

Primjena procedure za analizu zamora u brodskim konstrukcijama

U radu se opisuje primjena projektne procedure za analizu zamora u konstrukcijama na dva broda građena u hrvatskim brodogradilištima. Daje se pregled problema zamora, značaja i kakvoće konstrukcijskih detalja, strukturnih diskontinuiteta, koncentracije naprezanja, zaostalih naprezanja, mehanike loma kod zamora materijala, utjecaja nisko i visoko cikličkih opterećenja, vremena izloženosti pojedinim stanjima mora, primjenjenih projektnih opterećenja i mogućih načina oštećenja. Primjenjen je program FDA (Fatigue Design Assessment) iz programskog sklopa ShipRight, Lloyd's Registra. Provedene su parametarske studije o utjecaju oblika i izmjera kritičnih strukturnih detalja na zamornu izdržljivost razmatranih brodova.

Ključne riječi: brodska konstrukcija, zamor materijala, projektiranje brodske konstrukcije, brod za rasute terete, brod za prijevoz kemikalija

The paper presents the application of a fatigue design procedure on two ships built in croatian shipyards. A review of fatigue problems, including quality of structural details, structural discontinuities, stress concentration, residual stresses, fracture mechanics, low and high cycle fatigue, length of time exposed to each sea state, applied design loads and potential failure modes is attached. The FDA (Fatigue Design Assessment) procedure as a part of ShipRight design, construction and lifetime ship care procedure from Lloyd's Register is applied. Parametric studies of the effects of the construction and scantlings of the structural details are performed.

Key words: ship construction, fatigue, ship structural design, bulk carrier, chemical tanker

Adrese autora

(Author's addresses):

Fakultet strojarstva i
brodogradnje
Ivana Lučića 5
10000 Zagreb
Tel: +385 1/ 6168 132
Fax: +385 1/ 6156 940
E-mail: kziha@fsb.hr

1. Uvod

Problemi sa već odavno uočenim zamorom materijala kao posljedica starenja i akumulativnih pojava oštećenja u brodskim konstrukcijama, u najmanju ruku mogu izazvati dodatne, ne male troškove održavanja, ako ne i značajnija oštećenja, a u krajnjem slučaju čak i moguće slomove s vrlo teškim posljedicama. Općenito, ako je brodska konstrukcija po svojim dijelovima i u cjelini pravilno i propisno prilagođena svim uvjetima i opterećenjima u službi, potrebno je moguće poteškoće uslijed zamora kritičnih detalja svesti u prihvatljive granice. Iskustvo sa brodskim konstrukcijama govori da, ukoliko konstrukcija udovoljava općim zahtjevima primarne i sekundarne čvrstoće, tada će djelotvornost u službi broda ovisiti o izdržljivosti konstrukcijskih detalja. Kakvoća detalja se preko kontinuiteta dijelova, uravnavanja sastavnih dijelova i jednolike raspodjele krutosti odražava na koncentracije naprezanja a time i na moguće probleme zamora. Značaj zamora je dodatno porastao kao posljedica primjene sve složenijih i točnijih proračuna i optimizacije u teoriji brodskih konstrukcija kao i čelika povišene čvrstoće, što je za posljedicu imalo sve lakše i prilagođenije konstrukcije, kod kojih se osim sigurnosti na globalnoj i lokalnoj razini, moralo povesti računa o sigurnosti kritičnih strukturnih detalja izloženih zamoru.

Zahvaljujući dugogodišnjim istraživanjima problema zamora materijala kod brodova u službi, razvoju analitičkih metoda, velikom broju podataka prikupljenih u brojnim laboratorijskim pokusima, vidjeti na pr. [1, 2, 3], te brzom razvoju elektroničkih računala, razvijene su procedure za analizu zamora kod brodova, koje se mogu primijeniti u projektiranju brodske konstrukcije, kao i za održavanje već izgrađenih brodova na pr [4].

Tri su razine složenosti procjene zamora brodskih konstrukcija.

Prva razina predstavlja najjednostavniji način procjene zamora konstrukcijskih detalja koji se sastoji se od uputa za odabir dobrih konstrukcijskih rješenja detalja i dopuštene razine naprezanja već u fazi projekta, na osnovi iskustva i inženjerske prakse o kojoj vode računa klasifikacijska društva, na pr [5].

