciklusa za života broda. Ova vrijednost je u pravilu između $0.5 \cdot 10^8$ do $0.7 \cdot 10^8$ ciklusa za vijek trajanja broda od 20 godina, računa se po formuli:

$$N_L = \frac{\alpha_0 T_{\text{proj}}}{4 \log(L)},\tag{2.27}$$

 α_0 – koeficijent koji uračuava vrijeme potrebno za ukracaj/iskracaj, popravke, itd. U pravilu se uzima $\alpha_0 = 0.85$,

T_{proj} – projektni vijek broda,

L – duljina broda,

μ – koeficijent koji uzima u obzir promjenu nagiba S–N krivulje,

$$\mu = 1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{k}, \nu\right) - \nu^{-\Delta m_{k}} \cdot \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{k}\right), \nu\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{k}\right)}, \quad (2.28)$$
$$\nu = \left(\frac{\Delta \sigma_{q}}{\Delta \sigma_{R}}\right)^{\xi} \cdot \ln\left(N_{R}\right) \quad (2.29)$$

 $\Delta \sigma_q$ – raspon naprezanja na spoju dva segmenta S–N krivulje,

 Δm – promjena nagiba između gornjeg i donjeg segmenta S–N krivulje,

 Γ (*x*) – Eulerova gama funkcija definirana integralom:

$$\Gamma(x) = \int_{0}^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt , \text{ za } x > 0, \qquad (2.30)$$

 $\gamma(a,x)$ – nepotpuna gama funkcija definirana sa:

$$\gamma(a,x) = \int_{x}^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt . \qquad (2.31)$$

 α_1 – dio životnog vijeka nakrcanog broda, (Tablica 2.1), α_2 – dio životnog vijeka broda u balastu, (Tablica 2.1).

Tip broda	Nakcran brod	Balast
Tankeri	$\alpha_1 = 0.5$	$\alpha_2 = 0.5$
Brodovi za rasuti teret	$\alpha_1 = 0.6$	$\alpha_2 = 0.4$
Kontejnerski brodovi, brodovi za opći teret	$\alpha_1 = 0.75$	$\alpha_2 = 0.25$

Tablica 2.1: Vrijednosti koeficijenata α za razne tipove brodova [41]

U pojednostavljenom postupku zapis opterećenja opisuje se globalnim silama i valnim tlakom u poprečnim presjecima po duljini broda s određenom vjerojatnošću premašivanja i zadanom funkcijom vjerojatnosti za dugoročnu razdiobu. Rasponi naprezanja mogu se proračunati na osnovi analize samo nekoliko slučajeva opterećenja. Po svojoj jednostavnosti postupak je usporediv s postupcima uključenim u pravila registara (rule–based approach) koji predstavljaju proračun zamora po iskustvenim formulama klasifikacijskih društava. U praksi se susreće i jedna modifikacija ove metode – tzv. metoda projektnog vala (design wave method) kod koje se opterećenja definiraju valom koji ima određenu vjerojatnost premašivanja i koji daje maksimalan odziv [39]. Potrebno je proračunati odziv za nekoliko projektnih valova. U praksi se za svaki odziv analizira nekoliko valnih frekvencija u kombinaciji s različitim smjerovima napredovanja.

Prednosti pojednostavljenog postupka su jednostavnost proračuna uz dobivanje prihvatljivih rezultata u praksi. Pojednostavljeni postupak može uključiti sve relevantne efekte uključujući i nelinearnosti. S druge strane nedostatak su potrebni eksperimentalni podaci pa se problemi javljaju kod primjene ovog načina proračuna zamora na nove tipove brodova.

2.2.3 Analiza u vremenskom području

Numerička simulacija procesa opterećenja je posebno realistična u vremenskom području. Analiza brodske konstrukcije može se provesti na sličan način kao i kod spektralnog postupka, u smislu određivanja odziva konstrukcije na valna i druga opterećenja. U numeričkoj simulaciji, slučajna opterećenja generiraju se upotrebom valnog spektra, a proces opterećenja i rezultirajuće naprezanje se analiziraju kroz neki određeni vremenski period ili za čitav životni vijek brodske konstrukcije. Ovaj način analize ima dva pristupa obzirom na način određivanja prijenosnih funkcija – analiza za pravilne i za slučajne valove [25].

U prvom pristupu, preko pravilnih valova, prijenosne funkcije odziva se lineariziraju za odabrane valne visine. Nakon proračuna prijenosnih funkcija odziva proračun se dalje nastavlja kao spektralna metoda.

U drugom pristupu prijenosne funkcije odziva određuju se upotrebom slučajnih valova u vremenskom području. U praksi se numerički vremenski zapisi računaju za nekoliko stanja mora. Prijenosne funkcije se ponovo koriste za proračun spektra odziva i postupak se dalje nastavlja kao spektralna metoda. Metoda ima nedostatak u velikoj količini računanja [37].

2.3 Opterećenja brodske konstrukcije u procjeni zamora

Zamorna oštećenja zavarenih spojeva brodske konstrukcije posljedica su djelovanja niza promjenjivih opterećenja. Obzirom na to kako se mijenjaju s vremenom razlikujemo tri tipa opterećenja:

- opterećenja *niske učestalosti* sva opterećenja na 'mirnoj vodi', tj. promjene vanjskog i unutarnjeg tlaka (uzgon i ukrcani tereti) koje dolaze od različitih stanja krcanja broda; temperaturne promjene, opterećenja kod dokovanja broda,
- opterećenja srednje učestalosti valovima izazvana dinamička raspodjela tlaka na trupu broda uslijed nailaženja valova i gibanja broda, zapljuskivanje tekućih tereta, zapljuskivanje valova na bokove broda i pramčani dio palube, inercijska opterećenja
 posebno na jarbolima i drugim produljenim strukturama, kao i na palubama na mjestima spoja za kontejnere i druge teške objekte; opterećenja kod porinuća, opterećenja kod lomljenja leda,
- *opterećenja visoke učestalosti* udaranje pramca o valove, prisilne (mehaničke) vibracije od rada glavnog i pomoćnih motora, promjene tlaka od rada vijka, pružanje broda.

U procjeni zamora razmatraju se samo opterećenja koja su posljedica promjena stanja krcanja broda, vanjski hidrodinamički tlak od valova i unutarnja inercijska opterećenja. Valovima izazvana opterećenja uključuju globalna i lokalna opterećenja koja se računaju po kriterijima klasifikacijskih društava. Pretpostavlja se da se dinamička opterećenja, koja izazivaju zamorno oštećenje, kao npr. udaranje pramca o valove, mogu izbjeći manevriranjem ili promjenom rute broda i brzine broda, pa se ne uzimaju obzir kod standardne analize zamora. Utjecaj dinamičkih opterećenja na zamorno oštećenje zahtijeva daljnje istraživanje.

Kako je zamor proces akumuliranja oštećenja u konstrukciji podvrgnutoj promjenjivim naprezanjima, primijenjena opterećenja na konstrukciju služe za određivanje raspona naprezanja za različita stanja krcanja. Analiza zamora provodi se za stanja krcanja koja će brod imati u službi. Ukoliko ne postoje posebni zahtjevi općenito je dovoljno provesti analizu zamora za dva stanja krcanja: nakrcan brod i balastno stanje [41].

Za gore navedena opterećenja, svaka komponenta nema nužno najvjerojatniju ekstremnu vrijednost istovremeno s ostalim komponentama. Za proračun zamora je bitna kombinacija
različitih opterećenja – takva da daje maksimalne vrijednosti raspona naprezanja. Stoga, komponente opterećenja treba kombinirati s različitim faznim pomacima za različite dijelove brodske konstrukcije. Nadalje, gdje je to potrebno treba uključiti i naprezanja od relativnih otklona primarnih konstruktivnih elemenata u analizu naprezanja.

2.4 Naprezanja u procjeni zamora

Određivanje raspona naprezanja potrebnih za procjenu zamornog oštećenja može se provesti na više načina. To se može napraviti testiranjem fizičkih modela, metodom konačnih elemenata, klasičnim analitičkim proračunom ili empirijskim formulama. Svaka metoda varira u točnosti dobivenih vrijednosti naprezanja, ovisno o složenosti razmatrane konstrukcije i opterećenju. Čak i najčešće upotrebljavana metoda konačnih elemenata, koja se smatra visoko pouzdanom, može dati značajno različite rezultate ovisno o primijenjenoj veličini mreže, vrsti elemenata i proračunskom opterećenju [4]. Razlike u vrijednostima naprezanja vode do još većih razlika u proračunu zamornog oštećenja jer je ono funkcija naprezanja na treću ili višu potenciju, stoga je vrlo važno upotrijebiti odgovarajuće naprezanje u procjeni zamora. *Odgovarajuće* naprezanje ne znači nužno najtočnije naprezanje dobiveno testiranjima modela ili metodom konačnih elemenata, već je to prije *primjereno* naprezanje u skladu s odabranom S–N krivuljom. Drugim riječima, proračunato naprezanje za određeni detalj konstrukcije treba *blisko nalikovati* jednom od testnih uzoraka za koje je ustanovljena S–N krivulja.

Ovisno o vrsti naprezanja koja se koristi u proračunu, procjena zamora može se provesti na tri načina, a naprezanja koja se pritom koriste su [41]:

- Nazivno naprezanje (nominal stress),
- Žarišno naprezanje (hot-spot stress, structural stress, geometric stress),
- Vršno naprezanje (notch stress, peak stress)

2.4.1 Nazivno naprezanje

Nazivno naprezanje se definira kao opće naprezanje (general stress) u konstrukcijskom elementu, proračunato po teoriji čvrstoće na temelju primijenjenih opterećenja i karakteristika poprečnog presjeka elementa. U primjeni ovog postupka najčešću poteškoću predstavlja odrediti što je nazivno naprezanje u datom slučaju.

Za gredni element nazivno naprezanje sastoji se od normalnog naprezanja σ_n u uzdužnom smjeru kao i od srednjeg smičnog naprezanja τ_n u struku grede:

$$\sigma_{n} = \frac{F}{A} + \frac{M}{I} \cdot z$$

$$\tau_{n} = \frac{Q}{A_{s}}$$
(2.32)
(2.33)

gdje su:

F, Q, M – aksijalna sila, smična sila i moment savijanja,

 A, A_s, I – površina poprečnog presjeka, smična površina i moment tromosti,

z – udaljenost od promatrane točke do neutralne osi.



Slika 2.6: Primjer nazivnih naprezanja u grednoj komponenti

Karakteristike poprečnog presjeka uzimaju u obzir ukupne geometrijske promjene detalja (izrezi, suženja, promjene dimenzija, neporavnatosti, itd.). Koncentracije naprezanja od zavara, kao i od naglih promjena u geometriji (strukturni diskontinuiteti, prisutnosti dodataka) nisu uključeni u proračun naprezanja. Ovi utjecaji uključeni su izborom odgovarajuće S–N krivulje.

Nazivna naprezanja se osim po teoriji grede mogu računati i metodom konačnih elemenata, ali treba posvetiti osobitu pozornost mreži koja bi trebala biti jednolika s glatkim prijelazima (treba izbjegavati nagle promjene). Pokazalo se da je nepotrebno, a često i nepoželjno, upotrijebiti vrlo finu mrežu za model [4].

2.4.2 Žarišno (hot-spot) naprezanje

Žarišno naprezanje je ono naprezanje u zamoru izloženom mjestu konstrukcije, u žarišnoj točki (hot-spot), gdje mogu nastati pukotine. Ovo naprezanje uključuje koncentracije naprezanja uslijed strukturnih diskontinuiteta i prisutnosti dodataka. Točna geometrija zavara kao i nelinearno zarezno naprezanje uslijed lokalnog zareza u korijenu zavara su zanemareni, jer je njihov proračun vremenski vrlo zahtjevan i geometrija zavara obično se ne zna unaprijed, iako može proizlaziti iz dokumentacije. Treba naglasiti da žarišno naprezanje predstavlja prosječno naprezanje u blizini zavara, tj. ono je u stvari 'nazivno' naprezanje za zavarene lokacije. Upotreba žarišnog naprezanja pogodnija je za slučajeve kada se nazivno naprezanje ne može jasno definirati zbog kompliciranih geometrijskih efekata i onda kada promatrani strukturni detalj nije

usporediv s nijednim klasificiranim detaljem, jer primjena ovog tipa naprezanja pretpostavlja upotrebu jedne, tzv. hot-spot S–N krivulje za određivanje zamornog oštećenja različitih detalja – za razliku od nazivnog kod kojeg se za svaki detalj upotrebljava odgovarajuća S–N krivulja. Upotreba samo jedne krivulje za sve kategorije detalja je vrlo značajno pitanje koje zahtijeva daljnja istraživanja.

U raznim studijama žarišno naprezanje definira se kao maksimalno naprezanje zadanog spoja izuzimajući zarezno naprezanje od korijena zavara. Ovako definirano žarišno naprezanje može se mjeriti ekstenzometrima.

Uobičajeni način određivanja žarišnog naprezanja je proračun metodom konačnih elemenata. Složena geometrija zavarenog spoja može se modelirati 2D ili 3D konačnim elementima, uz primjenu mreže pogodne veličine. Treba naglasiti da je raspodjela naprezanja u kritičnom dijelu, u blizini korijena zavara, vrlo zavisna o mreži konačnih elemenata koja se koristi. Nedosljedne definicije mogu rezultirati u bitno različitim žarišnim naprezanjima, i dovesti do još većih razlika u proračunatom zamornom oštećenju.

Naprezanja dobivena na ovaj način ne daju direktno žarišno naprezanje za proračun oštećenja već samo raspodjelu naprezanja u blizini korijena zavara. Jedan od načina dobivanja traženog žarišnog naprezanja je ekstrapolacijom rezultata dobivenih metodom konačnih elemenata. Postupak je sljedeći:

- primjenom relativno fine mreže u blizini ruba zavara s elementima veličine debljine lima t dobije se dovoljno dobra raspodjela naprezanja,
- vrijednosti naprezanja na udaljenosti t/2 i 3t/2 od ruba zavara se odrede interpolacijom (npr. Lagrangeova interpolacija),
- žarišno naprezanje se onda odredi linearnom ekstrapolacijom do ruba zavara pomoću naprezanja određenih u prethodne dvije točke.



Slika 2.7: Definicija žarišnog naprezanja [41]

Kod limova i ljuski, žarišno naprezanje σ_s može se definirati i izračunati jednostavno, jer je naprezanje na gornjoj površini lima jednako sumi membranskog naprezanja σ_m i naprezanja savijanja σ_b :

$$\sigma_{\rm s} = \sigma_{\rm m} + \sigma_{\rm b} \tag{2.34}$$



Slika 2.8: Žarišno naprezanje u limu [25]

2.4.3 Vršno (notch) naprezanje

Pod vršnim naprezanjem podrazumijeva se lokalno povećano naprezanje u zarezu, tj. u korijenu zavara ili na rubovima izreza. U ovo naprezanje uračunate su koncentracije naprezanja od geometrije konstrukcije kao i od prisutnosti zavara. Vršno naprezanje za jedan sučeljeni zavareni spoj limova, za razliku od žarišnog naprezanja, uključuje dodatnu, nelinearnu, komponentu naprezanja σ_{nl} :

$$\sigma_{k} = \sigma_{m} + \sigma_{b} + \sigma_{nl} \tag{2.35}$$



Slika 2.9: Zarezno naprezanje u korijenu zavara [25]

Postupak procjene zamora koji se osniva na vršnom naprezanju upotrebljava samo jednu S–N krivulju za sve tipove detalja. Ta krivulja nije ista kao S–N krivulja koja se upotrebljava kod primjene žarišnog naprezanja.

2.4.4 Faktori koncentracije naprezanja

Izvori koncentracija naprezanja su brojni: geometrija konstrukcije, lokalni zarezi, netočnosti izrade, itd., pa je kod proračuna zamora nužno uz izbor jedne od navedenih vrsta naprezanja za proračun uključiti i sve utjecaje koncentracije naprezanja. Kod proračuna naprezanja potrebno je definirati koji efekti se moraju analizirati za promatrani detalj. U određenim slučajevima, efekti mogu biti izraženi preko faktora koncentracije naprezanja. Treba naglasiti da su za detalje čiji se proračun osniva na nazivnom naprezanju, efekti povećanja naprezanja uključeni u kategoriju detalja.

Veza između nazivnih i žarišnih naprezanja dana je preko geometrijskog faktora koncentracije naprezanja K_s , koji uključuje efekte povećanja naprezanja uslijed geometrijskih nepravilnosti u spojevima:

$$K_{s} = \frac{\sigma_{s}}{\sigma_{n}}$$
(2.36)

Slika 2.10: Naprezanja kod nepravilno zavarenih spojeva [25]

Kada se iz nazivnog naprezanja želi odrediti zarezno naprezanje potrebno je osim geometrijskih nepravilnosti uračunati i povećanje naprezanja od prisutnosti zavara. To se postiže pomoću faktora koncentracije naprezanja K_w uslijed zavara:

$$\sigma_{\rm k} = K_{\rm g} \cdot K_{\rm w} \cdot \sigma_{\rm n} \tag{2.37}$$

Ove formule se mogu primijeniti samo za tipove strukturnih detalja za koje su poznati faktori koncentracije naprezanja. Faktori koncentracije naprezanja uglavnom se određuju mjerenjima i proračunom detalja metodom konačnih elemenata, ili nekim od novijih postupaka kao [42].

Tipična povećanja naprezanja izazvana strukturnom geometrijom (izrezi, krajevi ukrepa, itd.) prikazani su na slici 2.11:

Slika 2.11: Primjeri povećanja naprezanja uslijed geometrije detalja [25]

2.5 Projektne S–N krivulje (Wöhlerove krivulje)

Izdržljivost zavarenih čeličnih spojeva obzirom na zamorno oštećenje dana je preko S–N krivulja koje povezuju primijenjeni raspon naprezanja konstantne amplitude s brojem ciklusa do loma. Za brodske konstruktivne detalje S–N krivulje definirane su formulom (2.23).

Eksperimentalne S–N krivulje definirane su srednjim zamornim vijekom i standardnom devijacijom. Srednja S–N krivulja znači sa će se za raspon naprezanja $\Delta\sigma$ detalj konstrukcije slomiti s vjerojatnošću $p_s = 50\%$ nakon N ciklusa opterećenja.



Slika 2.12: Srednja S–N krivulja [25]

S–N krivulje koje se primjenjuju u procjeni zamornog vijeka brodskih strukturnih detalja predstavljaju dvije standardne devijacije ispod srednje linije, što odgovara vjerojatnosti preživljavanja detalja od 97,5%.

Za određivanje dinamičke izdržljivosti konstruktivnih detalja primjenjuju se dva skupa S–N krivulja: U.K. HSE S–N krivulje (Health and Security Executive, Velika Britanija) [40] i IIW S–N krivulje (International Institute of Welding) [43].

2.5.1 HSE S–N krivulje

Ove krivulje dobivene su eksperimentalnim ispitivanjima i teorijskim podacima o zamornim osobinama zavarenih cjevastih spojeva i spojeva limova. HSE S–N krivulje su podijeljene u osam klasa ovisno o:

- geometrijskom uređenju detalja
- smjeru promjenjivog naprezanja obzirom na detalj
- metodi izrade i inspekcije detalja

Klase krivulja označene su: B, C, D, E, F, F2, G i W. Svih osam krivulja imaju dva nagiba, a nagibe mijenjaju kod $N = 10^7$ ciklusa.

Konstanta nagiba *m* ima vrijednosti:

m = 3 za $N \le 10^7$ ciklusa m = 5 za $N > 10^7$.

Konstanta krivulje *C* dana je u Tablici 2.2 za svih osam krivulja.

Klass S. N. krivulio	Konstanta C		
Klasa 5–10 klivulje	$N \le 10^7 (m = 3)$	$N \ge 10^7 (m = 5)$	
В	$5.800 \ge 10^{12}$	$4.034 \ge 10^{16}$	
С	3.464 x 10 ¹²	$1.708 \ge 10^{126}$	
D	$1.520 \ge 10^{12}$	$4.329 \ge 10^{15}$	
Е	$1.026 \ge 10^{12}$	2.249×10^{15}	
F	6.319 x 10 ¹¹	$1.002 \ge 10^{15}$	
F2	$4.330 \ge 10^{11}$	5.339 x 10 ¹⁴	
G	2.481 x 10 ¹¹	2.110×10^{14}	
W	9.729 x 10 ¹⁰	$4.097 \ge 10^{13}$	

Tablica 2.2: Vrijednosti C konstante (HSE S–N krivulje) [40]

Slika 2.13: HSE S–N krivulje [40]

HSE krivulje odnose se na nekorozivnu sredinu i dane su za 97,5% vjerojatnost preživljavanja. Za različite kategorije spojeva, S–N krivulje se odnose na D krivulju preko klasifikacijskog faktora, koji se koristi kao množitelj raspona naprezanja.

2.5.2 IIW S–N krivulje

Međunarodni institut za zavarivanje (IIW) ustanovio je skup S–N krivulja za različite tipove zavarenih spojeva. Ove S–N krivulje bazirane su na nazivnom rasponu naprezanja i odnose se na nekorozivne uvjete, te se odnose na vjerojatnost preživljavanja od 97,5%.

Na slici 2.x prikazane su IIW S–N krivulje koje Germanischer Lloyd i Hrvatski registar brodova koriste u proračunima zamornog oštećenja. Ove krivulje, kao i HSE krivulje, predstavljaju vezu između raspona naprezanja $\Delta \sigma$ i broja ciklusa *N*. Kao što je vidljivo sa slike, postoji 14 krivulja: 36, 40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, 140 i 160. Svaka krivulja predstavlja tzv. kategoriju detalja ($\Delta \sigma_R$) različitih zavarenih spojeva. Nagib svih krivulja je *m* = 3, a promjena nagiba u *m* = 5, javlja se kod *N* = 5 · 10⁶. Prema pravilima GL i HRB u žarišnom pristupu za određivanje zamornog oštećenja, za sve standardne kutne zavare primjenjuje se kategorija detalja $\Delta \sigma_R = 100 \text{ N/mm}^2$, tj. S–N krivulja 100. Slika 2.14: IIW S–N krivulje [43]

2.6 Utjecajni parametri zamora

Definicija osnovnih pojmova:



Slika 2.15: Uz definiciju osnovnih pojmova [44]

gdje je:

 σ_{max} – najveće gornje naprezanje ciklusa,

 σ_{min} – najveće donje naprezanje ciklusa,

 σ_a – amplituda ciklusa naprezanja,

 $\Delta \sigma$ – raspon naprezanja, $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

 $\sigma_{\rm m}$ – srednje naprezanje, $\sigma_{\rm m} = \frac{\sigma_{\rm max}}{2} + \frac{\sigma_{\rm min}}{2}$, R – omjer naprezanja, $R = \frac{\sigma_{\rm min}}{2}$

 σ_{m}



Slika 2.16: Tipovi ciklusa naprezanja i pripadajući omjeri naprezanja [25]

2.6.1 Utjecaj oblika spektra naprezanja

Velik utjecaj na vijek trajanja brodske konstrukcije obzirom na zamor ima oblik spektra naprezanja. Kod uobičajene raspodjele naprezanja po dvoparametarskoj Weibullovoj razdiobi od velikog značaja je parametar oblika *k* Weibullove razdiobe koji zavisi o dominantnom periodu odziva konstrukcije i valnoj okolini. Vrijednost parametra *k* može se pouzdano odrediti pomoću spektralne analize zamora ili mjerenjima.