Treća razina predstavlja najpotpuniji, cjeloviti složen postupak direktnog spektralnog proračuna koji se zasniva na osnovnim metodama teoretskih proračuna, kao što su gibanja i opterećenja broda u službi i konačni elementi.

Druga razina predstavlja praktično primjenjiv pojednostavljeni postupak direktnog spektralnog proračuna (treće razine) procjene zamora koji je izvediv na računalima u prihvatljivom vremenu. Opisana projektna procedura je uključena u program FDA (Fatigue Design Assessment) iz programskog sklopa ShipRight Lloyd's Registra, [6] koja se koristi zajedno s procedurama SDA (Structural Design Assessment) i CM (Construction Monitoring). Na Zavodu za brodogradnju i pomorsku tehniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu se već neko vrijeme odvijaju istraživanja na području zamora u brodogradnji, [7, 8, 9].

2. Problemi zamora kod brodskih konstrukcija

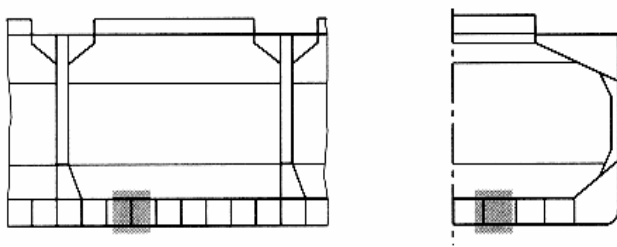
Pukotine izazvane zamorom najčešće započinju na mjestima gdje postoje koncentracije naprezanja, kao što su strukturni diskontinuiteti, velike promjene krutosti, **neuravnatosti**, linije zavora, itd. Kako se pukotine šire, smanjuje se gornja granica nosivosti konstrukcije dok se oštećenje od zamora akumulira toliko da konstrukcija zakaže već kod normalnog radnog opterećenja. Tri su faze loma kod zamora materijala: početna pukotina, širenje pukotine i konačan lom. U procjenjivanju djelovanja zamora odlučujući utjecaj imaju ciklična opterećenja. Vremensko razdoblje za stvaranje i širenje pukotine ovisi o djelujućem naprezanju. Kod malog opterećenja (visokociklički zamor) najveći dio vremena do konačnog loma je u iniciranju pukotine. Pri visokim opterećenjima (niskociklički zamor), pukotine se formiraju vrlo rano.

Projektna opterećenja uzimaju u obzir određena stanja okoline i dinamičke uvjete u službi broda. Pojavljuju se kao rezultat narinutih dinamičkih opterećenja u stacionarnim strukturama, uključujući i vibracije od strojeva, opterećenja od djelovanja okoline (od vjetera, valova,...), sila akceleracije u pokretnim dijelovima strukture i ukrcanim teretima i temperaturnih promjena. Opterećenja se opisuju spektrima projektnih opterećenja kojima se definiraju rasponi inteziteta određenog opterećenja i brojevi ponavljanja svake promjene inteziteta u predviđenom vremenu korištenja broda.

Koncentracije naprezanja znatno smanjuje zamornu čvrstoću. Strukturni elementi trupa redovito sadrže geometrijske nepravilnosti sa povećanim naprezanjima (poput linija zavora,

krajeva koljena, otvora, zarez a itd.), gdje obično započinju pukotine uslijed zamora. Učinkoviti načini sprječavanja pojava oštećenja uzrokovanih zamorom su izbjegavanje oblika koji mogu izazvati povećanja naprezanja, pomno konstruiranje detalja, izbjegavanje mjesta mogućih povećanja naprezanja, pažljiva izrada i obrada. Nagle promjene krutosti strukture se moraju izbjeći jer mogu izazvati lokalne koncentracije naprezanja ili smanjiti vijek trajanja konstrukcije do konačnog loma od zamora.

Mogući načini oštećenja se određuju za kritična područja i kritične detalje, vidjeti na pr. Sl. 1. Okolnosti koje utječu na ponašanje materijala obzirom na zamor su veliki omjeri dinamičkih prema statičkim opterećenjima, frekvencija opterećenja, zavarivanje, složenost spojeva i stanje okoline.



Slika 1 Kritična područja u dvodnu broda za rasuti teret

S-N krivulje se određuju na osnovu brojnih pokusa i predstavljaju svojstva spoja i materijala obzirom na zamor, a to su zamorna čvrstoća i granica zamora. Zamorna čvrstoća je vrijednost naprezanja nakon koje će materijal puknuti kod nekog određenog broja ciklusa. Granica zamora je zamorna čvrstoća koja odgovara beskonačnom broju ciklusa. S-N krivulja predstavlja ovisnost vijeka trajanja uzorka u ciklusima N o rasponu naprezanja S . Ispitivanja zamora za visokociklični zamor se obično provode za 10^5 do 10^7 ciklusa.

Zaostala naprezanja utječu na zamor ovisno o smjeru. Zaostala vlačna naprezanja mogu znatno utjecati na smanjenje izdržljivosti na zamor spoja ukoliko se on podvrgne dodatnim vlačnim naprezanjima. Zaostala tlačna naprezanja kao moguća posljedica strojne i površinske obrade mogu smanjiti opasnosti od zamora.

3. Proračun zamora u projektu konstrukcije

Brodski trup ima niz mjesta koje treba unaprijed odrediti gdje se mogu pojaviti pukotine od zamora. Najprije se procjenjuju područja izvrnuta najvećim promjenama opterećenja ili značajnim koncentracijama naprezanja. Za proračun zamora potrebno je točno poznavanje ukupne raspodjele opterećenja u službi broda kroz čitav predviđeni vijek korištenja, određivanje elastičnog odziva strukture za detaljni projekt strukture te poznavanje postupaka proizvodnje i stupnja kontrole kvalitete. Postupak projektnog proračuna zamora se oslanja na određivanju maksimalnog raspona naprezanja i očekivanog broja ciklusa opterećenja tijekom vijeka korištenja konstrukcijskih detalja. Nakon toga se izabere prikladna funkcija razdiobe koja predstavlja spektar raspona naprezanja u vremenu korištenja broda. Nakon odabira odgovarajuće S-N krivulje, može se pristupiti proračunu oštećenja od zamora uz pretpostavku Palmgren-Minerovog pravila linearnog kumulativnog oštećenja od zamora.

Akumulirana oštećenja su presudna kod određivanja vijeka trajanja do loma uslijed zamora za svako moguće mjesto pojave

pukotina. Iako se oštećenja od zamora u početku vrlo sporo razvijaju, pri kraju vijeka korištenja detalja oštećenja se naglo povećavaju. Između oštećenja od zamora i broja ciklusa se može pretpostaviti linearna veza, što je sadržano u Palmgren-Minerovom zakonu, na pr. [1, 2, 3]. Kumulativni faktor oštećenja, D , po Palmgren-Minerovom zakonu je:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

gdje su:

- k -broj komponenata raspona opterećenja
- n_i -očekivani broj ciklusa opterećenja u projektnom spektru, za koje se pretpostavlja da će se pojaviti za različite raspone naprezanja S_i koji odgovaraju N_i
- N_i -dozvoljen broj ciklusa naprezanja za svaki S_i prema odabranoj S-N krivulji

Da bi se mogao izračunati vijek trajanja konstrukcije do loma, neophodno je postaviti dugoročnu raspodjelu raspona naprezanja koja uzima u obzir sve promjene naprezanja, koje se mogu očekivati kroz vijek korištenja konstrukcije, a dovoljno su velikog inteziteta da bi uzrokovala pojavu zamora.

Pri procjeni vijeka trajanja konstrukcije do zamora mora se uzeti u obzir i pristupačnost spojeva za kontrolu i propisan stupanj nadzora koji se odnosi na posljedice oštećenja. Vremenski period na kojem bi se trebao bazirati proračun zamora jednak je planiranom vijeku korištenja konstrukcije.