U većini slučajeva, raspon naprezanja za određeni konstruktivni detalj očituje se kao kombinirani odziv naprezanja različitih komponenti opterećenja (vanjski tlak, unutarnji tlak i različiti oblici savijanja trupa). Pojedine komponente naprezanja općenito se prikazuju raznim Weibullovim razdiobama. Kombinirano naprezanje se onda određuje korelacijom između komponenti opterećenja. Ova korelacija varira ovisno o valnim uvjetima, ali za pojednostavljene metode proračuna koriste se prosječni, nazivni korelacijski faktori [4].

Weibullov prikaz kombiniranog naprezanja ne može se direktno povezati s Weibullovim prikazom komponenti opterećenja ili naprezanja zbog varijacija u korelaciji između komponenti opterećenja. Prema provedenim direktnim proračunima, parametar oblika za kombinirani odziv naprezanja tipičnog brodskog detalja bio je izvan raspona parametara oblika određenih za komponente naprezanja istog detalja, što znači da je pojednostavljena metoda proračuna, za korelirane komponente opterećenja i za parametar oblika određen za kombinirano naprezanje, ograničene točnosti. Komponente opterećenja i pripadajući Weibullovi parametri, kao i korelacijski faktori između komponenti opterećenja određuju se obzirom na umjerene vjerojatnosti prelaženja (npr. 10⁻⁴), a da bi se izbjegle negativne posljedice takvih netočnosti na procjenu zamornog vijeka.

Kao smjernica može se uzeti vrijednost k [26]:

$$k = 1, 1 - 0, 35 \frac{L - 100}{300}, \tag{2.38}$$

gdje je L duljina broda.

Slika 2.17: Izdržane amplitude naprezanja kao funkcija oblika spektra [25]

2.6.2 Utjecaj srednjeg naprezanja

Postupci za analizu zamora općenito se osnivaju na pretpostavci da treba razmatrati samo cikličke raspone naprezanja, dok se srednja naprezanja mogu zanemariti. Utjecaj srednjeg naprezanja je djelomično uključen u S–N krivulje jer je većina testova na uzorcima provedena pod promjenjivim vlačnim opterećenjem, s omjerom naprezanja R = 0 ili malo više vrijednosti; tako je utjecaj vlačnog naprezanja, koje teži smanjenju dinamičke izdržljivosti, uračunat u S–N krivulje.

Većina brodova izložena je konstantnim (statičkim) opterećenjima, koja u ponekim slučajevima rezultiraju u značajnim srednjim naprezanjima. Kada je srednje naprezanje vlačno, proračunati zamorni vijek je precijenjen, dok je u slučaju srednjeg tlačnog naprezanja suprotno. Visoki omjer naprezanja pod vlačnim opterećenjem, na osnovu eksperimenata, ima tendenciju smanjenja zamornog vijeka. Brodska konstrukcija izložena cikličkom opterećenju podložnija je zamornom oštećenju kada statička opterećenja rezultiraju u visokim vlačnim naprezanjima konstrukcije.

Kllasifikacijski zavodi daju određene faktore korekcije raspona naprezanja zbog utjecaja srednjeg naprezanja. BV daje korekciju raspona naprezanja koja uzima u obzir smanjenje zamornog oštećenja u slučaju srednjeg tlačnog naprezanja [40]:

$$\Delta \sigma_{\rm R} = \Delta \sigma_{\rm R} \left(1 - 0.25R \right) \tag{2.39}$$

gdje je:

 $\Delta \sigma_R - S - N$ raspon naprezanja,

 $\Delta \sigma_{R}$ – modificirani raspon naprezanja,

R – omjer naprezanja.

Nijedan od klasifikacijskih zavoda, međutim, ne uračunava posebno negativan utjecaj srednjeg vlačnog naprezanja u određivanju zamornog oštećenja, tj. primjenjuju se samo korekcije koje daju manje zamorno oštećenje uslijed srednjeg tlačnog naprezanja.

2.6.3 Utjecaj morske okoline (korozija)

Eksperimenti provedeni na uzorcima u morskoj vodi pokazali su da korozivna okolina djeluje nepovoljno na zamorni vijek [45]. Pokazalo se i da ukoliko postoji odgovarajuća zaštita, utjecaj morske vode nije tako poguban za brodsku konstrukciju [46]. Preporuke klasifikacijskih društava su različite obzirom na način uračunavanja negativnih efekata korozije, ali im je jedinstvena preporuka da se za katodno zaštićene elemente konstrukcije mogu upotrebljavati S– N krivulje dobivene ispitivanjima uzoraka u zraku. Iste krivulje se mogu koristiti i za konstruktivne elemente zaštićene od utjecaja morske vode zaštitnim premazima [40],[41],[47].

Ove preporuke ograničavaju se na materijale s granicom popuštanja ispod 400 N/mm². Za materijale veće čvrstoće, utjecaj morske vode može biti štetniji, a najnovijim ispitivanjima pokazalo se da je kod čelika povišene čvrstoće u morskoj vodi rast pukotine brži što je veća debljina elementa [1].

2.6.4 Ostali utjecajni parametri zamora

2.6.4.1 Utjecaj izrade

Većina klasifikacijskih zavoda u svojim postupcima pretpostavlja da su promatrani detalji standardno izrađeni s odgovarajućim konstrukcijskim tolerancijama [40]. Za određene konstrukcijske detalje može biti potrebno uzeti u obzir utjecaj stvarnih maksimalnih konstrukcijskih tolerancija (kao neporavnatosti, kutna distorzija) kod određivanja žarišnog naprezanja [48]. Razni postupci naknadne obrade zavarenih spojeva, npr. brušenje, mogu povećati dinamičku izdržljivost. Isto tako dinamičku izdržljivost mogu popraviti i poboljšane

metode zavarivanja. Pokazalo se da je dinamička izdržljivost laserski zavarenih spojeva gotovo jednaka onoj osnovnog materijala [48].

2.6.4.2 Utjecaj materijala

Rezultati testiranja zavarenih uzoraka izrađenih od čelika vlačne čvrstoće između 400 i 600 N/mm² pokazuju da stopa rasta pukotine ne zavisi o karakteristikama materijala, posebno o granici popuštanja [40]. Kako zamor zavarenih spojeva predstavlja proces rasta pukotine, zamorne karakteristike zavarenih spojeva se općenito ne poboljšavaju s povećanjem vlačne čvrstoće, pa se iste S–N krivulje mogu upotrijebiti u proračunu zamornog oštećenja zavarenih detalja bez obzira na karakteristike materijala.

2.6.4.3 Utjecaj zaostalih naprezanja

Utjecaj zaostalih naprezanja u brodskim konstrukcijama je vrlo malo istražen, posebno obzirom na njihovu veličinu, raspodjelu kroz presjek, promjene tijekom vijeka trajanja konstrukcije, kao i efekti kod promjenjivog morskog opterećenja. Neki utjecaji zaostalih naprezanja u zavarima su uključeni u S–N krivulje dobivene testiranjem zavarenih uzoraka bez toplinskog tretmana.

Većina testova umora materijala provodi se kod promjenjivog vlačnog opterećenja, uz omjer naprezanja R = 0, te je i na taj način u S–N krivulje uključen utjecaj zaostalih naprezanja koja nastoje smanjiti dinamičku izdržljivost. Smatra se opravdanim da se utjecaj zaostalih naprezanja zanemari u procjeni zamora [4],[41]. Bureau Veritas je jedini klasifikacijski zavod koji posebno razmatra utjecaj zaostalih naprezanja i daje preporuke za modifikaciju S–N krivulja.

2.6.4.4 Utjecaj debljine

Pokazalo se da zamorna čvrstoća zavarenih spojeva opada s povećanjem debljine lima, stoga većina postupaka za proračun zamornog oštećenja uključuje i ovaj utjecaj. Najčešći način uračunavanja ovog utjecaja je korekcijom projektne S–N krivulje i to uglavnom za debljine iznad 22 mm. Korekcija za debljine t > 22 mm može se provesti formulom [5]:

$$\log(N) = \log(C) - \frac{m}{4} \log\left(\frac{t}{22}\right) - m \cdot \log(\Delta\sigma)$$
(2.40)

gdje je:

N – broj ciklusa raspona naprezanja $\Delta \sigma$, C, m – konstante S–N krivulje, t –debljina lima.

2.7 Analiza pouzdanosti zamorne čvrstoće

Dva su glavna izvora neizvjesnosti određivanja zamornog oštećenja brodskih konstrukcija [49]:

- stohastička priroda vremenskog zapisa zamornog opterećenja,
- slučajna promjenjivost izdržljivosti materijala na zamorno opterećenje.

Potrebno je razviti vjerojatnosno-statističku teoriju zamorne pouzdanosti u analizi i projektiranju brodskih konstrukcija. Teorija zamorne pouzdanosti konstrukcija sastoji se, općenito, iz tri dijela:

- tehnologija brojanja ciklusa zamornog opterećenja,
- analiza pouzdanosti zamornog vijeka i dinamičke izdržljivosti pod opterećenjem konstantne amplitude,
- analiza pouzdanosti zamornog vijeka i dinamičke izdržljivosti pod promjenjivim opterećenjem varijabilne amplitude ili stohastički vremenski zapis.

Problem je i kako definirati pravilo akumuliranja oštećenja kod slučajnog zamora, jer tek nakon što je takvo pravilo definirano, postaje moguće, na osnovi rezultata ispitivanja s opterećenjima konstantne amplitude, provesti analizu pouzdanosti i projektirati konstruktivne elemente podvrgnute promjenjivom opterećenju varijabilne amplitude [50],[51].

Najčešće upotrebljavani model, obzirom na akumuliranje oštećenja od slučajnog zamora, je Wirschingov model, kojem se pristupa preko mehanike loma i, češće, preko S–N krivulja. Wirschingov model, koji uključuje gotovo sve nesigurnosti u analizi zamorne pouzdanosti, izražava vrijeme do popuštanja nekog konstrukcijskog detalja [52]:

$$\overline{T} = \frac{\overline{D}_{\rm f} \cdot \overline{C}}{\overline{B}^{\rm m} \cdot \overline{\Omega}},\tag{2.41}$$

gdje je

 $\overline{D}_{\rm f}$ – srednja vrijednost slučajne varijable $D_{\rm f}$ koja predstavlja oštećenje kod popuštanja i opisuje neizvjesnosti prisutne kod Palmgren–Minerovog pravila,

 \overline{C} , m – srednje vrijednosti određene izborom S–N krivulje (C_{50} , s_L),

 \overline{B} – srednja vrijednost slučajne varijable *B* (omjer između stvarnog i procijenjenog raspona naprezanja),

 $\overline{\Omega}$ – parametar naprezanja,

 \overline{T} , \overline{C} , \overline{D}_{f} , i \overline{B} su slučajne varijable koje slijede logaritamsko–normalnu razdiobu.

Ako se dugoročna raspodjela valnog procesa pretpostavi kao niz kratkoročnih stanja mora, koja su stacionarna, uskopojasna, gausovska i nultih srednjih vrijednosti, te ako je struktura linearna, raspon naprezanja slijedit će Rayleighovu razdiobu i Ω se može odrediti pomoću izraza:

$$\Omega = \frac{\left(2\sqrt{2}\right)^m}{2\pi} \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) \cdot \sum_j p_j m_{0j}^{(m-1)/2} m_{2j}^{1/2}$$
(2.42)

gdje je:

 $p_{\rm j}$ – vjerojatnost pojavljivanja j-tog stanja mora, $m_{0\rm j}, m_{2\rm j}$ – moment nultog i drugog reda spektra naprezanja j-tog stanja mora, $\frac{1}{2\pi}\sqrt{m_{2\rm j}/m_{0\rm j}}$ – frekvencija procesa naprezanja za j-to stanje mora.

Varijabla D_f ne može se odrediti direktno zamornim pokusima zbog nepovratnosti procesa zamornog testa, tj. svaki pojedini uzorak ne može se testirati ponovno nakon što je testiran do popuštanja. Analizom rezultata pokusa Wirsching je dao preporuku, za komponente u valnoj okolini:

$$\overline{D}_{\rm f} = 1.0$$

 $V_{\rm Df} = 0.3$

gdje je $V_{\rm Df}$ koeficijent varijacije slučajne varijable $\overline{D}_{\rm f}$.

Određivanje slučajne varijable *B* predstavlja najveći problem jer modelira nepreciznosti povezane s određivanjem opterećenja i odziva konstrukcije. Ono se sastoji se od niza komponenti:

- B₁-opisivanje stanja mora,
- B2-procjena dugoročnog odziva broda,
- B3-ekstremna opterećenja primijenjena na modelu,
- B4-modeliranje brodske konstrukcije,
- B5–izrada, itd.

Vrijednost *B* se dobije iz $B = \prod_{i} (B_i)$, ali ostaje važna napomena nesigurne procjene vrijednosti pojedinih komponenti B_i [42].

Pouzdanost se može opisati Cornellovim indeksom β , ili preko vjerojatnosti popuštanja $P_{\rm F}$:

$$\beta = \frac{\ln(\overline{T}) - \ln(T_s)}{s_{\ln(T)}},$$
(2.43)

$$P_{\rm F} = P\left(T \le T_{\rm S}\right) = \Phi\left(-\beta\right) \tag{2.44}$$

gdje je:

 $T_{\rm s}$ – životni vijek broda u službi,

 $s_{\ln(T)}$ – standardna devijacija ln(*T*),

$$s_{\ln(T)} = \sqrt{\ln\left\{\left(1 + V_{D_{f}}^{2}\right)\left(1 + V_{c}^{2}\right)\left[\left(1 + V_{B}^{2}\right)^{m}\right]^{2}\right\}},$$
(2.45)

 $V_{\rm Df}$, $V_{\rm C}$ i $V_{\rm B}$ – koeficijenti varijacije slučajnih varijabli $D_{\rm f}$, C i B,

 \overline{T} – srednja vrijednost od T,

 Φ – standardna funkcija normalne razdiobe.

U analizi sigurnosti brodske konstrukcije vjerojatnosnim pristupom zamorno oštećenje predstavlja jedno od graničnih stanja (granično stanje je stanje u kojem konstrukcija ili neki njen element postaje nesposoban za obavljanje svoje funkcije). Funkcija graničnog stanja zamora je [49]:

$$g(X) = \frac{D_{\rm f} \cdot C}{\overline{B}^{\rm m} \cdot \overline{\Omega}} - T_{\rm s}, \qquad (2.46)$$

Popuštanje konstrukcije je nastupilo kada je funkcija graničnog stanja g(X) negativna ili nula, gdje je X vektor osnovne slučajne varijable.

Vjerojatnost da vrijeme do popuštanja nekog konstrukcijskog detalja uslijed zamora bude manja od životnog vijeka broda u službi izražava se sa:

$$p\left[g\left(x\right) \le 0\right] = p\left(\frac{\overline{D}_{\rm f}\overline{C}}{\overline{B}^{\rm m}\overline{\Omega}}\right) \le T_{\rm s}.$$
(2.47)

3 POSTUPCI ZA OCJENU ZAMORA

3.1 Općenito

Tipična procedura može se ukratko opisati:

- Pristup preko pravila registara uz primjenu Weibullove dvoparametarske razdiobe.
 Spektralni pristup se preporučuje za precizniju procjenu zamora iako smjernice nisu uvijek dane.
- Pojednostavljene procedure provode se uz proračun naprezanja od globalnih i lokalnih opterećenja. Primjenjuju se djelomični modeli s konačnim elementima. Definirani su i korelacijski faktori za kombinirano naprezanje.
- Projektni vijek broda se uzima 20 godina i ne upotrebljavaju se faktori sigurnosti. Modeli zamora baziraju se na nazivnom, žarišnom ili vršnom naprezanju. Kriterij zamornog oštećenja definira se preko kumulativnog omjera oštećenja primjenom Palmgren–Minerovog pravila linearnog sumiranja.

Sva pravila i smjernice za procedure za procjenu zamora brodske konstrukcije nedavno su objavljena ili izmijenjena. Većina postupaka procjene zamora su tzv. pojednostavljene procedure. Postoje velike razlike kod različitih postupaka i to praktično u svim aspektima.

U tablici 3.1 dan je pregled postupaka za procjenu zamora brodskih konstrukcija u vrijeme izrade ovog rada prema [1], uz napomenu da su postupci Hrvatskog registra brodova i Germanischer Lloyda isti.

U nastavku su detaljno opisane tri procedure:

- procedura Bureau Veritasa, bazirana na pristupu vršnog naprezanja uz upotrebu HSE S–N krivulja,
- procedura Germanischer Lloyda koja se temelji na žarišnom naprezanju i IIW S–N krivuljama,
- procedura Lloyd's Register of Shipping koja je specifična po pristupu određivanja opterećenja i upotrebom vlastitih S–N krivulja, a izvodi se kroz program ShipRight FDA.

	0	pterećenja		Analiza naprez	anja	S–N	krivulje		Utjecajni	faktori	
Reg.	Osnova	Vjeroja tnost	Oblik	Pristup	SCF ⁹	Nominalna naprezanja	Lokalna naprezanja ¹⁰	Srednje naprezanje	Debljina	Korozija	Faktor sigurnosti ⁷
ABS	Pravila	$2 \cdot 10^{-8}$	Weibull	Žarišno	da	HSE	HSE	ne	posebno	da	ne
BV	Pravila	10-5	Weibull	Vršno	da	HSE	HSE	da	25mm	da	ne ⁴
DNV	Pravila/ Direktno	10-4	Weibull	Vršno	da	Nema	Vlastite ³	da	22mm	da	ne
GL	Pravila	10-6	Weibull/ Linearni	Žarišno	da	IIW	IIW	da	posebni slučajevi	ne	da ⁵
LR^{11}	Pojednostav.	/Spektralna	a ⁸	Žarišno/Zarezno ¹	da	Nema	Vlastite	ne	22mm	da	ne
NK	Direktno ²	10-4	Weibull	Žarišno	da	BS	BS	da	ne	ne	da ⁶
RINA	Pravila	10-8	Linearni	Žarišno	ne	IIW	IIW	da	ne	ne	ne
KR	Pravila	10-4	Weibull	Žarišno	da	Nema	HSE	da	22mm	da	ne

¹ – Hot-spot pristup s normaliziranim parametrima vršnog naprezanja.

² – Dva pristupa: 'kombinirani' i metoda 'projektnog vala'.

³ – Specijalni lokalni pristup preko vršnog naprezanja kod kojeg se žarišno naprezanje množi s faktorom zavara.

⁴ – Srednje minus jedna, dvije ili tri standardne devijacije S–N krivulje za nekritične, kritične i posebne strukturne elemente.

⁵ – Za zaobljene rubove velikih radijusa.

⁶ – Faktori sigurnosti upotrebljavaju se obzirom na važnost elementa. Eksplicitne vrijednosti nisu dane.

⁷ – Srednja vrijednost S–N krivulje minus dvije standardne devijacije u većini slučajeva.

⁸ – LR upotrebljava dvije razine proračuna, opterećenja za razinu 2 dobiju se programom Voyage Simulation, a kod razine 3 direktnim proračunom.

⁹ – Faktori koncentracije naprezanja (Stress Concentration Factor).

¹⁰ – Lokalna naprezanja u većini slučajeva su vezana uz pristup proračunu preko geometrijskih naprezanja.

¹¹ – Procedura se primjenjuje samo kroz program ShipRight FDA.

Tablica 3.1: Pregled procedura za procjenu zamora [1]

3.2 Postupak proračuna zamora Bureau Veritasa (BV)

Oznake BV-a:

L – konstruktivna duljina,

B – širina broda,

d-konstruktivni gaz,

 d_1 – gaz za promatrani slučaj krcanja,

 $C_{\rm b}$ – koeficijent istisnine,

$$C_b = \frac{V_1}{LBd_1},\tag{3.1}$$

 V_1 – istisnina za gaz d_1 ,

 $M_{\rm WV}$ – vertikalni moment savijanja na valovima:

 $M_{\rm WV, PREGIB} = 110 \ F \ M \ L^2 \ B \ (C_{\rm b} + 0.7) \cdot 10^{-3}$ (3.2)

$$M_{\rm WV PROGIB} = 190 \ F \ M \ L^2 \ B \ C_{\rm b} \cdot 10^{-3} \tag{3.3}$$

gdje je:

$$F = 10,75 - [(300 - L) / 100]^{1.5}, \qquad \text{za } L < 300 \text{ m}$$

$$F = 10,75, \qquad \qquad \text{za } L > 300 \text{ m}$$

M_{WH} – horizontalni moment savijanja na valovima,

$$M_{\rm WH} = 1.6 \, M \, L^{2.1} \, B \, T \cdot 10^{-3} \tag{3.4}$$

gdje je:

M – faktor distribucije prema slici 3.1:



Slika 3.1: Faktor distribucije M [40]

 $M_{\rm SW}$ – moment savijanja na mirnoj vodi,

g – gravitacijsko ubrzanje, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$,

 ρ_c – gustoća tereta

3.2.1 Općenito

Postupak Bureau Veritasa uključuje tri glavna koraka:

- određivanje opterećenja i naprezanja
- procjenu zamornog kapaciteta upotrebom S-N krivulja
- proračun zamornog vijeka primjenom Minerovog pravila kumulativnog oštećenja



Slika 3.2: Postupak procjene dinamičke izdržljivosti Bureau Veritasa [40]

Iskustvo prikupljeno tijekom godina omogućuje definiranje, ovisno o tipu broda, strukturnih detalja za koje je nužno procijeniti zamornu čvrstoću, uzimajući u obzir posljedice oštećenja na sigurnost broda ili na okolinu.

Kao smjernica dani su sljedeći strukturni detalji za koje treba odrediti zamorni vijek, ovisno o vrsti broda:

Tankeri s dvostrukom oplatom:

spoj pokrova uzvojnog tanka s vrhom tanka i opločenjem uzdužne pregrade,

- spojevi uzdužnjaka unutarnjeg trupa s poprečnim rebrima i pregradama,
- ukrepe (koljena) poprečnih okvira,
- okvirne sponje rubni spojevi,
- izrezi u primarnim elementima.

Brodovi za rasuti teret:

- rebra oplate boka i njihovi spojevi s koljenima,
- vertikalno korugirane poprečne pregrade,
- spojevi korugiranih prirubnica s oplatom postolja
- spojevi bočne oplate postolja s oplatom vrha tanka
- rubovi otvora glavnih grotala,
- spoj pokrova uzvojnog tanka s oplatom vrha tanka,
- zavareni spojevi rebrenica na zgibovima.

3.2.2 Opterećenja brodske konstrukcije

Dva se tipa opterećenja razmatraju kod određivanja dinamičke izdržljivosti brodske konstrukcije po BV: statička opterećenja i valovima inducirana opterećenja. Pretpostavlja se da se dinamička i udarna opterećenja mogu izbjeći promjenom rute plovidbe, promjenom brzine, itd. Metode kojima su određena opterećenja i naprezanja osnivaju se striktno na pravilima Bureau Veritasa, koja su opet određena kao rezultat opsežnih proračuna ponašanja broda na moru i to za razne tipove brodova, kao i iskustvenih podataka s brodova u službi. Procedura BV pretpostavlja vijek trajanja broda od 20 godina.