4. Projektna procedura proračuna zamora

Cilj primjene projektne procedure za nove brodove je u konstruiranju detalja koji zadovoljavaju predviđeno vrijeme službe broda. Kod izgrađenih brodova procedura je korisna radi preventivnog održavanja. Opisana projektna procedura je uključena u program FDA (Fatigue Design Assessment) iz programskog sklopa ShipRight Lloyd's Registra, [5].

Ulazni podaci su opće karakteristike broda, stanja krcanja, izmjere i geometrijska svojstva glavnog rebra, krmene i pramčane pregrade, opis orebrenja cijelog broda, razmještaj tereta, opis oplate uzduž broda, uzdužnjaka glavnog rebra, i opis svih detalja spoja ukrepa sa strukturom uzduž broda.

S-N krivulje su pohranjene u velike baze podataka koja se koriste u konstrukcijskim propisima za zamor a uključuju i S-N krivulje dobivene analizom stvarnih oštećenja brodskih strukturnih detalja od zamora, kao i S-N krivulje dobivene kroz velik broj laboratorijskih ispitivanja zamora tipičnih strukturnih detalja brodske konstrukcije. Projektna procedura određuje značajnu S-N krivulju temeljenu na opisu lokalne geometrije spojnih krajeva razmatranog detalja. Značajke zamorne čvrstoće konstrukcijskog detalja (S-N krivulja) se određuju koristeći parametarsku formulaciju geometrijskog faktora koncentracije naprezanja dobivenu pomoću sustavne analize konačnim elementima konstrukcijskih detalja broda. Izračunava se vrijednosti naprezanja za 50%-tnu vjerojatnost preživljavanja kod 10^7 ciklusa naprezanja za kombinaciju uzdužnjak/ukrepa za dva kritična mjesta.

Opterećenja i gibanja broda na pravilnim valovima se koriste u spektralnoj analizi gdje je potrebno poznavati amplitude i fazne pomake. Puni proračun pomorstvenosti nije

prikladan ukoliko se radi novi projekt, zbog značajnog vremena potrebnog za pripremu podataka, računanje i analizu rezultata. Zbog pojednostavljenja i ubrzanja proračuna u LR-u je sprovedeno parametarsko istraživanje opterećenja i gibanja broda izazvanih valovima za više od 250 brodskih formi sa varijacijama glavnih izmjera i ostalih značajnih parametara. Analizirane su prijenosne funkcije valovima induciranih opterećenja i gibanja: RAO (Response Amplitude Operator) i RPO (Response Phase Operator) koje su dobivene parametarskim proučavanjem, a u cilju određivanja značajnih parametara. Nakon toga su provedene višestruke regresijske analize podataka dobivenih uz pomoć vrpčaste teorije za određivanje niza utjecajnih funkcija kojima je opisana prijenosna funkcija. Ovim postupkom se mogu odrediti amplituda i s njima povezani fazni pomaci globalnih i lokalnih opterećenja i gibanja za bilo koje stanje krcanja broda, brzinu, frekvenciju valova i smjer napredovanja broda. Moguće je izračunati amplitudu i fazne kuteve za šest komponenata gibanja u odnosu na težište broda, vertikalne, horizontalne i torzijske momente savijanja uzduž broda te lokalne hidrodinamičke tlakove uronjenog trupa. Također je moguće izračunati značajke teretnih i balastnih skladišta i tankova, kao što su položaj težišta, slobodne površine i komponente inercijskih tlakova. Valovima inducirana strukturna opterećenja uzeta u obzir u ovom postupku analize su podijeljena na globalne vertikalne i horizontalne momente savijanja, lokalne vanjske hidrodinamičke tlakove i lokalne unutarnje tlakove od inercije tereta.

Analiza odziva strukture se provodi pojednostavljenim grednim modelom konačnih elemenata i analitičkim postupcima. Odziv se na svakom kritičnom mjestu računa koristeći koeficijente upliva na strukturu koji su umnožak svih komponenata opterećenja strukturnog dijela i relativnog geometrijskog faktora koncentracije naprezanja. Računanje relativnog odklona osnovne strukture od roštiljnog modela konačnih elemenata zbog utjecaja hidrodinamičkog tlaka valova i inercijskih tlakova od tereta i balasta, omogućuje uključivanje odziva primarne strukture u model odziva strukture. Za svaku komponentu opterećenja konstrukcijskog detalja, određuje se utjecajni koeficijent naprezanja koji predstavlja stanje naprezanja na kritičnom mjestu podvrgnutom jediničnom opterećenju.

Oponašanja uvjeta plovidbe omogućava predviđanje vjerojatnosti susretanja određenog stanja mora za niz brzina, smjerova napredovanja i stanja krcanja korištenih u proračunu zamora. Vjerojatnost stanja mora se izdvaja za svako područje plovidbe broda i kombinira s vjerojatnošću napredovanja broda u odnosu na valove i vremenu izloženosti pojedinim stanjima mora da bi se dobila ukupna vjerojatnost izloženosti broda određenom stanju mora. Vrijeme izloženosti se dobiva iz maksimalne brzine kojom brod može ploviti pri svakom pojedinom stanju mora i udaljenosti između točaka unutar svakog područja mora. Smjer napredovanja broda u odnosu na valove dobiva se iz kursa plovidbe između odredišta i smjer valova iz statističke baze podataka o valovima. Statistički podaci o valovima temelje se na globalnoj statistici koju daje British Maritime Technology (BMT). Rezultirajuće vjerojatnosti se zbrajaju za svako stanje mora i brzinu broda i smjer napredovanja broda u odnosu na valove i stanje krcanja da bi se odredila matrica profila službe potrebna za proračun oštećenja od kratkoročnog zamora.

U postupku oponašanja uvjeta se izvršava analiza pomorstvenosti koristeći postojeće prihvaćene kriterije ili prilagodbom vlastitih kriterija korienika. Za svaki kriterij pomorstvenosti za raspone stanja mora određenih značajnom valnom visinom i valnom periodom, moguće je izračunati predviđene odzive gibanja. Svaki

odziv se uspoređuje s graničnom vrijednošću. Odziv gibanja se izračunava za sva stanja krcanja i smjerove napredovanja.

Oštećenja od kratkoročnog zamora se određuju na osnovi kratkoročnih odziva ukupnih naprezanja kod nepravilnih valova pomoću koeficijenata upliva odziva strukture, amplituda i kutnih pomaka, opterećenja od pravilnih valova i valnog spektra. Raspon naprezanja se dobije kombinacijom odziva strukture koji slijede iz svake komponente opterećenja, uzimajući u obzir relativne fazne razlike između komponenata. Kad se komponente opterećenja ponašaju nelinearno i/ili neharmonički, koristi se posebna metoda simulacije u vremenskoj domeni da bi se došlo do rezultirajućeg raspona naprezanja. Kratkoročne statističke analize naprezanja i karakteristika zamorne čvrstoće konstrukcijskog detalja omogućuju proračun oštećenja od zamora i povratne frekvencije naprezanja za svako stanje mora.

Oštećenja od dugoročnog zamora se akumuliraju na osnovi svakog pojedinačnog stanja mora koristeći matricu vjerojatnosti stanja mora koja se definira preko 100 A1 standarda zamornih valova i s tim povezanim kratkoročnim oštećenjima od zamora i frekvencije naprezanja. Kako je oštećenje od zamora kumulativan proces, a dugoročna distribucija raspona naprezanja je funkcija dugoročnog izlaganja valovima, važno je primijeniti što realnije slike valova. Koristeći koncept sličan Standardu uzdužne čvrstoće 100 A1, koji se bazira na slici valova Sjevernog Atlantika, formuliran je Standard 100 A1 zamornih valova. Trgovački putevi, koji su funkcija tipa broda, određeni su statističkom analizom svjetskih trgovačkih puteva. Uz Standard 100 A1 zamornih valova, može se koristiti i opis valova koji definira sam korisnik za puteve koje određuju brodovlasnik ili brodograditelj.

Vjerojatnost oštećenja od zamora za predviđeni vijek trajanja do konačnog loma, pogodan je način prikazivanja rezultata zbog velikog rasipanja eksperimentalnih podataka o zamoru, utjecaja mjerila i S-N metode analize zamora. Koristi se logaritamsko-normalni dijagram za višestruke funkcije graničnih stanja.