3.2.2.1 Određivanje opterećenja

Različiti tipovi brodova tijekom svog života izloženi su nizu različitih uvjeta opterećenja, međutim, mnogi brodovi tijekom službe plove u nekim standardnim stanjima krcanja pa se analiza zamora provodi općenito za dva stanja krcanja: potpuno nakrcan brod i brod u balastu. Za svako stanje krcanja razmatraju se dva osnovna stanja mora: valovi u pramac i valovi u bok broda. Ova osnovna stanja uključuju sljedeće komponente opterećenja:

- momenti savijanja trupa broda,
- vanjski tlak mora,
- opterećenja od tereta.

Vanjski tlak mora i interna opterećenja od tereta u pravilu se računaju u poprečnom presjeku koji sadrži težište svakog skladišta i smatraju se konstantnima po duljini.

Opterećenja i pripadna dozvoljena naprezanja koja razmatra Bureau Veritas zasnivaju se na razini vjerojatnosti premašivanja u vijeku trajanja broda 10⁻⁵. Bureau Veritas za različita stanja mora kombinira opterećenja prema tablicama 3.2 i 3.3:

Statički tlak mora + Dinamičko opterećenje od tereta Globalna opterećenja (momenti savijanja trupa): – M _{SW}	Brod na valnom brijegu + Statička unutrašnja opterećenja Globalna opterećenja: – <i>M</i> _{SW} – 0.45 <i>M</i> _{WV}	Brod na valnom dolu + Statička unutrašnja opterećenja Globalna opterećenja: - M _{SW} - 0.45 M _{WV}
$- 0.45 M_{WV}$ Opterećenje od valova	Opterećenje od valova	Opterećenje od valova
	d_1 d_2 d_1 d_1 d_2 d_1 d_1 d_2 d_2 d_1 d_2 d_2 d_2 d_1 d_2 d_2 d_2 d_2 d_2 d_1 d_2 d_2 d_2 d_3 d_1 d_1 d_2 d_2 d_3 d_1 d_1 d_2 d_2 d_3 d_1 d_1 d_2 d_3 d_1 d_1 d_2 d_3 d_1 d_1 d_2 d_3 d_1 d_1 d_2 d_3 d_1 d_1 d_2 d_3 d_1 d_1 d_1 d_2 d_3 d_1 d_1 d_2 d_3 d_1 d_1 d_1 d_2 d_3 d_1 d_1 d_2 d_3 d_1 d_1 d_2 d_3 d_1 d_1 d_2 d_3 d_3 d_1 d_1 d_1 d_2 d_3	d_1 d_1 d_1 d_1 d_1 d_1 d_1 d_1 d_1 d_1 d_1
Opterećenje od tereta:	Opterećenje od tereta (veći od):	Opterećenje od tereta:
$h = 0.1\delta \left(0.5\gamma_{\rm x}l_{\rm c} + \gamma_{\rm z}d_{\rm c} \right) + h_{\rm l}$	$h = \delta \left(d_{\rm c} + 2/3 d_{\rm a} \right)$	$h = \delta \left(d_{\rm c} + 2/3 d_{\rm a} \right)$
	$h = \delta d_{\rm c} + h_{\rm o}$	$h = \delta d_{\rm c} + h_{\rm o}$
Dvodno i dvobok:	Dvodno i dvobok (veći od):	Dvodno i dvobok:
$h = 0.1\delta\gamma_z \left(d_c + 0.5d_a \right)$	$h = \delta(d_{c} + 2/3d_{a})$ $h = \delta(d_{c} + d_{o})$	$h = \delta (d_{\rm c} + 2/3d_{\rm a})$ $h = \delta (d_{\rm c} + d_{\rm o})$

Tablica 3.2: Kombinacija opterećenja po Bureau Veritasu za valove u pramac broda

Statički tlak valova	Dinamički tlak valova
Dinamičko unutrašnje opterećenje	Statička unutrašnja opterećenja
Globalna opterećenja:	Globalna opterećenja (momenti savijanja trupa):
$-M_{ m SW}$	$-M_{SW}$



Tablica 3.3: Kombinacija opterećenja Bureau Veritasa za valove u bok broda

3.2.2.2 Slučajevi opterećenja

Osnovnih slučajeva opterećenja ima osam: 2 stanja mora (valovi u pramac, valovi u bok) x 2 stanja krcanja (potpuno nakrcan brod, brod u balastu) x 2 vrste lokalnih opterećenja (statičko i dinamičko).

3.2.2.2.1 Valovi u pramac + potpuno nakrcan brod

Slučaj opterećenja 11:

Statički tlak vode uz dinamičko maksimalno i minimalno interno opterećenje od tereta ili balasta. Računaju se sljedeća globalna i lokalna opterećenja:

- moment savijanja na mirnoj vodi za promatrano stanje krcanja,
- vertikalni momenti savijanja na valovima: $M_{WV,11} = 0,45 M_{WV}$
 - za pregib, gdje se razmatra maksimalno opterećenje od tereta
 - za progib gdje se razmatra minimalno opterećenje od tereta,
- statički tlak mora,
- dinamičko opterećenje od tereta ili balasta za maksimalnu i minimalnu komponentu vertikalnog ubrzanja.

Slučaj opterećenja 12:

Dinamički maksimalni i minimalni tlak vode uz statičko opterećenje od tereta ili balasta. Računaju se:

- moment savijanja na mirnoj vodi za promatrano stanje krcanja,
- vertikalni momenti savijanja na valovima: $M_{WV,12} = 0.625 M_{WV}$
 - za progib brod na valnom dolu
 - za pregib brod na valnom brijegu,
- dinamički tlak mora za brod na dolu i brijegu vala,
- statičko opterećenje od tereta ili balasta.

3.2.2.2 Valovi u bok + potpuno nakrcan brod

Slučaj opterećenja 21:

Statički tlak vode uz dinamičko maksimalno i minimalno interno opterećenje od tereta ili balasta. Računaju se:

- moment savijanja na mirnoj vodi za promatrano stanje krcanja,
- vertikalni momenti savijanja na valovima: $M_{WV,21} = 0.25 M_{WV}$
 - za pregib, gdje se razmatra maksimalno opterećenje od tereta
 - za progib, gdje se razmatra minimalno opterećenje od tereta,

- horizontalni moment savijanja na valovima $M_{WH,21} = 0.45 M_{WH}$
 - lijevi bok broda vlačno napregnut za maksimalno opterećenje teretom
 - desni bok broda vlačno napregnut za minimalno opterećenje teretom,
- statički tlak mora,
- dinamičko opterećenje od tereta ili balasta za maksimalnu i minimalnu komponentu vertikalnog ubrzanja.

Slučaj opterećenja 22:

Dinamički maksimalni i minimalni tlak mora uz statičko opterećenje od tereta ili balasta. Računaju se:

- moment savijanja na mirnoj vodi za promatrano stanje krcanja,
- vertikalni momenti savijanja na valovima: $M_{WV,22} = 0.25 M_{WV}$, za pregib ili za progib – predznak ispred momenta savijanja treba biti takav da rezultirajuće naprezanje bude maksimalno ili minimalno,
- horizontalni moment savijanja na valovima $M_{WH,22} = 0.625 M_{WH}$ (lijeva strana broda se pretpostavlja tlačno napregnuta),
- dinamički tlak mora,
- statičko opterećenje od tereta ili balasta.

Na isti način računaju se opterećenja za brod u balastu – slučajevi 11', 12', za valove u pramac i slučajevi 21', 22', za valove u bok.

3.2.3 Dugoročna raspodjela naprezanja

Naprezanja se mogu odrediti primjenom klasične teorije grede ili metodom konačnih elemenata. Primjenom klasične teorije grede dobivaju se nominalna naprezanja koja zanemaruju efekte geometrije dok metoda konačnih elemenata uzima u obzir strukturne diskontinuitete uslijed geometrije i omogućuje proračun geometrijskih naprezanja.

Raspon žarišnog naprezanja dobije se po formuli:

$$S_{\rm g} = K_{\rm g} \cdot S_{\rm n} \tag{3.5}$$

gdje je:

 $S_{\rm s}$ – raspon žarišnog naprezanja,

 $S_{\rm n}$ – raspon nazivnog naprezanja od idealizacije gredom,

 $K_{\rm s}$ – geometrijski faktor koncentracije naprezanja.

Geometrija korijena zavara stvara lokalno povećanje (koncentracija) naprezanja i konačno maksimalno lokalno vršno naprezanje je:

$$S_{\rm k} = K_{\rm f} \cdot S_{\rm s} \tag{3.6}$$

gdje je:

 S_k – raspon vršnog naprezanja

 $K_{\rm f}$ – zamorni faktor zareza koji uključuje utjecaj geometrije zavara

Na osnovi rezultata proračuna (metodom konačnih elemenata) i mjerenja naprezanja, faktor K_f potreban za proračun ovog naprezanja u proceduri koju primjenjuje BV može se odrediti približnom formulom:

$$K_{\rm f} = 2(\theta/30)^{0.5}$$
 (3.7)

gdje je:

 θ srednji kut korijena zavara u [^o].

Ukoliko nije drugačije naglašeno, θ se uzima 30° za sučeljene zavare i 45° za kutne zavare. Ovaj faktor se korigira pri izboru S–N krivulje, pa se u postupku BV-a primjenjuje korigirani faktor koncentracije naprezanja za zavar K_w (3.10).

BV procedura osniva se na pristupu sa vršnim naprezanjem kod kojeg se žarišni raspon naprezanja S_s određuje metodom konačnih elemenata, a faktor K_f se računa parametarskim formulama baziranim na rezultatima analize metodom konačnih elemenata i eksperimentima.

Žarišno naprezanje se može odrediti i primjenom parametarske formule uz poznati geometrijski faktor koncentracije naprezanja K_s razmatranog konstruktivnog detalja. Faktori K_s dani su tablično za određene tipove spojeva (slika 3.3):

Geometrijski faktori konc. naprezanja	K _{s1} (aksijalni)	K_{s2} (savijanje)
	2.57	1.21



Slika 3.3: Primjer tablice detalja BV geometrijskih faktora koncentracije naprezanja [40]

3.2.3.1 Određivanje nazivnog naprezanja

Ukupno nazivno naprezanje računa se kombiniranjem nazivnih naprezanja dobivenih za osnovne slučajeve opterećenja:

$$\sigma_n = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4, \qquad (3.8)$$

gdje je:

 σ_1 – naprezanje savijanja na mirnoj vodi

 σ_2 – naprezanje savijanja od vertikalnih momenata na valovima

 σ_3 – naprezanje savijanja od horizontalnih momenata na valovima

 σ_4 – lokalno naprezanje savijanja od vanjskog ili unutarnjeg tlaka

3.2.3.2 Određivanje raspona nazivnog naprezanja

Za osnovne slučajeve opterećenja (11 – 22'), rasponi naprezanja S_{ij} određuju se kako slijedi:

Potpuno nakrcan brod i valovi u pramac broda:

- slučaj 11: $S_{11} = (\sigma_{11})_{\text{max}} - (\sigma_{11})_{\text{min}}$

- slučaj 12: $S_{12} = (\sigma_{12})_{\text{max}} - (\sigma_{12})_{\text{min}}$

Potpuno nakrcan brod i valovi u bok broda:

- slučaj 21: $S_{21} = (\sigma_{21}) \max - (\sigma_{21}) \min$

- slučaj 22: $S_{22} = (\sigma_{22})_{\text{max}} - (\sigma_{22})_{\text{min}}$

Brod u balastu: rasponi naprezanja za brod u balastu, S_{ij} , računaju se isto kao gore vrijednosti raspona naprezanja za potpuno nakrcan brod.

Pretpostavlja se da se funkcija gustoće vjerojatnosti dugoročne raspodjele ukupnih naprezanja (trup+lokalno savijanje) može prikazati dvoparametarskom Weibullovom razdiobom uzimajući isti parametar oblika razdiobe kao onaj za naprezanje savijanja na valovima s karakterističnom vrijednošću Weibullove distribucije određenom za $N_{\rm R} = 10^5$ ciklusa.

Ako je provedena dugoročna analiza ponašanja broda na moru parametar oblika Weibullove razdiobe naprezanja se definira na sljedeći način:

$$k = 0.47 / \ln \left(\sigma_{10^{-8}} / \sigma_{10^{-5}} \right)$$
(3.9)

gdje je:

 $\sigma_{{}_{10^{-8}}}$ – ekstremno naprezanje savijanja trupa na palubi čvrstoće prema bokovima

 $\sigma_{10^{-5}}$ – naprezanje savijanja trupa na palubi čvrstoće prema bokovima za razinu vjerojatnosti premašivanja 10^{-5} .

Ukoliko direktna analiza ponašanja broda nije provedena k se može uzeti:

- k = 1 za brodove za rasuti teret i tankere
- k = 1.2 za brodove za prijevoz kontejnera

3.2.4 Izbor S–N krivulje

Eksperimentalne S–N krivulje daju odnos između nazivnih raspona naprezanja i broja ciklusa do puknuća. Međutim, nazivna naprezanja nije lako proračunati obzirom na složenost detalja brodske konstrukcije. Ovo razmatranje je BV dovelo do toga da svoju proceduru osniva na vršnom naprezanju koje omogućuje upotrebu jedne krivulje za sve tipove detalja.

BV upotebljava HSE krivulju klase B, uz primjenu korigiranog faktora koncentracije naprezanja za zavar:

$$K_{\rm w} = 1.4 \left(\theta/30\right)^{0.5}.$$
 (3.10)

Srednja S–N krivulja je određena za raspon naprezanja S i uz vjerojatnost preživljavanja uzorka od 50%, tj. $S^m N = C_{50}$. Krivulja klase B se dalje korigira uzimajući u obzir: traženu vjerojatnost oštećenja, utjecaj zaostalih naprezanja, utjecaj tlačnih naprezanja, utjecaj debljine oplate, izradu, utjecaj materijala, utjecaj okoline i Haibach efekt.

3.2.4.1 Vjerojatnost oštećenja

Razina vjerojatnosti oštećenja je određena obzirom na odgovarajući rizik od oštećenja. Ovisno o vjerojatnosti oštećenja p, koeficijent C_p kod projektnih S–N krivulja se računa ovako:

_	'Fail safe' projekt: $p = 16,5\%$,	$k_{\rm p} = 1$,
_	'Safe life' projekt: $p = 2,5\%$,	$k_{\rm p} = 2$
_	Kritični elementi: $p = 0,1\%$,	$k_{\rm p} = 3$

Za vjerojatnost oštećenja p onda slijedi:

$$S^{\mathrm{m}}N = C_{\mathrm{p}},\tag{3.11}$$

$$\log(C_{\rm p}) = \log(C_{50}) - k_{\rm p} \cdot s_{\rm L}, \qquad (3.12)$$

gdje je: $s_{\rm L}$ – standardna devijacija od log C_{50} .

3.2.4.2 Utjecaj zaostalih naprezanja

Zaostala naprezanja uračunavaju se modificiranjem S-N krivulje po formuli:

$$m \cdot \log(S) + \log(N) = \log(C_p) - 0.05m.$$
 (3.13)

3.2.4.3 Utjecaj tlačnih naprezanja

Da se uzme u obzir ublažavajući utjecaj tlačnih naprezanja, za koja je omjer minimalnog i maksimalnog naprezanja R negativan, konstanta C_p projektne S–N krivulje množi se faktorom α :

$$\alpha = \left(1 - 0, 25R\right)^{\mathrm{m}} \tag{3.14}$$

gdje je:

R – omjer naprezanja (ne smije biti manji od –1).

3.2.4.4 Utjecaj izrade

Za pojedine konstruktivne detalje može biti potrebno uračunati efekte stvarnih maksimalnih toleranci (tj. neporavnatosti, kutne distorzije) kod određivanja žarišnog naprezanja. Npr. da bi se uračunale neporavnatosti između dva elementa koji se dodiruju potrebno je faktor koncentracije naprezanja K_s pomnožiti s 1+3·*e*/*t*, gdje je *t* debljina elementa, a *e* je ekscentricitet.

3.2.4.5 Utjecaj materijala

Iste S–N krivulje koriste se za određivanje izdržljivosti neovisno o materijalu.

3.2.4.6 Utjecaj morske okoline – korozija

Morska voda smanjuje otpornost na zamor i dovodi do povećanja raspona naprezanja s vremenom. Kumulativni omjer oštećenja D u bilo kojem trenutku T života u službi može se izraziti formulom:

$$D = B_{\rm cor} \cdot D(T) \tag{3.15}$$

gdje je:

D(T) – kumulativni omjer oštećenja u trenutku T s reduciranim koeficijentom $C_{\rm p}$,

 $n_{\rm a}$ – broj godina koje odgovaraju vremenu T,

 $r_{\rm c}$ – trošenje materijala zbog korozije ,

t – debljina elementa konstrukcije,

m – konstanta S–N krivulje,

$$B_{\rm cor} = \frac{t}{r_{\rm c} n_{\rm a} ({\rm m-1})} \left\{ \left(\frac{t}{t - r_{\rm c} n_{\rm a}} \right)^{{\rm m-1}} - 1 \right\}.$$
 (3.16)

Za spojeve zaštićene anodno ili premazima mogu se koristiti standardne S-N krivulje.

3.2.4.7 Haibach efekt

Kao što je poznato eksperimentalni podaci pokazuju granicu zamora ispod koje se više ne javljaju oštećenja uzoraka – dinamička izdržljivost. Kod slučajno opterećenih konstrukcija, stvarna granica zamora ne može biti određena – s nastajanjem inicijalnih pukotina granica zamora se smanjuje. Da se uzme u obzir ovaj fenomen, usvojene su S–N krivulje s promjenom nagiba kod 10⁷ ciklusa i za njih vrijedi:

$$S^{\rm m}N = C_{\rm p}$$
, za N <10⁷, (3.17)

$$S^{m+2} \cdot N = C_p, \text{ za N} > 10^7$$
 (3.18)

3.2.5 Procjena dinamičke izdržljivosti

Postupak procjene dinamičke izdržljivosti zavarenih strukturnih elemenata uključuje sljedeće faze:

- određivanje dugoročne raspodjele naprezanja,
- izbor odgovarajuće S-N krivulje za određeni detalj i određeni tip naprezanja,
- određivanje tražene vjerojatnosti oštećenja,
- određivanje ukupnog kumulativnog omjera oštećenja.

Prve tri faze prethodno su već opisane, a određivanje ukupnog kumulativnog omjera oštećenja provodi se kako slijedi.

Dva stanja krcanja, potpuno nakrcan brod i brod u balastu, smatraju se jednako vjerojatnima pa je ukupni kumulativni omjer oštećenja:

$$D = 0.5 \left(D_0 + D_0' \right) \tag{3.19}$$

gdje je:

 D_0 – kumulativni omjer oštećenja za stanje punog krcanja,

$$D_0 = \max\left(D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}\right) \tag{3.20}$$

 D_0' – kumulativni omjer oštećenja za stanje balasta,

$$D_{0}^{'} = \max\left(D_{11}^{'}, D_{12}^{'}, D_{21}^{'}, D_{22}^{'}\right), \qquad (3.21)$$

gdje su D_{ij} kumulativni omjeri oštećenja za osnovne slučajeve opterećenja.

3.2.6 Zamorna pouzdanost

Analiza pouzdanosti omogućava uračunavanje niza neizvjesnosti u proračunu zamornog oštećenja:

- neizvjesnost kod određivanje opterećenja (modeliranja okoline)
- neizvjesnost kod modeliranja naprezanja
- neizvjesnost proračuna zamornog oštećenja

BV daje izmjenu Palmgren–Minerovog pravila, koje navodi da se popuštanje javlja kada je kumulativni omjer oštećenja D veći od jedinične vrijednosti: $D > D_f$. D_f je slučajna varijabla koja predstavlja oštećenje kod popuštanja i opisuje neizvjesnosti prisutne kod Palmgren–Minerovog pravila (proračun zamorne čvrstoće):

$$D_{\rm f} = \frac{f \cdot T}{C} \frac{\left(S_{10-5}\right)^{\rm m}}{\left(\ln 10^{5}\right)^{\rm m/k}} \Gamma\left(1 + m/k\right)$$
(3.22)

gdje je:

f prosječna valna frekvencija,

T vrijeme do popuštanja.

Vrijednost *f* ovisi o odzivu konstrukcije i valnoj okolini i može se točno odrediti jedino kroz spektralnu analizu zamora ili mjerenjima. Za potrebe pojednostavljene procedure može se uzeti približna vrijednost $f = 1/(4 \cdot \log L)$. Ako se pretpostavi da varijable $D_{\rm f}$, *C* i S_{10-5} slijede logaritamsko – normalnu razdiobu, onda se slučajna varijabla *T*, koja isto slijedi log–normalnu razdiobu, može dati formulom:

$$T = \frac{\left(\ln 10^{5}\right)^{m/k}}{f \cdot \Gamma\left(1 + m/k\right)} \frac{C \cdot D_{\rm f}}{\left(S_{10-5}\right)^{m}}$$
(3.23)

Vjerojatnost zamornog popuštanja je onda:

$$P_{\rm f} = P\left(T < T_{\rm s}\right) \tag{3.24}$$

gdje je:

T_s zahtjevani vijek trajanja u službi.

Pouzdanost R_p na zamorno popuštanje se može izraziti sa:

$$R_{\rm p} = 1 - P_{\rm f} = P(T \ge T_{\rm s}) \tag{3.25}$$

Raspon naprezanja za razinu vjerojatnosti od 10⁵ može se napisati kao: $S_{10-5} = B \cdot S$, gdje je *S* proračunati vršni raspon naprezanja, a *B* slučajna varijabla (definirana u 2.7).

Pouzdanost konstrukcije opisuje se indeksom sigurnosti β (2.34), pomoću kojega se može izračunati vjerojatnost popuštanja konstrukcije $P_{\rm f}$ prema (2.35).

Za određivanje indeksa sigurnosti β potrebno je znati srednje vrijednosti \overline{D}_f , \overline{C} , \overline{B} i koeficijente varijacije slučajnih varijabli D_f , C i B.

BV kao smjernicu daje sljedeće vrijednosti:

- $\overline{D}_{\rm f} = 1.0, \quad V_{\rm D_f} = 0.3$
- \overline{C} se određuje ovisno o izboru S–N krivulje (C_{50} i s_L), $V_c = \frac{s_L}{\log C_{50}}$

$$- B = \prod_{i} (B_{i}), \quad V_{B} = \sqrt{\prod_{i} (1 + V_{B_{i}}^{2}) - 1},$$

gdje su V_{Bi} vrijednosti koeficijenata varijacije različitih grešaka modeliranja.