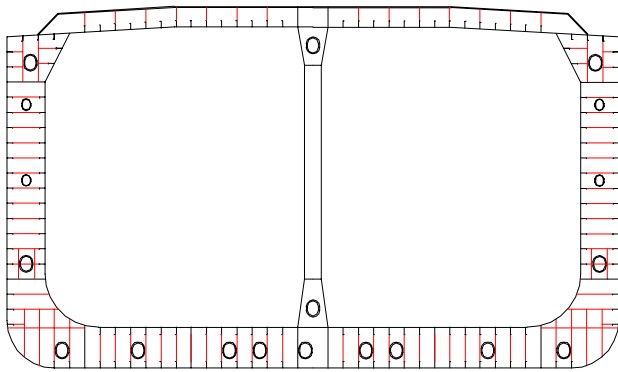
Analizu rezultata je zbog velike količine podataka nužno provoditi interaktivno, brzim pregledom kritičnih mjesta putem dijagrama i tablica. Ukoliko rezultati nisu zadovoljavajući, odnosno isti ne odgovaraju, moguće je proceduru ponavljati.

5. Praktična primjena

Opisana projektna procedura primjenjena je na dva broda iz hrvatskih brodogradilišta. Iz klasifikacijskih nacrti i knjiga krcanja određeni su svi dostupni podaci kao ulaz za program FDA. Potrebno je definirati sve karakteristike broda, glavnog rebra, pramčane i krmene pregrade, vojeve oplata, uzdužnih nosača i svih detalja sa svim promjenama po dužini broda.

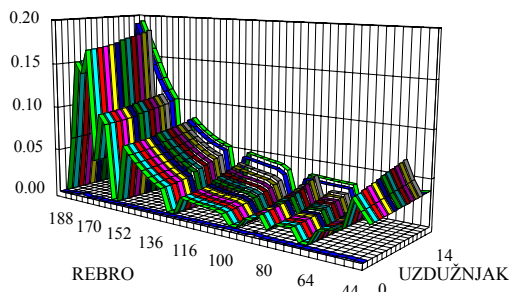
5.1 Brod za prijevoz kemikalija, [11]

Osnovni podaci: $L_{OA} = 182.5$ m, $L_{PP} = 174.8$ m, $B = 32.2$ m, $H = 17.5$ m, $T = 11.0$ m, $C_B = 0.82$, $\Delta = 47400$ tdw, $v_S = 15$ čv, Sl. 2.

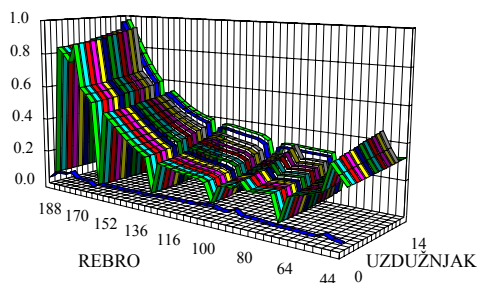


Slika 2 Glavno rebro broda za prijevoz kemikalija

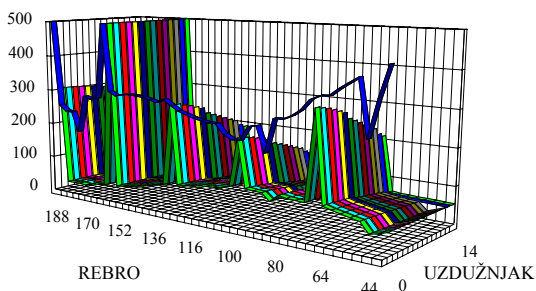
Proračun je proveden primjenom kriterija pomorstvenosti iz baze podataka FDA za tankere. Za provedbu proračuna odabran je uobičajeni plovni put za tankere iz baze podataka FDA. Za ilustraciju se daju neki rezultati u grafičkom obliku na Sl. 3 do 6.