Faktor doprinosa grešci	Srednje vrijednosti	Koeficijenti varijacije
Stanje okoline (mora) B_1	0.90	0.4–0.6
Odziv konstrukcije B_2	0.85	0.1–0.3
Ekstremna opterećenja B ₃	0.95	0.2–0.4
FEM model B_4	1.10	0.1–0.5
Izrada B ₅	0.90	0.1–0.3

Tablica 3.4: Srednje vrijednosti i koeficijenti varijacije varijable B [40]

3.3 Postupak Germanischer Lloyda (GL)

3.3.1 Općenito

Procjena zamorne čvrstoće provodi se na temelju dozvoljenog raspona naprezanja za standardne spektre naprezanja ili na temelju kumulativnog omjera oštećenja. Analiza zamorne čvrstoće ne zahtijeva se ako najveći raspon naprezanja uslijed dinamičkih opterećenja u plovidbi i/ili uslijed promjene gaza, odnosno stanja krcanja, zadovoljava sljedeće uvjete:

- najveći raspon naprezanja uzrokovanog samo dinamičkim opterećenjima u plovidbi $\Delta \sigma_{max} \leq 2.5 \Delta \sigma_{R}$,
- zbroj najvećeg raspona naprezanja uslijed dinamičkih opterećenja u plovidbi i uslijed promjena gaza odnosno stanja krcanja Δσ_{max} ≤ 0.4 Δσ_R.

Pravila se nepromijenjeno primjenjuju za konstrukcije od običnog brodograđevnog čelika i čelika povišene čvrstoće. Rasponi naprezanja $\Delta \sigma$ koji se očekuju za životnog vijeka broda ili nekog konstruktivnog elementa, mogu se opisati spektrom raspona naprezanja (dugoročna raspodjela raspona naprezanja). Upotrebljavaju se tri standardna spektra naprezanja (slika 3.4):



Slika 3.4: Standardni spektri naprezanja [43]

- A: pravocrtni spektar tipični spektar raspona naprezanja uzrokovan plovidbom,
- B: parabolični spektar približno normalne razdiobe raspona naprezanja $\Delta \sigma$,
- C: pravokutni spektar tipični spektar raspona naprezanja od uzbude vijka ili stroja

Ako su naprezanja posljedica samo dinamičkih opterećenja u plovidbi uzima se spektar raspona naprezanja A s brojem ciklusa $n_{\text{max}} = 5 \cdot 10^7$. Pritom su najveća i najmanja dinamička naprezanja posljedica mjerodavnih učinaka od najmanjih i najvećih opterećenja uzrokovanih plovidbom. Općenito treba oprezno pribrajati različite učinke opterećenja.

3.3.2 Zamorna opterećenja

Valovima	izazvana	promjenjiva	opterećenja,	koja	se u	normalnih	slučajevima	trebaju
razmotriti, su:								

Opterećenje	Maksimalno opterećenje	Minimalno opterećenje		
Vertikalni uzdužni	$M_{\rm env} \pm 0.75 M_{\rm env} \pm M_{\rm EP}$	$M_{\rm cuv} = 0.75 M_{\rm unv} = M_{\rm DE}$		
momenti savijanja	MSW + 0.75 MWV + MBF	MAGW ON ON ON WY MART		
Opterećenja palube	n	0		
čvrstoće	PD	U		
Opterećenja na bokove				
broda				
 Ispod LWL 	$10(d-z) + p_0 C_{\rm F}$	$10(d-z)-p_0C_{\rm F}$		
 Iznad LWL 	$p_0 C_{ m F}$	0		
Opterećenja na dno	$10d + p_0 C_{\rm F}$	$10d - p_0 C_{\rm F}$		
Opterećenje punih	$9.81 \cdot h_1 \cdot \rho_c \cdot (1+a_v) + 100 \cdot p_v$	9.81 $h_1 \rho_c (1-a_v) + 100 p_v$		

tankova	ili	ili	
	$9.81 \cdot \rho \cdot [h_1 \cdot \cos \varphi +$	$9.81 \cdot \rho \cdot [h_1 \cdot \cos \varphi + (0.3 \cdot b - y) \cdot$	
	$(0.3 \cdot b + y) \cdot \sin \varphi + 100 \cdot p_v$	$\sin \phi$] + 100· p_v	
	$p_{\rm c} \cdot (1+a_{\rm v})$	$p_{\rm c} \cdot (1-a_{\rm v})$	
Opterećenja od tereta	$p_{ m c} \cdot a_{ m x} \cdot 0.7$	$-p_{\rm c}\cdot a_{\rm x} 0.7$	
	$p_{ m c} \cdot a_{ m y} \cdot 0.7$	$-p_{\rm c}\cdot a_{\rm y}\cdot 0.7$	

Tablica 3.5: Zamorno opterećenje (GL)

Proračun ostalih značajnih promjenjivih naprezanja, kao npr. u uzdužnjacima uslijed relativnog pomaka poprečnih elemenata kao i sva dodatna naprezanja uslijed primjene nesimetričnih elemenata treba dodatno razmotriti.

Dodatne cikluse naprezanja koji proizlaze iz promjene srednjih naprezanja, npr. zbog promjene stanja krcanja ili gaza, općenito ne treba razmatrati dokle god su rasponi naprezanja uzrokovani uvjetima plovidbe kod postojećih stanja krcanja najkritičniji obzirom na zamornu čvrstoću, a najveća promjena srednjeg naprezanja manja od najvećeg raspona naprezanja uzrokovanog uvjetima plovidbe.

3.3.3 Određivanje dinamičke izdržljivosti

Određivanje dinamičke izdržljivosti, ovisno o promatranom detalju, uz primjenu Palmgren–Minerovog pravila za određivanje kumulativnog omjera zamornog oštećenja, bazira se na jednom od tri pristupa:

- preko nazivnog naprezanja σ_n , za zavarene spojeve s pomoću odgovarajuće kategorije detalja $\Delta \sigma_R$ (slika 3.5),
- preko žarišnog naprezanja σ_s , za one zavarene spojeve za koje nije moguća klasifikacija detalja ili kod kojih se pojavljuju dodatna naprezanja koja nisu primjereno obuhvaćena klasifikacijom detalja.
- preko vršnog naprezanja σ_k , koje se može izračunati iz nazivnog naprezanja i teoretskog faktora koncentracije naprezanja K_t [25].

Zavareni spojevi razvrstavaju se u kategorije obzirom na geometrijske i izradbene karakteristike, koje uključuju naknadnu kontrolu kvalitete i definiciju nazivnog naprezanja.

Slika 3.5: Primjer iz tablice detalja IIW-a [43]

Detalji koji nisu sadržani u tablici mogu se klasificirati ili na osnovu lokalnog naprezanja ili izvođenjem posebnih pokusa na zamor. Dozvoljeni raspon naprezanja za standardne spektre može se izračunati kako slijedi:

$$\Delta \sigma_{\rm p} = f_{\rm n} \cdot \Delta \sigma_{\rm Rc} \tag{3.26}$$

gdje je:

 f_n – faktor GL-a za standardne spektre raspona naprezanja (A, B, C), $\Delta \sigma_{Rc}$ – ispravljena vrijednost kategorije detalja prema (3.28).

Najviši raspon naprezanja spektra ne smije prijeći dozvoljenu vrijednost: $\Delta \sigma_{max} \leq \Delta \sigma_{p}$.

3.3.4 Projektne S–N krivulje i kategorije detalja

GL upotrebljava projektne S–N krivulje za zavarene spojeve, koje služe za proračun kumulativnog omjera oštećenja, koje preporuča IIW (slika 2.13). Ove krivulje predstavljaju donju granicu pojasa rasipanja 95% svih raspoloživih rezultata ispitivanja (što odgovara 97.5% vjerojatnosti preživljavanja) i okarakterizirane su referentnom vrijednosti $\Delta \sigma_R$ kod 2·10⁶ ciklusa naprezanja, koja predstavlja kategoriju detalja ili zamornu klasu. Odnos raspona naprezanja i broja ciklusa kod IIW krivulja je:

$$\log(N) = 6.69897 + m \cdot Q \tag{3.27}$$

gdje je:

 $Q = \log (\Delta \sigma_R / \Delta \sigma) - 0.39794/m_0,$ $m = m_0 = 3 \text{ za zavarene spojeve,}$ $m = m_0 = 5 \text{ za slobodne rubove limova.}$

Za konstrukcije podvrgnute promjenjivim rasponima naprezanja moraju se primijeniti S– N krivulje prikazane punom linijom na slici 2.13 (M tip) je:
$$m = m_0$$
, za $Q \le 0$,
 $m = 2m_0 - 1$, za $Q > 0$.

Za raspone naprezanja stalne amplitude (spektar raspona naprezanja C) u okolišu bez korozije (O tip krivulje na slici 2.13) je:

$$m = m_0, \text{ za } Q \le 0,$$

$$m = \infty, \text{ za } Q > 0.$$

Ispravljanje referentne vrijednosti S–N krivulje (ili kategorije detalja) zahtijeva se kad se u obzir uzimaju dodatni utjecajni faktori na zamornu čvrstoću, na način:

$$\Delta \sigma_{\rm Rc} = f_{\rm m} \cdot f_{\rm R} \cdot f_{\rm w} \cdot \Delta \sigma_{\rm R} \tag{3.28}$$

3.3.4.1 Utjecaj materijala – $f_{\rm m}$

Za zavarene spojeve općenito se uzima da je zamorna čvrstoća neovisna o čvrstoći materijala tj. $f_m = 1.0$. Kod slobodnih rubova limova uzima se u obzir utjecaj granice razvlačenja materijala:

$$f_{\rm m} = 1 + \frac{R_{\rm eH} - 235}{1200} \,, \tag{3.29}$$

gdje je:

 $R_{\rm eH}$ najmanja gornja nazivna granica razvlačenja čelika.

3.3.4.2 Utjecaj srednjeg naprezanja – $f_{\rm R}$

$$f_{\rm R} = 1.0, \, \text{za} \, \sigma_{\rm m} \ge \frac{\Delta \sigma_{\rm max}}{2}$$

$$(3.30)$$

$$f_{\rm R} = 1 + c \left(1 - \frac{2\sigma_{\rm m}}{\Delta\sigma_{\rm max}} \right), za - \frac{\Delta\sigma_{\rm max}}{2} \le \sigma_{\rm m} \le \frac{\Delta\sigma_{\rm max}}{2}$$
 (3.31)

$$f_{\rm R} = 1 + 2c$$
, za $\sigma_{\rm m} \le -\frac{\Delta \sigma_{\rm max}}{2}$ (3.32)

gdje je:

c = 0, za zavarene spojeve podvrgnute ciklusima naprezanja stalne amplitude (spektar naprezanja C – slika 3.4),

c = 0.15, za zavarene spojeve podvrgnute ciklusima promjenjivog naprezanja (spektar naprezanja A ili B – slika 3.4),

c = 0.3, za slobodne rubove lima.

3.3.4.3 Utjecaj oblika zavara $-f_w$

U normalnim slučajevima je $f_w = 1.0$. Za sučeljene spojeve poravnatog korijena mora se izabrati ili odgovarajuća kategorija detalja ili faktor oblika zavara $f_w = 1.25$. Da bi se postigao prijelaz bez zareza na krajevima ukrepa ili koljena, koji imaju potpuno provareni zavar i poravnati korijen je $f_w = 1.4$.

3.3.5 Procjena zamora spojeva na osnovu lokalnih naprezanja

Određivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva, može se, kao alternativa prethodnom postupku, izvršiti na temelju lokalnih naprezanja. Za uobičajene dijelove brodskih konstrukcija dovoljno je provesti analizu temeljenu na žarišnom naprezanju σ_s . Žarišno naprezanje definira se kao ekstrapolirano naprezanje u korijenu zavara isključujući lokalnu koncentraciju naprezanja u blizini zavara.

Žarišno naprezanje može se odrediti mjerenjima ili numeričkim putem, tj. primjenom metode konačnih elemenata uz pretpostavku linearne raspodjele naprezanja kroz debljinu lima.



Slika 3.6: Žarišno naprezanje σ_s na rubu zavara [44]

Žarišno naprezanje može se izračunati iz nazivnog naprezanja σ_n i poznatog geometrijskog faktora koncentracije naprezanja K_s :

$$\sigma_{\rm s} = K_{\rm s} \cdot \sigma_{\rm n} \tag{3.33}$$

Pri procjeni zamorne čvrstoće na temelju žarišnog naprezanja upotrebljavaju se S–N krivulje referentnih vrijednosti:

- $-\Delta\sigma_R = 100$ (GL krivulja 100), za K–sučeljene spojeve s kutno zavarenim krajevima, i za kutne zavare koji ne prenose opterećenje ili prenose samo djelomično opterećenje od pridruženog lima,
- $\Delta \sigma_R = 90$ (GL krivulja 90), za kutne zavare, koji prenose ukupno opterećenje pridruženog lima.

U posebnim slučajevima, kod kojih su se geometrijska naprezanja odredila nelinearnom ekstrapolacijom do korijena zavara i u kojima je visoki udio od savijanja, može se dozvoliti povećanje referentnih vrijednosti do 15%.

Referentna vrijednost $\Delta \sigma_{Rc}$ ispravljene S–N krivulje dodatno se korigira faktorom koji opisuje daljnje utjecajne parametre kao što su, npr. prethodne deformacije:

- $f_s = 0.71$, za križne spojeve,
- $f_s = 0.81$, za poprečne ukrepe ili T spojeve,
- $f_s = 1.0$, za ostale spojeve.

Dodatno se mora i razmotriti zamorna čvrstoća s obzirom na greške u korijenu zavara analognom primjenom kategorije detalja.

3.4 Postupak Lloyd's Register of Shipping (LR)

Postupak proračuna zamora po LR-u dijeli se na tri razine:

- Razina 1 najjednostavniji način procjene zamora koji se temelji, za neki promatrani konstrukcijski detalj, na usporedbi sa sličnim detaljima sadržanim u opsežnoj bazi podataka LR-a
- Razina 2 pojednostavljena spektralna metoda provodi se primjenom LR programskog paketa ShipRight FDA (Fatigue Design Assessment) na računalu. Ova razina izvedena je iskustvom u primjeni treće razine procjene zamora.
- Razina 3 potpuni direktni spektralni postupak procjene zamora koji se temelji na osnovnim numeričkim principima, kao npr. proračun gibanja/opterećenja broda, primjena metode konačnih elemenata.

Razina 1 primjenjuje se zajedno s jednom od preostale 2 razine procjene, najčešće je to razina 2, i to onda kada nije moguće provesti proračun razinom 2 za određeni konstrukcijski detalj. Razina 3 primjenjuje se u posebnim slučajevima.

3.4.1 Procjena zamora – razina 1

Razina 1 analize zamora provodi se primjenom Preporuka za projektiranje konstrukcijskih detalja – SDDG (Structural Detail Design Guide). Tijekom životnog vijeka broda, provode se periodični pregledi detalja brodske konstrukcije u svrhu otkrivanja bilo kakvih oštećenja. U slučaju pojave zamorne pukotine, poduzimaju se mjere za sprečavanje širenja pukotine i utvrđuju potrebne promjene detalja da se pukotina više ne pojavi. Podaci o pregledima zamornih oštećenja formiraju opsežnu bazu konstrukcijskih detalja za analizu. Analizom tih iskustvenih podataka formira se SDDG koji sadržava konstrukcijske detalje poboljšanih zamornih osobina. Takav vodič služi projektantima i konstruktorima za izbor dobrih rješenja detalja brodske konstrukcije obzirom na zamor u ranoj fazi projektnog procesa.

Proceduralni koraci su slijedeći:

- utvrđivanje kritičnih područja obzirom na zamor,
- utvrđivanje kritičnih lokacija unutar kritičnih područja,
- usporedba predviđenog detalja s preporučenim detaljem iz SDDG (slika 3.7) i utvrđivanje potrebnog stupnja unapređenja detalja.

Ovaj projektni vodič se redovito unapređuje, usvajajući nove iskustvene podatke, kao i trendove u projektiranju i konstruiranju analizom zamora pomoću FDA i metode konačnih elemenata, te rezultate ispitivanja zamora provedenih od strane LR–a.

Slika 3.7: Detalj iz SDDG-a (Structural Detail Design Guida) [53]

3.4.2 Razine 2 i 3 FDA procedure

Dijagram toka razine 2 i 3 prikazan je na slici 3.8. Matematički model upotrijebljen za spektralni proračun zamora isti je za obje razine. Razlika razine 2 i 3 je u matematičkim modelima upotrijebljenim za proračun valovima izazvanih opterećenja i gibanja, strukturnog odziva, strukturnih utjecajnih koeficijenata i karakterističnom modelu zamorne čvrstoće.



Slika 3.8: Razine 2 i 3 FDA procedure [53]

Razina 2 upotrebljava parametarska i analitička rješenja za efikasnu i racionalnu procjenu. Na temelju sustavnih proračunavanja dobiveni su parametarski modeli, koji se primjenjuju u razini 2: parametarski model valovima izazvanih opterećenja i gibanja i parametarski model faktora koncentracije naprezanja za spojeve na krajevima uzdužnjaka.

Razina 3 primjenjuje temeljne zakone za matematičke modele, kao npr. teoriju odsječaka i metodu konačnih elemenata. Kako su temeljni zakoni korišteni kao osnova za izvođenje parametarskih modela, pouzdanost razine 2 ekvivalentna je onoj razine 3.

3.4.2.1 Razina 2 FDA procedure

Razina 2 je primjenjiva na spojeve uzdužnjaka s poprečnim elementima brodske konstrukcije. Uzdužnjaci su posebno pogodni za ovu razinu proračuna jer je niz značajnih procesa opterećenja ograničen, a naprezanja je moguće odrediti primjenom jednostavnih modela.



Slika 3.9: Opterećenja uzdužnjaka [54]

Opterećenje	Utjecajni koeficijent
Vertikalni moment savijanja na valovima	$C_1 = K_{\rm B_1} \frac{1}{W_{\rm yy}}$
Horizontalni moment savijanja na valovima	$C_2 = K_{\rm B_1} \frac{1}{W_{\rm zz}}$
Hidrodinamički tlak valova	$C_{3} = K_{\rm B_{2}}C_{\rm warp}\frac{sl_{\rm I}^{2}}{12W_{\rm LF}}f_{1}(x)$
Balast/teret inercijski tlak	$C_4 = K_{\rm B_2} C_{\rm warp} \frac{s l_{\rm I}^2}{12W_{\rm LF}} f_1(x)$
Relativni pomak konstrukcije	$C_5 = K_{B_5} \frac{6EI}{l_I^2} f_2(x)$
Rotacija	$C_6 = K_{\mathrm{B}_6} \frac{4EI}{l_1} f_3(x)$

Tablica 3.6:	Utjecajni	koeficijenti	za razinu 2
		5	

gdje je:

 W_{yy} , W_{zz} – momenti otpora presjeka trupa za os y i z,

 $W_{\rm LF}$ – moduli presjeka uzdužnjaka oko prirubnice,

I – moment tromosti uzdužnjaka,

s – razmak ukrepa,

l_I – raspon uzdužnjaka,

K_{Bi} – faktor tipa opterećenja:

$$K_{\rm B_{i}} = \frac{K_{\rm s,i}}{K_{\rm s,a}},\tag{3.34}$$

 $K_{s,a}$ – geometrijski faktor koncentracije naprezanja uslijed aksijalnog opterećenja određen parametarskim formulama,

 $K_{s,i}$ – geometrijski faktor koncentracije naprezanja uslijed tipa opterećenja *i*,

 C_{warp} – faktor vitoperenja (warping) za nesimetrične ukrepe,

 $f_{1,2,3}(x)$ – funkcije za određivanje momenta savijanja na položaju x po duljini uzdužnjaka za određeni tip opterećenja,

E – modul elastičnosti.

3.4.2.2 Razina 3 FDA procedure

Kod ove razine procjene zamora gibanja broda i opterećenja određuju se primjenom teorije odsječaka putem računala, dok se utjecajni koeficijenti proračunavaju metodom konačnih elemenata. Zamorno oštećenje se računa za niz kritičnih ravnina loma za zadanu točku naprezanja pristupom preko mehanike loma. Za određivanje utjecajnih koeficijenata na kritičnim lokacijama upotrebljavaju se globalni i lokalni trodimenzionalni (3D) modeli konačnih elemenata (slika 3.10).

3.4.3 Kriteriji prihvatljivosti projekta obzirom na zamor

Dva su kriterija prihvatljivosti projekta obzirom na zamor prema LR:

- deterministički kriterij indeks zamornog oštećenja F_d treba biti manji od 1 za simulirani period službe od 20 godina, da bi se postigle zadovoljavajuće zamorne karakteristike detalja. Pripadajuća S–N krivulja uzima se za razinu vjerojatnosti preživljavanja od 97.5% za sve detalje,
- probabilistički kriterij probabilistički model temelji se na jednostavnom logaritamsko–normalnom obliku za funkcije graničnih stanja (Wirsching–Chen model).

Slika 3.10: Globalni i lokalni modeli konačnih elemenata za jedan tanker [54]

3.4.4 Jedinstveni pristup određivanju zamorne čvrstoće

Pristup preko S–N krivulja je prihvaćen kao najpraktičnija metoda za potrebe projektno orijentirane procedure. Uslijed raznolikosti detalja brodske konstrukcije, žarišno naprezanje smatra se pogodnijim za procjenu zamorne čvrstoće od nazivnog naprezanja. Kako lokalna geometrija zavara može značajno utjecati na zamornu čvrstoću, uvedeni su parametri utjecaja zareza za pouzdaniju procjenu zamorne čvrstoće kao i za osiguranje bolje kontrole kvalitete standardne izrade.

Pristup preko žarišnog naprezanja s normaliziranim parametrima zareza izabran je kao jedinstveni pristup kod procjene zamorne čvrstoće karakterističnih detalja brodske konstrukcije. Pristup je prikazan slikom 3.11 i može se ukratko opisati:

- Razina 2 temelji se na proceduri 'S–N Curve Expert' (dio FDA paketa) koja omogućava određivanje S–N krivulje za nazivna naprezanja. Ova krivulja dobiva se kombinacijom referentne S–N krivulje za zavarene spojeve i geometrijskih faktora koncentracije naprezanja izvedenih iz parametarskih formula uzimajući u obzir geometrijsku konfiguraciju konstrukcijskog detalja,
- Razina 3 upotrebljava žarišno naprezanje izvedeno iz modela fine mreže konačnih elemenata u skladu s referentnom S–N krivuljom za određivanje zamornog oštećenja izabranih ravnina loma.



Slika 3.11: Jedinstveni pristup određivanja zamorne čvrstoće [54]

Referentne S–N krivulje za zavarene spojeve i parametarski faktori koncentracije naprezanja utvrđeni su zamornim ispitivanjima detalja brodske konstrukcije u velikom mjerilu (npr. 1/2 naravne veličine). Ovaj jedinstveni pristup i njegova korelacija s rezultatima testova predstavljaju racionalnu i konzistentnu bazu za primjenu S–N metodologije na brodske konstrukcije.

4 PRIMJERI PRORAČUNA ZAMORNOG OŠTEĆENJA

Pokazalo se da su najčešća mjesta pojave pukotina od zamora – više od 40% ukupnog broja pukotina od zamora na brodovima – spojevi uzdužnjaka boka s ukrepama poprečnih pregrada i okvirnih rebara tankera i to u području izloženom promjenjivom vanjskom opterećenju, tj. neposredno ispod linije gaza broda [1],[3],[4].



Slika 4.1: Prosječan broj pukotina na uzdužnjacima boka tankera [1]

Proračun zamornog oštećenja proveden je za spoj uzdužnjaka s okvirnim rebrima i to na tri lokacije (slika 4.3) za jedan tanker s dvostrukom oplatom izgrađen u brodogradilištu "Split" (NOV 529). Promatrani detalji nalaze se blizu sredine broda po duljini u balastnom tanku s katodnom zaštitom, u dvoboku tankera s dvostrukim trupom na lijevoj strani broda. Smatra se da su spojevi izrađeni standardno kvalitetno i s odgovarajućim konstrukcijskim tolerancijama. Upotrijebljeni materijal je obični brodograđevni čelik, klasa A po LR ($R_{eH} = 235$ N/mm²).

Glavne karakteristike broda:

 $L_{oa} = 182.5 \text{ m} - \text{duljina preko svega}$ $L_{pp} = 174.8 \text{ m} - \text{duljina između okomica}$ L = 173.15 m - konstruktivna duljina B = 32.2 m - širina broda d = 11 m - konstruktivni gaz $d_1 = 12.20 \text{ m} - \text{maksimalni gaz}$ H = 17.5 m - visina broda v = 15 čv - brzina broda $C_b = 0.82 - \text{koeficijent istisnine}$ $W_D = 16.14 \text{ m}^3 - \text{moment otpora glavnog rebra- paluba}$ $W_B = 21.25 \text{ m}^3 - \text{moment otpora glavnog rebra- dno}$ $\Delta = 47400 \text{ tdw} - \text{nosivost}$

Slika 4.2: Uzdužni presjek tankera



Slika 4.3: Položaj uzdužnjaka na boku i dnu broda R112 (sve dimenzije su u mm)



Slika 4.4: Tank No.3 (sve dimenzije su u mm)



Slika 4.5: Kritična mjesta za koja se računa zamorno oštećenje - dvodno



Slika 4.6: Kritična mjesta za koja se računa zamorno oštećenje – bok broda

4.1 Proračun postupkom Bureau Veritasa

Po BV proceduri za svaki promatrani detalj brodske konstrukcije gledaju se dva stanja krcanja broda – potpuno nakrcan brod i brod u balastu. Za svako od ta dva teretna stanja potrebno je proračunati zamorno oštećenje za četiri kombinacije opterećenja, što ukupno daje osam omjera oštećenja D, po jedan za svako osnovno stanje opterećenja.

Proračun zamornog oštećenja proveden je po proceduri BV-a za tri lokacije:

- *Lokacija 1* spoj uzdužnjaka boka HP 300x11 s ukrepom okvirnog rebra u dvoboku na visini $z_1 = 10.25$ m od osnovice (BL), na rebru R112
- *Lokacija 2* spoj uzdužnjaka boka HP 320x12 s ukrepom okvirnog rebra u dvoboku na visini $z_2 = 6.3$ m od osnovice, na rebru R112
- *Lokacija* 2 spoj uzdužnjaka dna HP 340x14 s ukrepom rebrenice u dvodnu na visini $z_3 = 0$ m od osnovice, na rebru R112

Geometrijske karakteristike uzdužnjaka:



Slika 4.7: Dimenzije bulb profila (HP)

Profil	<i>a</i> [cm]	t _p [cm]	e _x [cm]	Površina A _p [cm ²]	Mom. tromosti za x–x I _p [cm ⁴]	Moment otpora W_p [cm ³]
HP 300x11	30.0	1.1	18.9	46.7	4194	678.4
HP 320x12	32.0	1.2	20.1	54.2	5530	826.4
HP 340x14	34.0	1.4	21.1	65.5	7540	1023.5

Tablica 4.1: Geometrijske karakteristike profila uzdužnjaka

Primjer postupka proračuna maksimalnog zamornog oštećenja po BV-u detaljno je za potpuno nakrcan brod za lokaciju 1.

4.1.1 Slučaj opterećenja 12 – lokacija 1

Slučaj opterećenja 12 odnosi se na potpuno nakrcan brod, te kombinaciju globalnih opterećenja i lokalnih opterećenja:

- moment savijanja na mirnoj vodi,
- vertikalni momenti savijanja na valovima za pregib (valni brijeg) i progib (valni dol),
- dinamički tlak valova kod broda na valnom dolu i valnom brijegu,
- statički tlak tereta/balasta.

4.1.1.1 Proračun opterećenja

Moment savijanja na mirnoj vodi na sredini broda prema knjizi krcanja (progib):

 $M_{\rm SW} = -296250 \, \rm kNm$

Vertikalni momenti savijanja na valovima (za valni dol i valni brijeg):

 $M_{WV,12,progib} = 0.625 M_{WV,progib} = 0.625 \cdot 1504526 = -940329 \text{ kNm},$ $M_{WV,12,pregib} = 0.625 M_{WV,pregib} = 0.625 \cdot 1401944 = 876215 \text{ kNm},$

gdje je M_{WV} vertikalni moment savijanja na sredini broda na valovima:

 $M_{\rm WV, progib} = 110 \ F \ M \ L^2 \ B \ (C_{\rm b} + 0.7) \ 10^{-3} = 1504526 \ \rm kNm,$ $M_{\rm WV, pregib} = 190 \ F \ M \ L^2 \ B \ C_{\rm b} \ 10^{-3} = 1401944 \ \rm kNm,$ $F = 10.75 - \left[(300 - L) / 100 \right]^{1.5} = 9.321$ Tlak mora – valni brijeg:

$$p_{d,max} = \rho_{m.v} \cdot g \cdot (h_1 + s_1) = 1.025 \cdot 9.81 \cdot (1.95 + 5.05) = 70.4 \text{ kN/m}^2$$

gdje je:

 $s_1 = d^{1/4} \cdot (2.3 + L/300 \cdot C_b) = 5.05 \text{ m},$ d = 11 m - konstruktivni gaz, L = 173.15 m - konstruktivna duljina, $C_b = 0.82 - \text{koeficijent istisnine},$ $d_1 = 12.20 \text{ m} - \text{gaz trenutnog stanja krcanja},$ $z_1 = 10.25 \text{ m} - \text{položaj promatranog spoja uzdužnjaka i rebra od osnovice},$ $h_1 = d_1 - z_1 = 12.2 - 10.25 = 1.95 \text{ m}.$

Tlak mora - valni dol:

 $p_{d,min} = 0$, jer je visina vala na valnom dolu $d_1 - 0.75s_1 = 12.20 - 3.79 = 8.41 \text{ m} < z_1 = 10.25 \text{ m}.$

Tlak tereta (nafte) u tanku - statički tlak tereta:

$$h_{\rm s} = \rho_{\rm c} \cdot g \cdot d_{\rm c} = 0.866 \cdot 9.81 \cdot 7.25 = 61.59 \text{ N/mm}^2,$$

gdje je:

 $d_{\rm c} = H - z_1 = 17.5 - 10.25 = 7.25$ m – udaljenost od točke opterećenja do vrha tanka.

4.1.1.2 Proračun naprezanja

4.1.1.2.1 Globalna naprezanja

Momenti savijanja trupa za uzdužnjak iznad neutralne linije poprečnog presjeka brodskog trupa računaju se kako slijedi (tlačna naprezanja su negativna):

Naprezanja od momenta savijanja na mirnoj vodi:

$$\sigma_{1} = \frac{M_{SW}}{W_{D}} \times \frac{z_{1} - z_{NA}}{H - z_{NA}} = \frac{-296250}{16.14} \times \frac{10.25 - 7.552}{17.5 - 7.552} = -5.0 \text{ N/mm}^{2}$$

gdje je:

 $W_{\rm D} = 16.14 \text{ m}^4 - \text{moment}$ otpora poprečnog presjeka trupa za palubu, $z_{\rm NA} = 7.552 \text{ m} - \text{položaj}$ neutralne linije poprečnog presjeka trupa od osnovice H = 17.5 m - visina broda Naprezanja od momenata savijanja na valovima:

$$\sigma_{2,\text{progib}} = \frac{M_{\text{WV,progib}}}{W_{\text{D}}} \times \frac{z_{1} - z_{\text{NA}}}{H - z_{\text{NA}}} = \frac{-940329}{16.14} \times \frac{10.25 - 7.552}{17.5 - 7.552} = -15.8 \text{ N/mm}^{2}$$
$$\sigma_{2,\text{pregib}} = \frac{M_{\text{WV,pregib}}}{W_{\text{D}}} \times \frac{z_{1} - z_{\text{NA}}}{H - z_{\text{NA}}} = \frac{876215}{16.14} \times \frac{10.25 - 7.552}{17.5 - 7.552} = 14.72 \text{ N/mm}^{2}$$

4.1.1.2.2 Lokalna naprezanja

Lokalna naprezanja posljedica su djelovanja vanjskog opterećenja (tlak morske vode) i unutrašnjeg opterećenja (tlak tereta – nafte).

Naprezanja od vanjskog opterećenja (Napomena: vrijednosti naprezanja za jedinična opterećenja $\sigma_{a,1}$, $\sigma_{b,1}$, $\sigma_{c,1}$ proračunate su u prilozima A, B i C):

$$\sigma_{4a,max} = p_{d,max} \cdot \sigma_{a,1} = 70.4 \cdot 1.137 = -80.1 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{4a,min} = p_{d,min} \cdot \sigma_{a,1} = 0 \cdot 1.137 = 0$$

$$\sigma_{4a,max} = p_{d,max} \cdot \sigma_{b,1} = 70.4 \cdot 115.13 \cdot 10^{-3} = -8.1 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{4b,min} = 0$$

$$\sigma_{4c,max} = p_{d,max} \cdot \sigma_{c,1} = 70.4 \cdot 0.313 = 22.1 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{4c,min} = 0$$

Naprezanja od unutrašnjeg opterećenja (teret):

$$\sigma_{4a'} = 0$$

$$\sigma_{4b'} = h_{s} \cdot \sigma_{b,1} = 61.59 \cdot 115.13 \cdot 10^{-3} = 7.1 \text{ N/mm}^{2}$$

$$\sigma_{4c'} = h_{s} \cdot \sigma_{c,1} = 61.59 \cdot 0.313 = -19.3 \text{ N/mm}^{2}$$

4.1.1.3 Određivanje raspona naprezanja

4.1.1.3.1 Raspon nazivnog naprezanja

Rasponi globalnih i lokalnih naprezanja računaju se kao razlika maksimalnih i minimalnih naprezanja za promatrani slučaj opterećenja (indeksi: g – globalno, l – lokalno):

$$S_{12,n} = (\sigma_{12})_{\max} - (\sigma_{12})_{\min}$$

75

Raspon globalnih naprezanja:

$$S_{12,n,g} = (-5.0 + 14.72) - (-5.0 - 15.8) = 30.52 \text{ N/mm}^2$$

Raspon lokalnih naprezanja:

$$S_{12 \text{ n}1} = (-80.1 - 8.6 + 23.3) - (0 + 0 + 0) = 65.4 \text{ N/mm}^2$$

4.1.1.3.2 Raspon žarišnog naprezanja

Raspon žarišnih naprezanja za promatrani konstrukcijski detalj može se izračunati iz nazivnih naprezanja množenjem s geometrijskim faktorima koncentracije naprezanja za promatrani detalj, koji se nalaze u tablicama BV za ograničeni broj konstrukcijskih detalja:

$$S_{12,s,g} = K_{s1} \cdot S_{12,n,g} = 2.57 \cdot 30.52 = 78.44 \text{ N/mm}^2$$

 $S_{12,s,l} = K_{s2} \cdot S_{12,n,l} = 1.21 \cdot 65.4 = 79.1 \text{ N/mm}^2$

gdje je:

 $K_{s1} = 2.57$ – geometrijski faktor koncentracije naprezanja za globalna opterećenja za detalj konstrukcije na lokaciji 1

 $K_{s2} = 1.21 - geometrijski faktor koncentracije naprezanja za lokalna opterećenja za detalj konstrukcije na lokaciji 1$

Ukupni raspon žarišnog naprezanja:

$$S_{12,s} = S_{12,s,g} + S_{12,s,l} = 157.54 \text{ N/mm}^2$$

4.1.1.3.3 Raspon zareznog naprezanja

Faktor koncentracije naprezanja uslijed zavara iznosi:

$$K_{\rm w} = 1.4 \cdot (\theta/30)^{0.5} = 1.715$$

gdje je:

 $\theta = 45^{\circ} - za$ kutni zavar.

Raspon zareznog naprezanja može se onda izračunati kako slijedi:

$$S_{12,k} = K_{w} \cdot S_{12,s} = 1.715 \cdot 157.54 = 270.2 \text{ N/mm}^2$$

4.1.1.4 Proračun kumulativnog omjera oštećenja

U kombinaciji sa zareznim rasponom naprezanja, procedura BV-a pretpostavlja upotrebu S–N krivulje B tipa (HSE krivulja) neovisno o tipu detalja koji se promatra. Konstante materijala m i C_p S–N krivulje B tipa imaju vrijednosti: m = 3, $C_p = 5.8 \cdot 10^{12}$. Bureau Veritas ,također, pretpostavlja da naprezanja slijede Weibullovu dvoparametarsku razdiobu, a parametar oblika proračunat je po formuli (2.38) koju preporučuje IACS, po kojoj je k = 0.915.

Kumulativni omjer oštećenja za slučaj opterećenja 12 računa se po formuli:

$$D_{12} = \frac{N_{\rm t}}{C_{12}} \frac{\left(S_{12}\right)^{\rm m}}{\left(\ln 10^{5}\right)^{\rm m/k}} \mu \Gamma \left(1 + m/k\right) \tag{4.1}$$

gdje je:

$$\begin{split} S_{12,k} &= 270.2 \text{ N/mm}^2 - \text{raspon vršnih naprezanja,} \\ N_t &= 0.7 \cdot 10^8 \ \alpha_p = 0.595 \cdot 10^8 - \text{ukupni broj ciklusa za vijeka trajanja broda,} \\ \alpha_p &= 0.85 - \text{faktor plovidbe,} \\ \mu &= 1 - \left\{ \gamma \left(1 + \frac{m}{k}, \nu \right) - \nu^{-\frac{2}{k}} \gamma \left(1 + \frac{m+2}{k}, \nu \right) \right\} / \Gamma \left(1 + \frac{m}{k} \right) = 0.2654, \\ \gamma \left(1 + \frac{m}{k}, \nu \right) &= \left(1 + \frac{3}{0.915}, 4.073 \right) = 4.09201 - \text{nepotpuna gama funkcija,} \\ \gamma \left(1 + \frac{m+2}{k}, \nu \right) &= 224.246 - \text{nepotpuna gama funkcija,} \\ \Gamma \left(1 + \frac{m}{k} \right) &= 8.60694 - \text{gama funkcija,} \\ \nu &= \left(S_q / S_R \right)^k \ln N_R = 4.073, \\ S_q &= 86.8 \text{ N/mm}^2 - \text{raspon naprezanja na presjeku dva segmenta S-N krivulje,} \\ N_R &= 10^5 - \text{broj ciklusa koji odgovara razini vjerojatnosti 1/N_R,} \\ R_{12} &= \Sigma \sigma_{\min} / \Sigma \sigma_{\max} = -68.218 / -69.762 = 0.977 - \text{omjer naprezanja u slučaju 12} \\ \alpha &= (1 - 0.25 \text{R})^m = 1.927 - \text{koeficijent korekcije konstante } C \text{ za tlačna naprezanja,} \\ C_{12} &= C_0 \cdot \alpha = 5.8 \cdot 10^{12} \cdot 1.927 = 11.1783 \cdot 10^{12}. \end{split}$$

Uvrštenjem gornjih vrijednosti u formulu (4.1) dobije se iznos zamornog oštećenja za slučaj opterećenja 12 – lokacija 1:

$$D_{12} = 0.519$$

4.1.2 Ukupni kumulativni omjer oštećenja

Ukupni kumulativni omjer oštećenja za spoj uzdužnjaka i ukrepe okvirnog rebra na lokaciji 1 dobije se po formulama (3.19), (3.20), (3.21).

Potpuno nakrcan brod	Brod u balastu
$D_{11} = 0.132$	$D'_{11} = 0.102$
$D_{12} = 0.519 = D_0$	$D'_{12} = 0.122 = D'_0$
$D_{21} = 0.042$	$D'_{21} = 0.014$
$D_{22} = 0.391$	$D'_{22} = 0.082$

Za osnovne slučajeve opterećenja vrijednosti zamrnog oštećenja dane su u tablici 4.2.

Tablica 4.2: Omjeri oštećenja osnovnih slučajeva opterećenja - lokacija 1

Maksimalno zamorno oštećenje za detalj brodske konstrukcije na lokaciji 1 je:

$$D = 0.5(0.519 + 0.122) = 0.321.$$

Uz pretpostavljeni projektni vijek trajanja broda $T_{\text{proj}} = 20$ god., vijek trajanja spoja obzirom na oštećenje od zamora dobije se po formuli:

$$T = T_{\text{proj}} / D = 20/0.321 = 62 \text{ god.}$$

Istim postupkom proračunato je zamorno oštećenja za lokacije 2 i 3. Rezultati proračuna prikazani su u sljedećim tablicama:

Potpuno nakrcan brod	Brod u balastu
$D_{11} = 0.004$	$D'_{11} = 0.001$
$D_{12} = 0.247$	$D'_{12} = 0.117$
$D_{21} = 0.092$	$D'_{21} = 0.055$
$D_{22} = 0.140$	$D'_{22} = 0.101$

Tablica 4.3: Omjeri oštećenja osnovnih slučajeva opterećenja – lokacija 2

Maksimalno zamorno oštećenje za detalj brodske konstrukcije na lokaciji 2 je:

$$D = 0.5(0.247 + 0.117) = 0.182.$$

Vijek trajanja spoja obzirom na oštećenje od zamora:

$$T = T_{\text{proj}} / D = 20/0.182 = 109 \text{ god.}$$

Potpuno nakrcan brod	Brod u balastu
$D_{11} = 0.002$	$D'_{11} = 0.001$
$D_{12} = 0.101$	$D'_{12} = 0.139$
$D_{21} = 0.050$	$D'_{21} = 0.111$
$D_{22} = 0.090$	$D'_{22} = 0.117$

Tablica 4.4: Omjeri oštećenja osnovnih slučajeva opterećenja – lokacija 3

Maksimalno zamorno oštećenje za detalj brodske konstrukcije na lokaciji 2 je:

D = 0.5(0.101 + 0.139) = 0.12.

Vijek trajanja spoja obzirom na oštećenje od zamora:

$$T = T_{\text{proj}} / D = 20/0.12 = 167 \text{ god.}$$

4.1.3 Zamorna pouzdanost

Zamorna pouzdanost opisana je indeksom sigurnosti β (2.43). Za potpuno nakrcan brod dobivene su vrijednosti indeksa sigurnosti, vjerojatnosti popuštanja i zamorne pouzdanosti, za promatrane lokacije na brodu, prikazane u tablici 4.5:

	Vrijeme do popuštanja T [s]	Vrijeme do popuštanja T [god.]	Indeks sigurnosti β	Vjerojatnost popuštanja $P_{\rm f} = \Phi(-\beta)$	Pouzdanost $R=1-\Phi(-\beta)$
Lokacija 1	57.165·10 ⁸	181	2.008	0.022	0.977
Lokacija 2	$112.84 \cdot 10^8$	357	2.573	0.005	0.994
Lokacija 3	$129.072 \cdot 10^9$	409	4.651	$1.65 \cdot 10^{-6}$	0.999

Tablica 4.5: Pouzdanost detalja brodske konstrukcije

4.2 Primjer proračuna zamornog oštećenja postupkom GL-a

Prikazan je proračun zamornog oštećenja za spoj na lokaciji 2 (slika 4.3). Analiza zamora spojeva provedena je na temelju lokalnih naprezanja, kod kojih GL primjenjuje pristup preko žarišnog naprezanja uz upotrebu IIW S–N krivulje 100 (kategorija detalja $\Delta \sigma_R = 100 \text{ N/mm}^2$) bez obzira na tip spoja koji se razmatra.

4.2.1 Proračun zamornog oštećenja za potpuno nakrcan brod – lokacija 2

4.2.1.1 Proračun opterećenja

4.2.1.1.1 Globalna opterećenja

Moment savijanja trupa na mirnoj vodi prema knjizi krcanja:

 $M_{\rm sw, progib} = -296250 \text{ kNm}.$

Vertikalni uzdužni momenti savijanja trupa na valovima:

Minimalni moment: $M_{g,min,pregib} = M_{sw} + 0.75 M_{wv} + M_{BF} = 775344 \text{ kNm}$ Maksimalni moment: $M_{g,max,progib} = M_{sw} - 0.75 M_{wv} - M_{BF} = -1446252 \text{ kNm}$

gdje je:

$$\begin{split} M_{\text{wv,pregib}} &= +190 \ M \ C_{\text{w}} \ L^{2} \ B \ C_{\text{b}} \ 10^{-3} = 1428791 \ \text{kNm}, \\ M_{\text{wv,progib}} &= -110 \ M \ C_{\text{w}} \ L^{2} \ B \ (C_{\text{b}} + 0.7) \ 10^{-3} = -1533336 \ \text{kNm}, \\ M &= 1, \ \text{koeficijent razdiobe}, \\ C_{\text{w}} &= 10.75 - \left[\frac{300 - L}{100}\right]^{1.5} = 9.321, \\ L &= 174.8 \ \text{m}, \\ C_{\text{b}} &= 0.82 - \text{koeficijent istisnine}, \\ B &= 32.2 \ \text{m} - \text{širina broda}, \\ M_{\text{BF}} &= w \ L^{4} \ B \ n_{1} \ n_{2} \ n_{3} \ M_{1} \ 10^{-5} - \text{dodatni moment savijanja uslijed zapljuskivanja}, \\ M_{\text{BF, pregib}} &= 1.4 \ L^{4} \ B \ n_{1} \ n_{2} \ n_{3} \ 1 \ 10^{-5} = 0, \\ M_{\text{BF, progib}} &= -2.2 \ L^{4} \ B \ n_{1} \ n_{2} \ n_{3} \ 1 \ 10^{-5} = 0, \\ n_{1} &= \frac{b_{1} - b_{2}}{1.2 \left(H - T_{1}\right)} - 1 = 0 \ \text{jer mora biti} \ n_{1} \ge 0, \end{split}$$

 $b_1 = 32.1 \text{ m} - \text{širina najgornje neprekinute palube na } 0.8L \text{ od krmene okomice},$ $b_2 = 31.8 \text{ m} - \text{širina vodne linije na } 0.8L \text{ od krmene okomice},$ $d_1 = 12.20 \text{ m} - \text{gaz pri stvarnom stanju krcanja (nakrcan brod)},$ H = 17.5 m - visina broda,

$$n_2 = 1 - \frac{(145 - L)^2}{1225} = 0.353,$$

$$n_3 = 0.33 + 0.67 \frac{v}{1.6\sqrt{L}} = 0.807,$$

v = 15 čv – brzina broda.