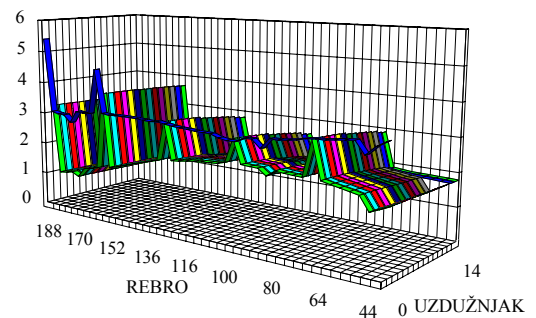
Slika 3 Vjerojatnost loma u 20 godina službe broda - desna strana broda - dno - 1. kritično mjesto -



Slika 4 Indeks oštećenja u 20 godina službe - najnepovoljniji slučaj s obzirom na strane broda i kritična mjesta - dno -

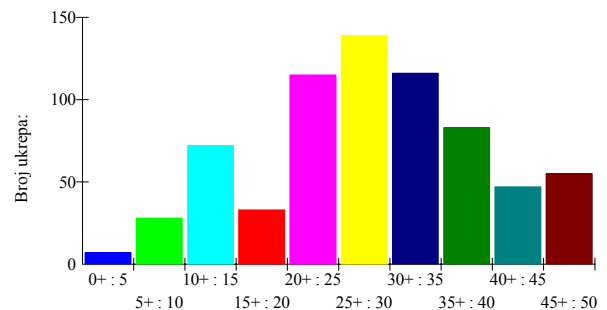


Slika 5 Vijek trajanja do pojave loma od zamora u godinama - najnepovoljniji slučaj - dno -



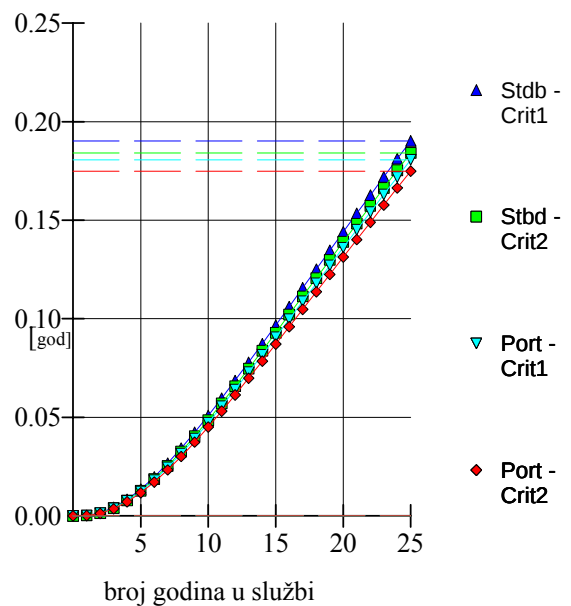
Slika 6 Indeks sigurnosti u 20 godina - najnepovoljniji slučaj - dno -

Na Sl. 7 dani su zajednički rezultati obzirom na broj ukrepa za sve ukrepe konstrukcije. Rezultate je moguće prikazati i za svaku podstrukturu odvojeno, ili za više dijelova zajedno.



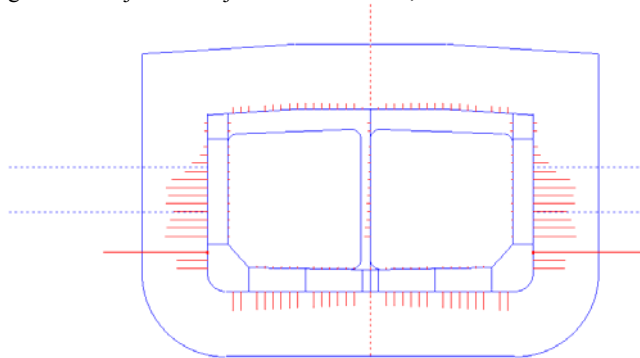
Slika 7 Broj ukrepa za deterministički vijek trajanja do pojave loma od zamora uz 97.5% vjerojatnost preživljavanja u razmatranom vremenu korištenja - (sve ukrepe)

Rezultati se mogu i eksplicitno dobiti za svako pojedino rebro, uzdužnjak i područje broda, Sl. 8.