4.2.1.1.2 Lokalna opterećenja

Vanjsko opterećenje na bokove broda --tlak mora:

$$p_{d,max} = 10(d_1 - z) + p_o C_F = 88.76 \text{ kN/m}^2$$

 $p_{d,min} = 10(d_1 - z) - p_o C_F = 29.24 \text{ kN/m}^2$,

gdje je:

 $d_1 = 12.20 \text{ m} - \text{gaz nakrcanog broda},$ $z = z_2 = 6.3 \text{ m} - \text{položaj uzdužnjaka po visini od osnovice},$ $p_o = 2.1(C_b + 0.7) \cdot C_w \cdot C_L \cdot f = 29.76 \text{ kN/m}^2 - \text{osnovno vanjsko opterećenje},$ $C_L = 1.0 \text{ za } L > 90 \text{ m},$ f = 1.0, koeficijent za vanjsku oplatu, $C_F = 1.0, \text{ za } 0.2 < x/L < 0.7.$

Unutrašnje opterećenje punih tankova – tlak tereta:

$$h_{d,max} = 9.81\rho_c [h_1\cos\varphi + (0.3b+y)\sin\varphi] + 100 p_v = 162.6 \text{ kN/m}^2$$

 $h_{d,min} = 9.81\rho_c [h_1\cos\varphi + (0.3b-y)\sin\varphi] + 100 p_v = 80.64 \text{ kN/m}^2$

gdje je:

 $\rho_c = 0.866 \text{ t/m}^3 - \text{gustoća tereta},$ $h_1 = H - z_2 = 17.5 - 6.3 = 11.2 \text{ m}$ udaljenost središta opterećenja od vrha tanka, $\varphi = 20^\circ$ -projektni kut poprečnog nagiba broda, b = 14.0 m - širina tanka mjerena pri vrhu tanka, y = 14.1 m - udaljenost središta opterećenja od središnje okomice tanka, $p_v = 0.2 \text{ bar} - \text{minimalni tlak otvaranja prekotlačnog ventila}.$

4.2.1.2 Proračun naprezanja

Indeksi upotrijebljenji u proračunu: l - lokalno, v - vanjsko, g - globalno, r - relativni otklon, u - unutrašnje, dv - dvobok.

4.2.1.2.1 Nazivna naprezanja

Naprezanje od vertikalnih momenata savijanja trupa:

$$\sigma_{g,max} = \frac{M_{g,max}}{W_{B}} \times \frac{z_{NA} - z_{2}}{z_{NA}} = \frac{-1446252}{21.25} \times \frac{7.552 - 6.3}{7.552} = -11.11 \text{ N/mm}^{2},$$

$$\sigma_{g,min} = \frac{M_{g,min}}{W_{B}} \times \frac{z_{NA} - z_{2}}{z_{NA}} = \frac{755344}{21.25} \times \frac{7.552 - 6.3}{7.552} = 5.9 \text{ N/mm}^{2},$$

gdje je:

 $W_{\rm B} = 21.25 \text{ m}^3$ – moment otpora poprečnog presjeka trupa za dno broda, $z_{\rm NA} = 7.552 \text{ m}$ – udaljenost neutralne osi poprečnog presjeka od osnovice.

Naprezanja uslijed lokalnog vanjskog opterećenja (vrijednosti jediničnih opterećenja $\sigma_{i,j}$ dane su u prilozima A, B i C.):

Savijanje uzdužnjaka:

$$\sigma_{l,v,max} = p_{d,max} \cdot \sigma_{a,2} = 88.76 \cdot 0.933 = -82.8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{l,v,min} = p_{d,min} \cdot \sigma_{a,2} = 29.24 \cdot 0.933 = -27.3 \text{ N/mm}^2$$

Relativni otklon poprečne konstrukcije:

$$\sigma_{l,v,max,r} = p_{d,max} \cdot \sigma_{b,2} = 88.76 \cdot 124.61 \cdot 10^{-3} = -11.1 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{l,v,min,r} = p_{d,min} \cdot \sigma_{b,2} = 29.24 \cdot 124.61 \cdot 10^{-3} = -3.64 \text{ N/mm}^2$$

Savijanje dvoboka kao ortotropne ploče:

 $\sigma_{l,v,max,dv} = p_{d,max} \cdot \sigma_{c,2} = 88.76 \cdot 0.313 = 27.8 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{l,v,min,dv} = p_{d,min} \cdot \sigma_{c,2} = 29.24 \cdot 0.313 = 9.2 \text{ N/mm}^2$

Naprezanja uslijed lokalnog unutarnjeg opterećenja:

Savijanje uzdužnjaka:

$$\sigma_{l,u,max} = 0$$
 (tankovi dvoboka su prazni)

Relativni otklon poprečne konstrukcije:

$$\sigma_{l,u,max,r} = h_{d,max} \cdot \sigma_{b,2} = 162.6 \cdot 124.61 \cdot 10^{-3} = 20.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{l,u,min,r} = h_{d,min} \cdot \sigma_{b,2} = 80.64 \cdot 124.61 \cdot 10^{-3} = 10.05 \text{ N/mm}^2$$

Savijanje dvoboka kao ortotropne ploče:

$$\sigma_{l,u,max,dv} = h_{d,max} \cdot \sigma_{c,2} = 162.6 \cdot 0.313 = -50.9 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{l,u,max,dv} = h_{d,max} \cdot \sigma_{c,2} = 80.64 \cdot 0.313 = -25.24 \text{ N/mm}^2$$

4.2.1.2.2 Rasponi nazivnih naprezanja

$$\Delta \sigma_{n,g} = \sigma_{g,max} - \sigma_{g,min} = -11.1 - 5.9 = -17.01 \text{ N/mm}^2,$$

$$\Delta \sigma_{n,l} = \sigma_{l,max} - \sigma_{l,min} = -106.95 - (-26.68) = 80.3 \text{ N/mm}^2$$

4.2.1.2.3 Rasponi geometrijskih naprezanja

$$\Delta \sigma_{s,g} = K_{s,g} \cdot \Delta \sigma_{n,g} = 2.57 \cdot 17.01 = 43.7 \text{ N/mm}^2$$
$$\Delta \sigma_{s,l} = K_{s,l} \cdot \Delta \sigma_{n,l} = 1.21 \cdot 80.3 = 97.2 \text{ N/mm}^2$$
$$\Delta \sigma_s = \Delta \sigma_{s,g} + \Delta \sigma_{s,l} = 43.7 + 97.2 = 140.9 \text{ N/mm}^2$$

gdje je:

 $K_{\rm s}$ – faktor koncentracije naprezanja za detalj na lokaciji 2 (po tablici detalja)

 $K_{\rm s,g} = 2.57 - za$ globalna naprezanja,

 $K_{s,l} = 1.21 - za$ lokalna naprezanja.

4.2.1.3 Izbor S–N krivulje

Za proračun zamornog oštećenja na temelju lokalnih naprezanja s pristupom preko žarišnog naprezanja, GL upotrebljava S–N krivulju 100, za koju je referentna vrijednost (broj kategorije detalja) $\Delta \sigma_{\rm R} = 100 \text{ N/mm}^2 \text{ za } 2 \cdot 10^6 \text{ ciklusa. Referentnu vrijednost treba ispraviti zbog$ utjecaja materijala (*f*_m), srednjeg naprezanja (*f*_R), oblika zavara (*f*_w)i prethodnih deformacija (*f*_s):

$$\Delta \sigma_{\rm Rc} = \Delta \sigma_{\rm R} \cdot f_{\rm m} \cdot f_{\rm w} \cdot f_{\rm R} \cdot f_{\rm s} = 100 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.3 \cdot 1.0 = 130 \text{ N/mm}^2$$

gdje je:

 $\Delta \sigma_{Rc}$ ispravljena vrijednost kategorije detalja,

 $f_{\rm m} = 1.0$ za zavarene spojeve,

 $f_{\rm R} = 1.3$ u području tlačnih naprezanja,

 $f_s = 1.0 - za$ tip spoja kao na lokaciji 2,

 $f_{\rm w} = 1.0 -$ utjecaj oblika zavara u normalnim slučajevima.

4.2.1.4 Određivanje omjera zamornog oštećenja D

Zamorno oštećenje D računa se po Palmgren–Minerovom pravilu:

$$D = \frac{N_{\rm t}}{C} \frac{\left(\Delta \sigma_{\rm s}\right)^m}{\left(\ln N_{\rm R}\right)^{m/k}} \mu \Gamma \left(1 + m/k\right)$$

gdje je:

 $N_{\rm t} = 0.5 \cdot 10^8$ – broj ciklusa naprezanja u 20 god. službe broda, k = 1.1 - 0.35 (L-100)/300 = 0.915 –parametar oblika Weibullove razdiobe naprezanja, $p = 1/N_{\rm R} = 10^{-6}$ – odabrana razina vjerojatnosti premašivanja, $N_{\rm R} = 10^6$ – broj ciklusa naprezanja za odabranu razinu vjerojatnosti premašivanja, $\Delta \sigma_{\rm s} = 140.9 \text{ N/mm}^2$ – raspon naprezanja za razinu vjerojatnosti premašivanja 10^{-5} , m = 3 – konstanta za krivulju 100 $C = 4.394 \cdot 10^{12}$ – konstanta ovisna o izabranoj S–N krivulji, proračunata prema (4.5).

Konstanta C nije izravno definirana za IIW tip S–N krivulja, stoga je potrebno promijeniti izraz za računanje omjera oštećenja D.

Opći izraz za omjer zamornog oštećenja je:

$$D = N_{t} \cdot \int_{0}^{\infty} \frac{f(\Delta\sigma)}{N(\Delta\sigma)} d\Delta\sigma$$
(4.2)

U izrazu (4.2) potrebno je odrediti $N(\Delta\sigma)$.

Veza raspona naprezanja i broja ciklusa kod IIW krivulja je dana jednadžbom (Napomena: svi logaritmi su s bazom 10):

$$\log(N) = 6.69897 + m Q$$

gdje je:

 $Q = \log (\Delta \sigma_R / \Delta \sigma_{max}) - 0.39794 / m_0,$ $\Delta \sigma_R$ - referentna vrijednost S-N krivulje (kategorija detalja), $m_0 = 3.$ Ekvivalentna vrijednost konstanti C, kod primjene IIW krivulja, može se odrediti kako slijedi:

$$\log (x) = 6.69897,$$

$$\log (N) = \log (x) + m \left[\log \left(\frac{\Delta \sigma_{\text{R}}}{\Delta \sigma_{\text{max}}} \right) - \frac{0.39794}{m_0} \right],$$

$$\log (N) = \log (x) + m \cdot \log \left(\frac{\Delta \sigma_{\text{R}}}{\Delta \sigma_{\text{max}}} \right) - 0.39794 \frac{m}{m_0},$$

$$m/m_0 = 1,$$

$$\log (y) = 0.39794,$$

$$\log (N) = \log (x) + m \cdot \log \left(\frac{\Delta \sigma_{\text{R}}}{\Delta \sigma_{\text{max}}} \right) - \log (y),$$

$$x \cdot \left(\frac{\Delta \sigma_{\text{R}}}{\Delta \sigma_{\text{max}}} \right)^m$$

$$N = \frac{\left(\Delta \sigma_{\max}\right)}{y}$$
$$\Delta \sigma_{\max} = \Delta \sigma_{s},$$
$$N = \frac{x}{y} \cdot \left(\frac{\Delta \sigma_{R}}{\Delta \sigma_{s}}\right)^{m},$$

gdje su x, y i $\Delta \sigma_R$ konstante, pa se uvrštavanjem u izraz (4.2) dobije:

$$D = \frac{y}{x} \cdot \frac{N_{\rm t}}{\left(\Delta\sigma_{\rm s}\right)^{\rm m}} \cdot \int_{0}^{\infty} \left(\Delta\sigma_{\rm s}\right)^{\rm m} \cdot f\left(\Delta\sigma_{\rm s}\right) d\Delta\sigma_{\rm s} , \qquad (4.3)$$

a uz pretpostavku Weibullove razdiobe naprezanja i S-N krivulju s promjenom nagiba konačno se dobije

$$D = \frac{y}{x} \cdot \frac{N_{\rm t}}{\left(\Delta\sigma_{\rm Rc}\right)^{\rm m}} \cdot \frac{\left(\Delta\sigma_{\rm s}\right)^{\rm m}}{\left(\ln N_{\rm R}\right)^{\rm m/k}} \cdot \mu \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m}{k}\right). \tag{4.4}$$

Iz gornje jednadžbe se vidi da je:

$$C = \frac{x \cdot \left(\Delta \sigma_{\rm Rc}\right)^{\rm m}}{y}, \qquad (4.5)$$

Za potpuno nakrcan brod indeks zamornog oštećenja za detalj na lokaciji 2 je onda:

$$D_{\text{nakrcan},2} = 0.1$$

4.2.1.5 Ukupno zamorno oštećenje

Omjer zamornog oštećenja može se na isti način izračunati za ostale lokacije i slučajeve opterećenja. Ukupno zamorno oštećenje računa se za svaku lokaciju (prema IACS-u):

$$D = 0.5 \left(D_{\text{nakrcan}} + D_{\text{balast}} \right) \tag{4.6}$$

Rezultati proračuna zamornog oštećenja, kao i vijek trajanja detalja *T* za projektni vijek broda $T_{proj} = 20$ god., prikazani su u tablici 4.6.

Lokosijo	Stania Izraania	Omjer	Ukupno zamorno	Vijek trajanja	
Lokacija	Lokacija Stanje krčanja		oštećenje D	$T = T_{\rm proj} / D$	
1	Potpuno nakrcan	0.155	0.188	106 god	
1	Balast	0.221	0.100	100 god.	
2	Potpuno nakrcan	0.100	0.060	300 god	
2	Balast	0.020	0.000	500 gou.	
3	Potpuno nakrcan	0.202	0.136	147 god	
3	Balast	0.070	0.150	147 gou.	

Tablica 4.6: Zamorno oštećenje po proceduri GL-a

4.3 Proračun zamora programom ShipRight FDA (LR)

Proračun zamornog oštećenja Lloyd's Register of Shipping provodi primjenom programskog paketa ShipRight FDA. Izlazni rezultati prikazuju se nizom različitih dijagrama i tablica (slike 4.8 - 4.32). Proračunom se osim indeksa zamornog oštećenja D, dobivaju i vjerojatnosti oštećenja u 20 godina, indeksi sigurnosti i vijek trajanja detalja brodske konstrukcije [54]. Upotrijebljena verzija programa, v.2.4 β , ograničene je primjene. Proračun zamora se može provesti samo za tankere s dvostrukom oplatom i brodove za rasute terete, i to za ograničeni broj detalja brodske konstrukcije navedenih tipova brodova [55]. Za potrebe rada napravljen je proračun spojeva uzdužnjaka s poprečnim rebrima i pregradama. Proračun je proveden automatski za standardne rute tankera prema ugrađenom modulu za određivanje rute plovidbe. Zamorna oštećenja D proračunata programom FDA, za tri promatrane lokacije na tankeru, dana su u tablici 4.7:

Lokacija	1	2	3
Zamorno oštećenje D	0.526	0.325	0.418

Tablica 4.7: Zamorno oštećenje D po LR proceduri



Slika 4.8: Indeks zamornog oštećenja u 20 godina za rebro 112 (ovojnica D = 1.0)



Slika 4.9: Deterministički vijek trajanja do loma za rebro 112 (ovojnica T = 20.0 godina)



Slika 4.10: Vjerojatnost popuštanja u 20 godina za rebro 112 (ovojnica = $1.0 \cdot 10^{-2}$)



Slika 4.11: Indeks sigurnosti u 20 godina za rebro 112 (ovojnica = 2.0)



Slika 4.12: Indeks zamornog oštećenja D za 20 godina službe - dno, lokacija 1



Slika 4.13: Indeks zamornog oštećenja D za 20 godina službe – bok broda, lokacija 2



Slika 4.14: Indeks zamornog oštećenja D za za 20 godina službe – bok broda, lokacija 3



Slika 4.15: Vjerojatnost popuštanja u 20 godina – bok broda, lokacija 1



Slika 4.16: Vjerojatnost popuštanja u 20 godina – bok broda, lokacija 2



Slika 4.17: Vjerojatnost popuštanja u 20 godina – dno, lokacija 3



Slika 4.18: Indeks sigurnosti u 20 godina – bok broda, lokacija 1



Slika 4.19: Indeks sigurnosti u 20 godina – bok broda, lokacija 2



Slika 4.20: Indeks sigurnosti u 20 godina – dno, lokacija 3



Slika 4.21: Indeks zamornog oštećenja u 20 godina – dno broda svi uzdužnjaci



Slika 4.22: Vijek trajanja u godinama – dno broda svi uzdužnjaci



Slika 4.23: Indeks sigurnosti u 20 godina – dno broda svi uzdužnjaci



Slika 4.24: Indeks zamornog oštećenja u 20 godina – bok broda svi uzdužnjaci



Slika 4.25: Vijek trajanja u godinama – bok broda svi uzdužnjaci



Slika 4.26: Indeks sigurnosti za 20 godina službe broda – bok broda svi uzdužnjaci


Slika 4.27: Vjerojatnost popuštanja za rebro 112 – dno broda, lokacija 3



Slika 4.28: Indeks sigurnosti za rebro 112 - dno broda, lokacija 3



Slika 4.29: Vjerojatnost popuštanja za rebro 112 – bok broda, lokacija 2



Slika 4.30: Indeks sigurnosti za rebro 112 – bok broda, lokacija 2



Slika 4.31: Vjerojatnost popuštanja za rebro 112 – bok broda, lokacija 1



Slika 4.32: Indeks sigurnosti za rebro 112 – bok broda, lokacija

5 ANALIZA UTJECAJNIH PARAMETARA

U ovom poglavlju prikazana je usporedba rezultata proračuna zamornog oštećenja i vijeka trajanja spojeva za tri lokacije tankera s dvostrukom oplatom i tri lokacije broda za rasute terete. Podaci o brodu za rasute terete dani su u prilogu D.

Analizirani su sljedeći utjecajni parametri zamora brodskih konstrukcija:

- Parametar oblika Weibullove razdiobe (k)
- Morska okolina (korozija)
- Izrada (tolerancije)
- Utjecaj izbora S–N krivulje

Prikazan je i utjecaj kombinacije lokalnog i globalnog opterećenja za tri lokacije tankera s dvostrukom oplatom. Na kraju su dana moguća poboljšanja detalja brodske konstrukcija, koja smanjuju zamorno oštećenje.

5.1 Usporedba rezultata proračuna zamora

Prikazani su indeksi zamornog oštećenja *D* i vijek trajanja $T = T_{proj} / D$ za tri lokacije tankera s dvostrukom oplatom, te za tri lokacije broda za rasute terete, proračunati po procedurama Bureau Veritasa, Germanischer Lloyda i Lloyd's Registra, za projektni vijek od $T_{proj} = 20$ godina.

5.1.1 Rezultati proračuna zamora tankera

Lok.	GL	BV	LR
1	0.188	0.321	0.526
2	0.060	0.182	0.325
3	0.136	0.120	0.418



Slika 5.1: Usporedba indeksa zamornog oštećenja D tankera



Slika 5.2: Usporedba vijeka trajanja spojeva u godinama tankera

5.1.2 Rezultati proračuna zamora broda za rasute terete

Lok.	GL	BV	LR
1	0.785	1.437	1.064
2	0.491	0.597	0.272
3	0.56	1.2	1.088

Lok.

GL

BV

LR



5.3: Usporedba indeksa zamornog oštećenja D broda za rasute terete



Lok.	GL	BV	LR
1	25	14	19
2	41	34	74
3	36	17	18

Slika 5.4: Usporedba vijeka trajanja spojeva u godinama broda za rasute terete

5.2 Utjecaj oblika razdiobe naprezanja

Pokazalo se da je proračunati zamorni vijek zavarenih spojeva brodske konstrukcije izrazito osjetljiv na promjenu parametra oblika Weibullove razdiobe [3]. Vrijednost parametra oblika k može se pouzdano odrediti samo kroz spektralnu analizu zamora ili mjerenjima. Kao smjernica može se uzeti vrijednost parametra oblika razdiobe naprezanja po formuli [41]:

$$k = 1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300} \tag{5.1}$$

gdje je:

L – duljina broda u metrima.

Ova funkcija predstavlja približno srednju vrijednost između vrijednosti koje su u svojim ispitivanjima dobili ABS i DNV. Vrijednosti Weibullovog parametra oblika variraju ovisno o dominantnom periodu odziva trupa i promatranim valnim uvjetima.

Analiziran je utjecaj parametra oblika razdiobe za vrijednosti između k = 0.7 do k = 1.3 za tri promatrane lokacije tankera i broda za rasuti teret. Vrijednost k = 0.915 dobivena je prema (5.1).



Slika 5.5: Utjecaj k – tanker – lokacija 1



Slika 5.6: Utjecaj k – tanker – lokacija 2

k

0.7

0.8

0.9

0.915

1

1.1

1.2

1.3

k 0.7

0.8

0.9

0.915

1 1.1

1.2

1.3

k

0.7

0.8

0.9

0.915

1 1.1

1.2

1.3

GL

0.054

0.086

0.131

0.136

0.190

0.265

0.355

0.463

GL

0.320 0.494

0.738

0.785

1.067

1.489

2.017

2.659



Slika 5.7: Utjecaj k – tanker – lokacija 3



Slika 5.8: Utjecaj k – brod za rasute terete – lokacija 1



Lokacija 2 – bulk (bok)					
k	GL	BV			
0.7	0.197	0.245			
0.8	0.307	0.377			
0.9	0.464	0.5645			
0.915	0.490	0.5975			
1	0.668	0.8155			
1.1	0.929	1.1385			
1.2	1.252	1.5435			
1.3	1.636	2.037			

k

0.7

0.8

0.9

0.915

1

1.1

1.2

1.3

Slika 5.9: Utjecaj k – brod za rasute terete – lokacija 2



Slika 5.10: Utjecaj k – brod za rasute terete – lokacija 3

Na prethodnim dijagramima je jasno vidljiv utjecaj parametra oblika razdiobe naprezanja na zamorno oštećenje: s povećanjem parametra k raste i zamorno oštećenje D. Može se uočiti nelinearan porast vrijednosti oštećenja s povećanjem parametra oblika. Vidi se, također, da povećanje oštećenja vrijedi neovisno o tipu broda, kao i o položaju promatranog zavarenog spoja unutar brodske konstrukcije.

Vrijednosti indeksa zamornog oštećenja D određene su uz pretpostavku da se dugoročna raspodjela naprezanja može aproksimirati dvoparametarskom Weibullovom razdiobom, pa je razmotren utjecaj parametra oblika k na funkciju gustoće i funkciju razdiobe vjerojatnosti kao i na najznačajnije statističke veličine.

5.2.1 Faktori senzitivnosti

Za jednostavnu ocjenu utjecaja parametra oblika razdiobe naprezanja k, pogodno je izvesti faktor senzitivnosti koji je moguće odrediti metodom konačnih razlika kako slijedi [56]:

$$\frac{\Delta D}{\Delta k} = \frac{D(k + \Delta k) - D(k)}{\Delta k}$$
(5.2)

Faktori senzitivnosti za nekoliko vrijednosti k, za razmatrane lokacije tankera i broda za rasuti teret, dani su zbog usporedbe u sljedećim tablicama:

Tanker	D(0.8)	D(0.9)	ΔD	$\Delta D/\Delta k$
Lokacija 1	0.2023	0.3030	0.1007	1.007
Lokacija 2	0.0373	0.057	0.0197	0.197
Lokacija 3	0.086	0.131	0.045	0.45

Tablica 5.1: Faktori senzitivnosti – tanker

Brod za ras. teret	D(0.8)	D(0.9)	ΔD	$\Delta D/\Delta k$
Lokacija 1	0.494	0.738	0.244	2.440
Lokacija 2	0.3075	0.464	0.1565	1.565
Lokacija 3	0.353	0.53	0.177	1.770

Tablica 5.2: Faktori senzitivnosti – brod za rasuti teret

Tanker	D(1.1)	D(1.2)	ΔD	$\Delta D/\Delta k$
Lokacija 1	0.013	0.832	0.819	8.19
Lokacija 2	0.116	0.156	0.04	0.40
Lokacija 3	0.265	0.355	0.09	0.90

Tablica 5.3: Faktori senzitivnosti – tanker

Brod za ras. teret	D(1.1)	D(1.2)	ΔD	$\Delta D/\Delta k$
Lokacija 1	1.489	2.017	0.528	5.28
Lokacija 2	0.929	1.252	0.323	3.23
Lokacija 3	1.064	1.436	0.372	3.72

Tablica 5.4: Faktori senzitivnosti – brod za rasuti teret

Iz tablica 5.1 - 5.4 vidi se velika osjetljivost zamornog oštećenja *D* na promjenu Weibullovog parametra oblika *k*. Na lokaciji 1 tankera to je posebno izraženo: na tom mjestu faktor senzitivnosti raste za ~ 8 puta, dok je promjena zamornog oštećenja svega 0.3. Na ostalim promatranim lokacijama tankera, kao i na sve tri lokacije broda za rasute terete, vidljiva je vrlo ujednačena promjena faktora senzitivnosti. Za promjenu zamornog oštećenja sa intervala 0.8 do 0.9, na interval 1.1 do 1.2, faktori senzitivnosti za sve navedene lokacije imaju ujednačenu promjenu ~ 2 puta, pa je moguća i njihova primjena u proračunavanju zamornog oštećenja pri određenoj promjeni parametra *k*.

Ovakvi rezultati primjene faktora senzitivnosti donekle su i očekivani: najveće promjene njihovih vrijednosti utvrđene su upravo na lokaciji 1 tankera, tj. na mjestu neposredno ispod gaza nakrcanog broda. Na toj lokaciji prisutne su najveće neizvjesnosti u određivanju opterećenja konstrukcije, posebno lokalnog opterećenja.

5.2.2 Weibullova razdioba

Weibullova funkcija gustoće vjerojatnosti dana je izrazom:

$$f(\sigma) = \left(\frac{k}{w}\right) \cdot \left(\frac{\sigma}{w}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{w}\right)^{k}\right]$$
(5.3)

gdje je:

 $w - \text{karakteristična vrijednost } \sigma, w = \Delta \sigma / (\ln N_{\text{R}})^{1/k},$

 $\Delta \sigma$ – raspon naprezanja za razinu vjerojatnosti $p = 1/N_{\rm R}$, $N_{\rm R}$ – od 10⁻³ do 10⁻⁵, broj ciklusa za razinu vjerojatnosti p.

Funkcija razdiobe vjerojatnosti:

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{w}\right)^{k}\right]$$
(5.4)

Funkcija gustoće vjerojatnosti i funkcija razdiobe vjerojatnosti sadrže sve informacije o promatranoj varijabli (opterećenje, rasponi naprezanja). Na slikama 5.11 i 5.12 prikazane su promjene funkcija za različite parametre k, za vrijednosti $\Delta \sigma$ i $N_{\rm R}$ po proceduri Bureau Veritasa, slučaj opterećenja 12 za lokaciju 1.



Slika 5.11: Promjena oblika funkcije gustoće vjerojatnosti za k = 0.7-1.3



Slika 5.12: Promjena oblika funkcije razdiobe vjerojatnosti za k = 0.7-1.3

Između parametara oblika k Weibullove razdiobe i statističkih parametara distribucije razmatrane pojave može se uspostaviti veza preko matematičkog očekivanja i standardne devijacije.

Matematičko očekivanje μ_{e} i standardna devijacija s_{D} računaju se po formulama:

$$\mu_{\rm e} = w \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \tag{5.5}$$

$$s_{\rm D} = \sqrt{w \cdot \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]}$$
(5.6)

k	Očekivanje µ _e	Standardna devijacija s_D
0.7	10.79	15.78
0.8	14.94	18.83
0.9	19.48	21.68
1.0	24.29	24.29
1.1	29.67	26.64
1.2	34.33	28.73
1.3	39.43	30.58

Tablica 5.5: Matematičko očekivanje i standardna devijacija za različite vrijednosti k

5.3 Utjecaj morske okoline (korozija)

Postojeće S–N krivulje općenito su određene ispitivanjima uzoraka na zraku. Međutim, poznato je da okolina, kao što je morska voda, izaziva koroziju i smanjuje zamornu otpornost, pa je za zavarene spojeve brodske konstrukcije u takvim uvjetima potrebno modificirati S–N krivulje.

Bureau Veritas u svojoj proceduri predlaže da se utjecaj korozije uzme u obzir promjenom konstante C u S–N krivulji, koja se podijeli s 2. Također pretpostavlja se krivulja bez promjene nagiba.

Germanischer Lloyd za istu svrhu množi referentnu vrijednost zamorne čvrstoće $\Delta \sigma_R$ (kategorija detalja) s 0.8, uz upotrebu odgovarajuće S–N krivulje bez promjene nagiba.

Rezultati, prikazani na slici 5.13, očekivano pokazuju značajan porast zamornog oštećenja u morskoj okolini.

D (korozija)					
Lokacija BV GL					
1	0.642	0.263			
2	0.364	0.119			
3	0.238	0.272			

D (bez korozije)					
Lokacija BV GL					
1	0.320	0.188			
2	0.182	0.060			
3	0.120	0.136			



Slika 5.13: Utjecaj korozije na zamorno oštećenje D (tanker)

5.4 Utjecaj izrade (tolerancije)

Sve procedure za ocjenu zamora brodskih konstrukcija pretpostavljaju reprezentativnu standardnu izradu spojeva, međutim za određene detalje brodske konstrukcije, može biti nužno uzeti u obzir i utjecaj maksimalnih konstrukcijskih tolerancija (npr. neporavnatosti, kutna distorzija) pri određivanju žarišnog naprezanja.

Kao primjer utjecaja tolerancija razmotrena je moguća neporavnatost spoja uzdužnjaka boka, HP 320x12, i ukrepe okvirnog rebra 130x11 na lokaciji 2.

Utjecaj neporavnatosti registri BV i GL uračunavaju na isti način – promjenom geometrijskog faktora koncentracije naprezanja K_s :

$$K_{\rm s,tol} = K_{\rm s} \cdot \left(1 + 3e/t\right) \tag{5.7}$$

gdje je:

e – ekscentricitet (slika 5.4.a)

t – debljina tanjeg elementa u spoju



Slika 5.14: Neporavnatost ukrepe okvirnog rebra i uzdužnjaka boka

Rezultati proračuna zamornog oštećenja (D) i životnog vijeka (T) za razne slučajeve neporavnatosti (ekscentriciteta) prikazani su na slikama 5.15 i 5.16.

<i>e</i> [mm]	0	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
D	0.312	0.526	1.355	3.099	6.387	12.105
$T=T_{\rm proj}/D$	64.1	38.1	14.8	6.5	3.1	1.7



Slika 5.15: Ovisnost zamornog oštećenja o ekscentricitetu



Slika 5.16: Ovisnost životnog vijeka spoja o ekscentricitetu

5.5 Utjecaj izbora S–N krivulje

Ovdje je razmotren utjecaj izbora odgovarajuće vrste S–N krivulje, tj. da li se koriste HSE ili IIW standardne krivulje. Proveden je proračun zamornog oštećenja D postupcima Bureau Veritas i Germanischer Lloyd.

Proračunom po GL je uzeta odgovarajuća HSE krivulja prema preporukama BV-a. Kod proračuna zamornog oštećenja BV postupkom, zbog sada primjenjene IIW krivulje, upotrijebljena su žarišna, a ne vršna, naprezanja.

Rezultati proračuna dani su u tablicama 5.6 i 5.7 i prikazani su na slikama 5.17 i 5.18.

	Zamorno oštećenje D				
Lokacija	GL (IIW)	GL (HSE)			
1	0.188	0.095			
2	0.060	0.016			
3	0.136	0.066			

Tablica 5.6: Zamorno oštećenje kod primjene različitih S–N krivulja po GL-u



Slika 5.17: Ovisnost D o izboru S-N krivulje - GL

	Indeks zamornog oštećenja D				
Lokacija	BV (IIW)	BV (HSE)			
1	0.097	0.043			
2	0.062	0.030			
3	0.047	0.022			

Tablica 5.7: Zamorno oštećenje kod primjene različitih S-N krivulja po BV-u



Slika 5.18: Ovisnost D o izboru S–N krivulje – BV

5.6 Utjecaj kombinacije globalnog i lokalnog opterećenja

Zamorno oštećenje D proračunato je za tanker s dvostrukom oplatom po proceduri Germanischer Lloyda za sljedeće raspone nazivnih naprezanja:

– Lokacije 1 i 2 – bok broda (globalna opterećenja manja od lokalnih),

$$\Delta \sigma_{\rm ukupno} = \Delta \sigma_{\rm lokalno} + \psi \Delta \sigma_{\rm globalno} \,, \tag{5.8}$$

- Lokacija 3 - dno broda (lokalna opterećenja manja od globalnih),

$$\Delta \sigma_{\rm ukupno} = \psi \Delta \sigma_{\rm lokalno} + \Delta \sigma_{\rm globalno} \,. \tag{5.9}$$

gdje je:

 ψ faktor međudjelovanja lokalnog i globalnog opterećenja, s obzirom na mogućnost njhovog istovremenog djelovanja.

 Tablica 5.8
 Zamorno oštećenje D kao funkcija faktora međudjelovanja opterećenja

Ψ	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Lokacija1	0.0040	0.0048	0.0057	0.0068	0.0080	0.0094	0.0111	0.0129	0.0149	0.0172	0.0197
Lokacija2	0.0033	0.0037	0.0040	0.0044	0.0047	0.0052	0.0056	0.0061	0.0066	0.0071	0.0077
Lokacija3	0.0563	0.0587	0.0612	0.0641	0.0671	0.0705	0.0741	0.0780	0.0823	0.0869	0.0920



Slika 5.19: Promjena zamornog oštećenja *D* ovisno o međudjelovanju globalnog i lokalnog opterećenja

Proračun je proveden za nazivna naprezanja da bi se eliminirao utjecaj faktora koncentracije naprezanja, K_s i K_w , za razmatrane detalje brodske konstrukcije, koji značajno mijenjaju udio pojedinih naprezanja (globalnih i lokalnih) u ukupnom naprezanju, te variraju ovisno o geometriji zavarenog spoja. Iz dijagrama se vidi značajna promjena zamornog oštećenja ukoliko se primjenjuje određena kombinacija lokalnih i globalnih opterećenja na boku broda na lokaciji 1 (u blizini plovne linije nakrcanog broda). To je područje u kojem su lokalna opterećenja (tlak od valova) vrlo velika, a značajan je i udio globalnih opterećenja (momenti savijanja trupa na valovima). Kod druge dvije lokacije prevladava jedno od opterećenja: na lokaciji 3 (dno broda) udio lokalnih opterećenja u ukupnom opterećenju je gotovo zanemariv, dok je na lokaciji 2 (bok broda u blizini neutralne linije poprečnog presjeka) udio globalnih opterećenja vrlo mali. Na tim lokacijama znatno je manji utjecaj kombinacije globalnog i lokalnog opterećenja zbog izrazite dominantnosti jednog od njih. Zaključak iz ovog primjera je da bi se na različitim lokacijama broda trebale primijeniti različite vrijednosti faktora međudjelovanja ψ , a točne iznose za pojedino područje brodskog trupa treba temeljito istražiti.

5.6.1 Faktori senzitivnosti kod kombiniranja opterećenja

Pogodno je izvesti faktor senzitivnosti za jednostavnu ocjenu utjecaja faktora ψ međudjelovanja globalnog i lokalnog opterećenja:

$$\frac{\Delta D}{\Delta \phi} = \frac{D(\phi + \Delta \phi) - D(\phi)}{\Delta \phi}$$
(5.10)

ψ	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
lok.1	0.0040	0.0048	0.0057	0.0068	0.0080	0.0094	0.0111	0.0129	0.0149	0.0172	0.0197
lok.2	0.0033	0.0037	0.0040	0.0044	0.0047	0.0052	0.0056	0.0061	0.0066	0.0071	0.0077
lok.3	0.0563	0.0587	0.0612	0.0641	0.0671	0.0705	0.0741	0.0780	0.0823	0.0869	0.0920
$\Delta D \log 1$	-	0.0008	0.0009	0.0011	0.0012	0.0014	0.0016	0.0018	0.0020	0.0023	0.0025
$\Delta D \log 2$	_	0.0003	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005	0.0006
ΔD lok3	-	0.0024	0.0026	0.0028	0.0031	0.0033	0.0036	0.0039	0.0043	0.0046	0.0050
$\Delta D / \Delta \psi$		0.0080	0.0003	0.0107	0.0123	0.0141	0.0160	0.0181	0.0203	0.0228	0.0253
lok1		0.0080	0.0095	0.0107	0.0125	0.0141	0.0100	0.0101	0.0203	0.0228	0.0255
$\Delta D / \Delta \psi$		0.0021	0.0022	0.0026	0.0020	0.0041	0.0044	0.0047	0.0051	0.0054	0.0057
lok2	_	0.0031	0.0033	0.0030	0.0039	0.0041	0.0044	0.0047	0.0031	0.0034	0.0037
$\Delta D / \Delta \psi$		0.0227	0.0250	0.0282	0.0207	0.0224	0.0262	0.0204	0.0427	0.0463	0.0502
lok3	_	0.0237	0.0239	0.0282	0.0307	0.0334	0.0303	0.0394	0.0427	0.0405	0.0302

Tablica 5.9: Faktori senzitivnosti $\Delta D/\Delta \psi$ za tri lokacije tankera

5.7 Moguća poboljšanja detalja brodske konstrukcije

Zamorne pukotine najčešće nastaju na mjestima povišene koncentracije naprezanja kao što su rubovi zavara, neporavnatosti konstrukcijskih detalja, zarezi, izrezi i druge geometrijske nepravilnosti koje proizlaze iz projektiranja brodske konstrukcije. Na pojavu zamornog oštećenja bitno utječu i kvaliteta izrade detalja, upotrijebljeni materijali, okolišni uvjeti, ali i pravilno održavanje, pri čemu je posebno značajan redoviti pregled konstrukcije. Općenito, prisutnost zavara u detaljima brodske konstrukcije predstavlja moguće slabo mjesto obzirom na pojavu zamornog oštećenja i, na koncu, krhkog loma. Kratki zamorni vijek zavarenih detalja može se smatrati i kao ograničavajući faktor u projektiranju efikasnijih konstrukcija. Povećanje zamornog vijeka zavarenih detalja brodske konstrukcije može se postići u fazi projektiranja konstrukcije i u fazi izrade [24].

Najefikasnije poboljšanje zamorne čvrstoće detalja brodske konstrukcije postiže se u fazi projektiranja, a moguće ga je provesti na nekoliko načina:

- smanjivanjem nazivnog naprezanja,
- projektiranjem geometrije detalja za smanjenje koncentracije naprezanja,
- pažljivim određivanjem geometrije zavara i konstrukcijskih tolerancija,
- definiranjem postupka zavarivanja za smanjenje zaostalih naprezanja.

Smanjenje nazivnih naprezanja, a time i žarišnih naprezanja, moguće je postići povećavanjem lokalnih izmjera detalja brodske konstrukcije. Očigledni nedostatak ovakvog načina poboljšanja zamornih karakteristika konstrukcijskih detalja je povećanje mase konstrukcije.

Usvajanjem dobro projektiranih konstrukcijskih detalja, uglavnom se to odnosi na spojeve blagih prijelaza geometrije, smanjuju se geometrijske koncentracije naprezanja. Tipična poboljšanja pojedinih konstrukcijskih detalja prikazana su na slikama 5.20 i 5.21. Ovi poboljšani detalji, obzirom na zamorno oštećenje, nastali su uspoređivanjem i usaglašavanjem iskustvenih podataka, numeričkih proračuna (metodom konačnih elemenata) i testiranja velikih modela dijelova brodske konstrukcije. Prednosti ovakvog načina poboljšanja zamorne čvrstoće detalja brodske konstrukcije su u značajnom smanjenju žarišnog naprezanja uslijed reduciranja lokalnih geometrijskih koncentracija naprezanja, što ga čini najdjelotvornijim načinom poboljšanja zamornih karakteristika konstrukcije. Nedostatak je moguće povećanje mase konstrukcije zbog potrebnih dodatnih konstrukcijskih elemenata, kao i potreba vrlo kvalitetne izrade, posebno na mjestima blagih zakrivljenja.

U projektnoj fazi pažnju treba posvetiti postizanju glatkih prijelaza između geometrije konstrukcijskog elementa i ruba zavara, jer postoji mogućnost povećanih naprezanja na neporavnatim mjestima, stoga su definiranje pravilnog postupka zavarivanja, kao i određivanje konstrukcijskih tolerancija, bitan dio projektiranja konstrukcijskih detalja. Utjecaj konstrukcijskih tolerancija vidljiv je u poglavlju 5.4. Nedostatak ovakvog načina poboljšanja zamorne čvrstoće je u mogućim velikim odstupanjima izrađenih u odnosu na projektirane detalje ukoliko nije osigurana kvalitetna kontrola.



Slika 5.20: Poboljšanja detalja prema preporukama LR-a za nepropusnu rebrenicu ispod nepropusne pregrade [53]



Slika 5.21: Poboljšanja detalja za ukrepe dvoboka prema LR-u [53]

Optimizacijom geometrije detalja, također se mogu dobiti konstrukcijska rješenja boljih zamornih karakteristika. Na slici 5.22 prikazan je optimizirani izrez za uzdužnjak dvoboka tankera (T profil) na prolazu kroz okvirno rebro. Na ovaj način povećan je zamorni vijek trajanja detalja za 4 puta [57].



Slika 5.22: Optimizirani prolaz uzdužnjaka dvoboka (T profil) kroz okvirno rebro tankera [57]

6 ZAKLJUČAK

Postupak procjene zamorne čvrstoće detalja brodske konstrukcije sastoji se od nekoliko faza: određivanja zamornog opterećenja brodske konstrukcije, definiranja dugoročne razdiobe naprezanja, određivanja dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva i procjene zamornog oštećenja. U radu se pokazalo da je procjenu zamorne čvrstoće moguće provesti relativno kratkim i jednostavnim postupkom, dakle bez dugotrajne spektralne analize. Posebno je jednostavno provesti takav proračun za tipične detalje brodske konstrukcije za koje je lako odrediti nazivno naprezanje, npr. proračun uzdužnjaka kao grede s osloncima, a za koje su definirani i faktori koncentracije naprezanje. Za detalje konstrukcije za koje nije jednostavno odrediti nazivno naprezanje, primjenjuju se također pristupi preko žarišnog ili vršnog naprezanja, a proračun se vrši metodom konačnih elemenata. Modeliranje mreže elemenata, posebno fine mreže, primjenjive na detalje brodske konstrukcije izaziva nesuglasice registara, te su trenutno prisutne velike razlike u rezultatima proračuna zamorne čvrstoće.

U radu se pokazalo da razlike u proračunatoj vrijednosti zamornog oštećenja, odnosno u vijeku trajanja zavarenih spojeva brodske konstrukcije, najvećim dijelom proizlaze iz toga da li se proračun izvodi pristupom preko žarišnog naprezanja (GL) ili vršnog naprezanja (BV). U tablici 3.1 vidljivo je da pojedini klasifikacijski zavodi upotrebljavaju u procjeni zamornog oštećenja isključivo jedan od navedenih pristupa, zbog čega su moguće velike razlike u procijenjenom vijeku trajanja konstrukcijskih detalja primjenom postupaka različitih klasifikacijskih zavoda.

Drugi važan uzrok razlikama u iznosima zamornog oštećenja je definiranje zamornog opterećenja brodske konstrukcije, kao i kombiniranje statičkih i dinamičkih, te globalnih i lokalnih opterećenja. U definicijama zamornog opterećenja brodske konstrukcije postoje značajne razlike između pojedinih klasifikacijskih zavoda, pa tako IACS iznosi da je određivanje zamornih opterećenja najvažniji dio postupka za procjenu zamora, koji je ujedno i najteže unificirati.

Provedenom parametarskom analizom pokazalo da je zamorno oštećenje posebno osjetljivo na promjenu parametra oblika Weibullove razdiobe naprezanja. Veliki utjecaj na zamorno oštećenje još imaju morska okolina (korozija) i tolerancije, što potvrđuje da je najbolji načina sprečavanja nastanka zamornih pukotina kvalitetna izrada i zaštita zavarenih dijelova. U radu nije posebno analiziran utjecaj srednjeg naprezanja, ali je iz preporuka klasifikacijskih zavoda vidljivo da uključivanje ovog efekta u proceduru za procjenu zamora značajno utječe na vijek trajanja detalja brodske konstrukcije.

U daljnjem je radu za razvoj efikasnog i lako primjenjivog postupka za ocjenu vijeka trajanja dijelova brodske konstrukcije izložene zamornim oštećenjima, nužno definirati i unificirati zamorno opterećenje brodske konstrukcije, te dodatnim istraživanjem usuglasiti pristup preko određenog tipa naprezanja (nazivno, žarišno, vršno).

Istraživanja na području procjene zamora brodske konstrukcije moguće je (i potrebno) usmjeriti i na određivanje faktora koncentracije naprezanja tipičnih spojeva i detalja osjetljivih na zamor, jer je u postojećim bazama podataka sadržan vrlo mali broj obrađenih detalja, a među podacima pojedinih klasifikacijskih zavoda postoje i velike razlike u vrijednostima faktora koncentracije naprezanja za iste spojeve.

Zaostala naprezanja zavarenih spojeva brodske konstrukcije vrlo malo su istražena, posebno obzirom na njihovu veličinu, distribuciju i varijacije pod promjenjivim opterećenjem valova, pa su za definiranje utjecaja zaostalih naprezanja potrebna opsežna istraživanja.

Vijek trajanja nekih tipičnih detalja brodske konstrukcije (spojevi uzdužnjaka boka tankera s okvirinim rebrima) može se optimizacijom geometrije povećati i 3–4 puta, pa posebno kao mogućnost daljnjeg rada treba naglasiti optimiziranje geometrije detalja. Optimizacijom je u nekim slučajevima moguće, istovremeno s poboljšanjem zamorne čvrstoće, dobiti lakšu i tehnološki jednostavnije izvedivu konstrukciju [57].

Problemu ocjene zamora brodskih konstrukcija tek se odnedavno pridaje veće značenje, pa je prisutan i nedostatak kvalitetne programske podrške za proračun zamora brodskih konstrukcija. Postojeći programski paketi imaju ograničene mogućnosti; npr. ShipRight FDA paket Lloyd's Register of Shippinga primjenjiv je samo za neke detalje konstrukcije tankera s dvostrukom oplatom i brodova za rasuti teret, stoga razvoj jednostavnog i praktičnog postupka procjene zamora treba biti praćen i izradom odgovarajućih računalnih programa jednostavnih za upotrebu te primjenjivih na raznovrsne brodske konstrukcije.

6.1.1.1.1.1 Literatura

- [1] Technical Comimittee III.2, "Fatigue and Fracture", Proceedings of the 13th International Ship and Offshore Structures Congress, Vol.2, str. 285–331, Trondheim, 08/1997.
- [2] N. Vulić, "Numeričko modeliranje postupka zaustavljanja širenja pukotine", Disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1995.
- [3] M.R. Andersen, "Fatigue Crack Initiation and Growth in Ship Structures", Ph.D, Thesis, Department of Naval Architecture, Tehnical University of Danmark, 1998.
- [4] American Bureau of Shipping, "Report on the Development of a Unified Procedure for Fatigue Design of Ship Structures", 12/1996.
- [5] Korean Register of Shipping, "Guidance for the Fatigue Strength Assessment of Ship Structures", 12/1995.
- [6] P. F. Hansen, "Fatigue Damage in the Side Shells of Ships", Marine Structures, str. 631– 655, 8/1995.
- [7] Fuchs H.O., Stephens R.I., "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley&Sons, 1980.
- [8] Tehnička enciklopedija, svezak 12, str. 712–713, 1990.
- [9] Richards K.G., "Fatigue Strength of Welded Structures", The Welding Institute, Cambridge, 5/1969.
- [10] Ž. Božić, "Fatigue and Fracture of Multiple Site Cracks in Stiffened Panels", Yokohama National University, Yokohama, Japan, 1997.
- [11] Y. Sumi, Ž. Božić, H. Iyama, Y. Kawamura, "Fracture of a Stiffened Panel with Multiple Site Cracks under Lateral Pressure", The 7th International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units, str.873–878, Hague, Netherlands, 1998.
- [12] Ž. Božić, "Propagation of Multiple Fatigue Cracks in Stiffened Panels", Integrity, Reliability and Failure Conference, Porto, Portugal, 1999.
- [13] I. Senjanović, S. Tomašević, J. Parunov, "Procjena zamorne čvrstoće uzdužnjaka palube FPSO broda", Radovi FSB XXII, str.35–44, 1999.
- [14] J. Parunov, I. Senjanović, "Metode za dugoročnu prognozu ekstremnih stanja mora", Brodogradnja 48, str. 131–138, 2/2000.
- [15] J. Parunov, I. Senjanović, S. Tomašević, "On the modelling uncertainty of the linear wave bending moment", NAV2000 International Conference on Ship and Shipping Research, Venice, 9/2000.
- [16] Y. Garbatov, S. Rudan, C. Guedes Soares, "Fatigue strength assessment of ship nuckle details", IMAM, 2000.
- [17] S. Rudan, Y. Garbatov and C. Guedes Soares "Finite Element Study of Stress Concentration Factors in Ship Knuckle Details", Cavtat, 2000.
- [18] Ž. Domazet, "Metode zaustavljanja širenja pukotine", Disertacija, FSB Zagreb, 1993.
- [19] K. Žiha, V. Ivančević, "Primjena procedure za analizu zamora u brodskim konstrukcijama", Brodogradnja 44, str. 48–54, 3/1999.

- [20] V. Ivančević, "Projektni postupak za ocjenu umora materijala u konstrukciji broda", Diplomski rad, FSB Zagreb, 1998.
- [21] E. Zahavi, V. Torbilo, "Fatigue Design –Life Expectancy of Machine Parts", Solomon Press, 1989.
- [22] M. Franz, "Mehanička svojstva materijala", FSB Zagreb, 1998.
- [23] R.W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", John Wiley&Sons, NY 1996.
- [24] Lloyd's Register of Shipping, "Fatigue Design Assessment Procedure", ShipRight FDA, London, 1996.
- [25] Fricke W., Petershagen H., Paetzold H., "Fatigue Strength of Ship Structures", Germanicher Lloyd–Technology, Hamburg, 1997.
- [26] IACS, "Guidelines for Assessment of the Fatigue Design of Ship Structures", 1996.
- [27] M.R. Andersen, "Fatigue Damage Analysis by Use of Cyclic Strain Approach", Ship Technology Research, vol.43, str. 155–163, 1996.
- [28] L.S. Etube, F.P. Brennan, W.D. Dover, "Prediction of Fatigue Crack Growth in Offshore Structures Using Sea State Equivalent Stress Concept", Proceedings of the Eight International Offshore and Polar Engineering Conference, str. 95–101, Montreal, Canada, 5/1998.
- [29] Y. Yamanouchi, "Ship"s Behaviour on Ocean Waves as a Stohastic Process", Marine Vehicles, paper 18, str. 167–181, 1974.
- [30] Newman J.N., "Second-order, Slowly-varying Forces on Vessels in Irregular Waves", Marine Vehicles, paper 19., str. 182–186, 1974.
- [31] A.R.J.M. Lloyd, "Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather", John Wiley &Sons, NY, 1989.
- [32] M.B. Sorensen, M.R. Andersen, P.F. Hansen, "Probabilistic Fatigue Damage Analysis of a Shape–Optimized Slot Design", Marine Technology, Vol.35, No.4, str. 219–227, 10/1998.
- [33] A.K. Thayamballi, P.F. Hansen, "Fatigue Damage Considering Whipping Arising from Slamming", OMAE Safety and Reliability, Vol.II, str. 95–101, 1995.
- [34] J.M. Niedzwecki, J.W. Van de Lindt, "Extreme Response and Fatigue Estimates in Directional Seas", Proceedings of the 8th IOPEC, str. 449–460, Montreal, 5/1998.
- [35] Det Norske Veritas, "Fatigue Assessment of Ship Structures: Influence of Extreme Stress Level on Estimated Fatigue Damage Accumulation", Report, 12/1995.
- [36] Technical Committee II.1, "Quasi–Static Response", Proceedings of the 13th International Ship and Offshore Structures Congress, vol.1, str. 123–187, Trondheim, 8/1997.
- [37] O.W. Hughes, "Ship Structural Design: A Rationally–Based, Computer–Aided, Optimization Approach", John Wiley&Sons, NY, 1983.
- [38] P.F. Hansen, "Reliability Analysis of a Midship Section", Ph.D Thesis, DTU, Lyngby Denmark, 1994.
- [39] O.W. Hughes, P. Franklin, "Definition and Validation of a Practical Rationally–Based Method for the Fatigue Analysis and Design of Ship Hulls", SNAME T&R No.41, 1993.
- [40] Bureau Veritas, "Fatigue Strength of Welded Ship Structures", 1997.

- [41] IACS, "Fatigue Assessment of Ship Structures", Report No.56, 1999.
- [42] A.A. Cardoso, O.B. Augusto, C.A.N. Dias, "A New Approach to Calculate Stress Concentration Factors: Artificial Neural Networks", Proceedings of the Eight International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.IV, str. 22–32, Montreal, 5/1998.
- [43] Germanischer Lloyd, "Rules for Classification and Construction", I Ship Technology, Part 1 – Seagoing Ships, Chapter 1 – Hull Structures, Section 20 – Fatigue Strehgth, 1992.
- [44] Hrvatski registar brodova, "Pravila za tehnički nadzor pomorskih brodova", Dio 2. Trup, 16 – Pogonska čvrstoća, 1999.
- [45] P. Myers, F.P. Brennan, W.D. Dover, "Constant and Variable Amplitude Corrosion Fatigue Performance", Proceedings of the Eight International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.IV, str. 123–130, Montreal, 5/ 1998.
- [46] M. Takanashi, A. Fuji, M. Kitagawa, M. Ojima, "Fatigue Strength of Coated Steel Plate in Seawater", Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, str. 95–101, Brest, 6/1999.
- [47] T. Lassen, "Damage Tolerance Assessment of Welded Joints Subjectet to Fatigue Crack Growth", Proceedings of the Eight International Offshore and Polar Engineering Conference, vol.IV, str. 27–32, Montreal, 5/1998.
- [48] H.P. Lieurade, "Fatigue in Welded Constructions", Bulletin Tehnique du Bureau Veritas, Institut de Recherches de la Siderurgie Francaise (IRSID), Saint – Germain – en –Laye, 10/1985.
- [49] A.E. Mansour, L. Hovem, "Probability–Based Ship Structural Safety Analysis", Journal of Ship Research, Vol.38, No.4, str. 329–339, 12/1994.
- [50] R. Song, T. Moan, "Fatigue Reliability of Large Catamaran Considering Inspection Updating", Proceedings of the Eight International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.IV, str. 412–419, Montreal, 5/1998.
- [51] H.O. Madsen, S. Krenk, N.C. Lind, "Methods of Structural Safety", Prentice–Hall, 1992.
- [52] Rao S.S.," Reliability–Based Design", McGraw–Hill, Inc., 1992.
- [53] Lloyd's Register of Shipping, "Fatigue Design Assessment Procedure", ShipRight SDDG, London, 1/1996.
- [54] Violette F.L.M., "A Total Approach to the Fatigue Performance of Ship Structural Details", Lloyd's Register of Shipping, London, 11/1998.
- [55] ShipRight FDA, Program Manual v.2.4 B, London, 1999.
- [56] A.E. Mansour, P.H. Wirsching, "Sensitivity factors and their Application to Marine Structures", Marine Structures, vol.8, str. 229–255, 1995.
- [57] M.B. Sorensen, "Fatigue Analysis of Typical Connections between Stiffeners and Web Frames", Master Thesis, DTU, Lyngby Denmark, 1995.
- [58] J.Uršić, "Čvrstoća broda Dio I", FSB Zagreb, 1991
- [59] Det Norske Veritas, "Rules for Classification of Ships", Part 3, 1997.
- [60] Det Norske Veritas, "Ship's Load and Strength Manual", 1995.
- [61] J. Uršić, "Čvrstoća broda Dio III", FSB Zagreb, 1992.

PRILOG A:

PRORAČUN SAVIJANJA UZDUŽNJAKA TANKERA OD OPTEREĆENJA VANJSKIM ILI UNUTRAŠNJIM TLAKOM

Uzdužnjak se smatra kao upeta greda između poprečnih okvira, pa se naprezanje računa po formuli [58],:

$$\sigma_{a,i} = \frac{p \cdot s_i \cdot l_i^2}{12 \cdot W_i} \text{ N/mm}^2$$
(A.1)

gdje je:

s_i – razmak uzdužnjaka

*l*_i – raspon uzdužnjaka = razmak poprečnih okvira

W_i – moment otpora uzdužnjaka uključujući i sunosivu širinu

p – opterećenje (tlak) u kN/m²

Uzdužnjak HP 300x11 na lokaciji 1 u dvoboku tankera:

$$s_1 = 0.8 \text{ m},$$

 $l_1 = 3.4 \text{ m},$
 $W_i = 678 \text{ cm}^3,$
 $p = 1 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma_{a,1} = 1.137 \text{ N/mm}^2$

Uzdužnjak HP 320x12 na lokaciji 2 u dvoboku tankera:

 $s_2 = 0.8 \text{ m},$ $l_2 = 3.4 \text{ m},$ $W_2 = 826.4 \text{ cm}^3,$ $p = 1 \text{ kN/m}^2$ $\sigma_{a,2} = 0.933 \text{ N/mm}^2$

Uzdužnjak dna HP 340x14 na lokaciji 3 u dvodnu tankera:

 $s_3 = 0.8 \text{ m}, \qquad l_3 = 3.4 \text{ m}, \qquad W_3 = 1023.5 \text{ cm}^3, \qquad \sigma_{a,3} = 0.753 \text{ N/mm}^2.$

PRILOG B:

PRORAČUN NAPREZANJA USLIJED RELATIVNOG OTKLONA IZMEĐU OKVIRNOG REBRA I POPREČNE PREGRADE

Naprezanje uslijed relativnog otklona računa se po formuli [59]:

$$\sigma_{b,i} = \frac{6 E I_i \delta_i}{W_i l_i^2} N/mm^2$$
(B.1)

gdje je:

(Napomena: indeks i u $\sigma_{b,i}, \delta_i \dots$ odnosi se na lokaciju uzdužnjaka)

E I – savojna krutost uzdužnjaka,

 $E = 2.1 \ 10^5 \ \text{N/mm}^2$ – modul elastičnosti za čelik,

Ii – moment tromosti uzdužnjaka (uključivo i sunosiva širina),

Wi – moment otpora uzdužnjaka (uključivo i sunosiva širina),

*l*_i – raspon uzdužnjaka (= razmak okvirnih rebara),

 $f_1 = 1.0 -$ faktor materijala za obični brodograđevnih čelik,

 δ – relativni otklon između poprečne pregrade i okvirnog rebra. Točna vrijednost δ može se odrediti trodimenzionalnom analizom skladišta ili nekom od približnih formula [60]:

$$\delta_i = \frac{p_{d,t}}{20} f_1 l_u \ 10^{-4} \text{ mm}, \qquad (B.2)$$

 $p_{d,t}$ – maksimalni dinamički tlak na vodnoj liniji $z_i = d_i$

$$p_{\rm d,t} = 10 \left[y \frac{\Phi}{2} + \frac{B}{32} \left(1 + \frac{z_{\rm i}}{d_{\rm i}} \right) \right],$$
 (B.3)

B = 32.2 m - širina broda,

y – udaljenost promatranog elementa od CL (Tablica B2),

$$\Phi = \frac{50 \cdot c}{B + 75}, - \text{maksimalni kut ljuljanja (Tablica B2)},$$

$$c = (1.25 - 0.025 \cdot T_{\text{R}}) \cdot k - \text{konstanta (Tablica B2)},$$

$$T_{\text{R}} = \frac{2 \cdot k_{\text{r}}}{\sqrt{GM}}, - \text{period ljuljanja (Tablica B2)},$$

k = 1 - konstanta za tankere,

 $k_{\rm r} = 0.39B$, a za tankere u balastu 0.35B (Tablica B2),

GM – metacentarska visina (Tablica B2),

Geometrijske karakteristike uzdužnjaka, kao i rezultati proračuna naprezanja za promatrane lokacije prikazani su u sljedećim tablicama:

Uzdužnialz	Ii	Wi	raspon <i>l</i> _i	razmak s _i	Visina od BL
Ozduziijak	[cm ⁴]	$[cm^3]$	[m]	[m]	<i>z</i> _i [m]
HP 300x11	4194	678	3.4	0.8	10.25
HP 320x12	5530	826.4	3.4	0.8	6.3
HP 340x14	7540	1023.5	3.4	0.8	0.0

Tablica B1:	Karakteristike uzdužnjaka
raonea Dr.	italallolistillo azaaziljalla

Lokacija (i)	Opterećenje	<i>GM</i> [m]	k _r	<i>T</i> _R [s]	С	Ф [rad]	у [m]	$p_{\mathrm{d,T}}$	δ _i [mm]	$\sigma_{b,i}$ [N/mm ²]	$\sigma_{b,i}/p_{d,T}$
1– HP 300x11 lokacija 1	Nakrcan 12	3.22	12.6	13.9	0.9	0.419	16.1	53.85	0.92	6.2	115.3
1 – HP 300x11 lokacija 1	Balast 12'	7.53	11.27	8.21	1.045	0.487	16.1	59.35	1.01	6.8	114.62
2 – HP 320x12 lokacija 2	Nakrcan 12	3.22	12.6	13.9	0.9	0.419	16.1	53.85	0.92	6.71	124.61
2 – HP 320x12 lokacija 2	Balast 12'	7.53	11.27	8.21	1.045	0.487	16.1	59.35	1.01	7.37	124.18
3 – HP 340x14 lokacija 3	Nakrcan 12	3.22	12.6	13.9	0.9	0.419	8.8	38.56	0.655	5.264	136.65
3 – HP 340x14 lokacija 3	Balast 12'	7.53	11.27	8.21	1.045	0.487	8.8	41.55	0.706	5.672	136.5

Tablica B2: Rezultati proračuna naprezanja uslijed otklona poprečne konstrukcije

PRILOG C:

PRORAČUN DVOBOKA I DVODNA BRODA KAO ORTOTROPNE PLOČE

Proračun dvoboka kao ortotropne ploče

Dvobok se u uzdužnom smjeru (a) oslanja na poprečne pregrade, a u poprečnom smjeru (b) na jaka koljena na bokovima broda pa se može promatrati kao potpuno upeta ploča [61].

Podaci o ploči:

a = 27.2 m - dulja stranica ploče b = 12.8 m - kraća stranica ploče $s_a = 10.4 \text{ m} - \text{razmak uzdužnih ukrepa}$ $s_b = 3.4 \text{ m} - \text{razmak poprečnih ukrepa (okvirna rebra)}$

Podaci o ukrepama:

Poprečni presjeci ukrepa (sve mjere na crtežu su u cm):

Poprečne (kraće) ukrepe (okvirna rebra)





Uzdužne (dulje) ukrepe

Slika C1: Ukrepe dvoboka

Geometrijske karakteristike ukrepa:

 I_{pa} (I_{pb}) – moment tromosti nosive širine duljih (kraćih) ukrepa za poprečnu os kroz težište,

 I_{na} (I_{nb}) – moment tromosti duljih (kraćih) ukrepa uključujući i nosivu širinu pojasa, i_a (i_b) – jedinična krutost duljih (kraćih) ukrepa,

$$i_{\rm a} = \frac{I_{\rm na}}{s_{\rm a}},\tag{C.1}$$

$$i_{\rm b} = \frac{I_{\rm nb}}{s_{\rm b}}, \qquad (C.2)$$

$I_{\rm pa} = 0.29561 \ {\rm m}^4$	$I_{\rm pb} = 0.096642 \ {\rm m}^4$
$I_{\rm na} = 0.3033 \ {\rm m}^4$	$I_{\rm nb} = 0.1037 \ {\rm m}^4$
$i_{\rm a} = 0.0292 \text{ m}^3$	$i_{\rm b} = 0.0305 \ {\rm m}^3$

Tablica C1: Geometrijske karakteristike ukrepa dvoboka

Proračun naprezanja:

Naprezanje savijanja opločenja na potpuno upetim mjestima na kraćim stranicama računa se po formuli:

$$\sigma_{c,i} = K \cdot \frac{p \ b^2 \ e_a}{\sqrt{i_a \cdot i_b}} \ \text{N/mm}^2$$
(C.3)

gdje je:

 $p = 1 \text{ kN/m}^2 - \text{jedinični tlak (opterećenje)},$

 $e_a = 95.2 \text{ cm} - \text{udaljenost}$ promatrane točke od neutralne linije panela

K = 0.06 -koeficijent iz Schade–ovih dijagrama

Ulazni podaci za očitavanje koeficijenta K iz dijagrama su:

• virtualni omjer stranica ploče

$$\rho = \frac{a}{b} \sqrt[4]{\frac{i_{\rm b}}{i_{\rm a}}} \tag{C.4}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{I_{\rm pa}}{I_{\rm na}} \frac{I_{\rm pb}}{I_{\rm nb}}} \tag{C.5}$$

Iz gornjih izraza dobiveno je: $\rho = 2.15$ i $\eta = 0.953$, a očitana vrijednost K = 0.06.

Uvrštenjem K u izraz (C.3) dobije se:

$$\sigma_{c,1} = K \cdot \frac{p \ b^2 \ e_a}{\sqrt{i_a \cdot i_b}} = 0.06 \frac{1 \cdot 12.8^2 \cdot 950.8}{\sqrt{0.0292 \cdot 0.0305}} = 0.313 \text{ N/mm}^2$$

Da bi se dobilo stvarno naprezanje od savijanja dvoboka kod određenog opterećenja (stanja krcanja) potrebno je $\sigma_{c,i}$ pomnožiti s odgovarajućim tlakom koji djeluje na dvobok (unutrašnji tlak *h* ili vanjski *p*).

Proračun dvodna kao ortotropne ploče

Dvodno se u uzdužnom smjeru (a) oslanja na poprečne pregrade, a u poprečnom smjeru (b) na jaka koljena na bokovima broda (uzvoj) pa se može promatrati kao potpuno upeta ploča.

Podaci o ploči:

a = 27.2 m - dulja stranica ploče (duljina tanka 3 pregrada)b = 24 m - kraća stranica ploče (širina dvodna) $s_a = 5.6 \text{ m} - \text{razmak uzdužnih ukrepa (razmak nosača u dvodnu)}$

 $s_b = 3.4 \text{ m} - \text{razmak poprečnih ukrepa (okvirna rebra)}$

Podaci o ukrepama:

Poprečni presjeci ukrepa (sve mjere na crtežu su u cm):

Poprečne (kraće) ukrepe

Uzdužne (dulje) ukrepe



Slika C2: Ukrepe u dvodnu

$I_{\rm pa} = 0.2062 \ {\rm m}^4$	$I_{\rm pb} = 0.1252 \ {\rm m}^4$
$I_{\rm na} = 0.21702 \ {\rm m}^4$	$I_{\rm nb} = 0.13766 \text{ m}^4$
$i_{\rm a} = 0.03875 \text{ m}^3$	$i_{\rm b} = 0.040489 \ {\rm m}^3$

Tablica C2: Geometrijske karakteristike ukrepa u dvodnu

Proračun naprezanja:

Ulazni podaci za očitavanje koeficijenta K iz dijagrama su:

$$\rho = \frac{a}{b} \sqrt[4]{\frac{i_{\rm b}}{i_{\rm a}}} = 1.146,$$
$$\eta = \sqrt{\frac{I_{\rm pa}}{I_{\rm na}}} \frac{I_{\rm pb}}{I_{\rm nb}} = 0.93$$

K = 0.062 – koeficijent iz Schade–ovih dijagrama $e_a = 106.07$ cm – udaljenost promatrane točke od neutralne linije panela

Uvrštenjem gornjih podataka u formulu (broj formule) dobije se:

$$\sigma_{c,3} = K \cdot \frac{p \ b^2 \ e_a}{\sqrt{i_a \cdot i_b}} = 0.062 \frac{1 \cdot 24^2 \cdot 1.0607}{\sqrt{0.03875 \cdot 0.040489}} = 0.956 \text{ N/mm}^2$$

PRILOG D:

PODACI O BRODU ZA RASUTE TERETE

Glavne karakteristike broda:

Tip – Brod za rasuti teret 'Don Frane Bulić' Klasa – Lloyd's Register of Shipping, № 100 A1 Bulk Carrier

Dimenzije broda:

Duljina preko svega:	$L_{\rm OA} = 187.6 \text{ m}$
Duljina između okomica:	$L_{\rm pp} = 179.37 \ {\rm m}$
Širina broda:	<i>B</i> = 30.80 m
Visina broda:	<i>H</i> = 15.45 m
Konstruktivni gaz:	T = 10.10 m
Koeficijent istisnine:	$C_{\rm b} = 0.823$
Istisnina:	$\Delta = 47070 \text{ tdw}$
Brzina:	v = 14.5 čv

Geometrijske karakteristike glavnog rebra:

Moment tromosti poprečnog presjeka:	$I_{yy} = 126.9 \text{ m}^4$
Moment tromosti poprečnog presjeka:	$I_{zz} = 383.4 \text{ m}^4$
Neutralna os iznad osnovice:	$z_{\rm NA} = 7.177 \ {\rm m}$

Promatrana stanja krcanja:

Teški balast i 100% zaliha:	
Maksimalni moment savijanja na mirnoj vodi:	$M_{\rm c} = 94957 \; {\rm kNm}$
Metacentarska visina:	<i>GM</i> = 5.19 m

Nakrcan brod i 10% zaliha:

Maksimalni moment savijanja na mirnoj vodi:	$M_{c} = 61789 \text{ kNm}$
Metacentarska visina:	GM = 3.08 m

Na sljedećim slikama prikazani su uzdužni presjek broda, te poprečni presjek s rezultatima proračuna ShipRight FDA.



Slika D1: Brod za rasute terete