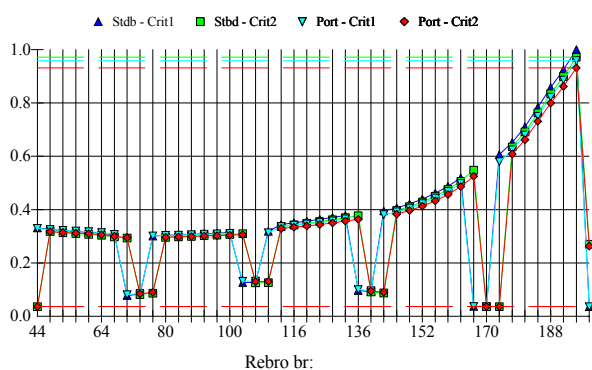
Slika 8 Vjerojatnost pojave loma od zamora za rebro 184 - dno - uzdužnjak 18-4-2

Na svakom pojedinom rebro može se dobiti prikaz rezultata obzirom na ekvidistantnu ovojnici koja prikazuje odabranu graničnu vrijednost koju definira korisnik, Sl. 9.



Slika 9 Indeks oštećenja u 20 godina službe broda za poprečni presjek 60. rebra
Ovojnica prikazuje vrijednost indeksa oštećenja 1

Na Sl. 10 prikaze su karakteristike zamora s obzirom na pojedini uzdužnjak po rebrima i dio broda.



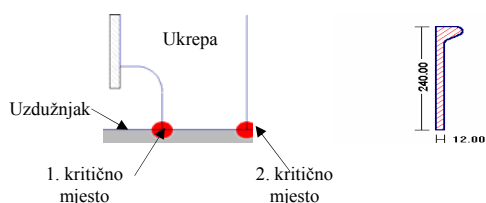
Slika 10 Indeks oštećenja u 20 godina službe broda
- najnepovoljniji slučaj - dno - uzdužnjak 18-4-2

5.2 Brod za prijevoz rasutog tereta, [12,13]

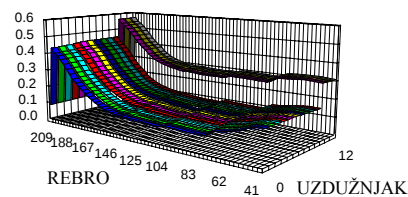
Osnovni podaci: $L_{OA} = 187.60$ m, $L_{PP} = 179.37$ m, $B = 30.80$ m, $H = 15.45$ m, $T = 10.10$ m, $C_B = 0.823$, $\Delta = 47070$ tdw, $v_S = 14.5$ čv. Rezultati za brod za rasuti teret se mogu prikazati na način kako je prikazano i kod tankera.

5.2.1. Parametarska studija

Za odabrani brod za rasuti teret provedena je parametarska studija variranjem oblika i dimenzija kritičnog detalja spoja uzdužnjaka dna i ukrepe rebrenice, Sl. 11.

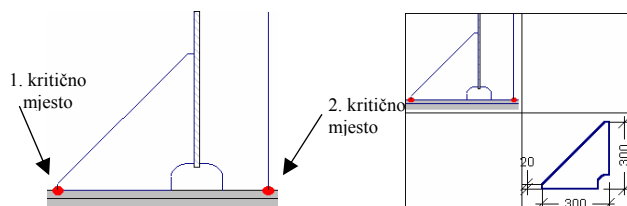


Slika 11 Spoj uzdužnjaka dna i ukrepe rebrenice
- osnovni oblik

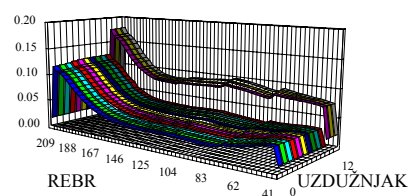


Slika 12 Vjerojatnost loma u 20 godina službe za detalj sa Sl. 11

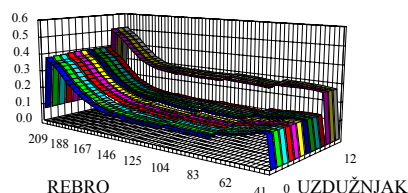
Prvo je ispitan utjecaj promjene geometrije detalja dodatkom koljena iza ukrepe na zamornu čvrstoću spoja, Sl. 13.



Slika 13 Plosni profil sa koljenom na suprotnoj strani rebrenice (I poboljšanje)



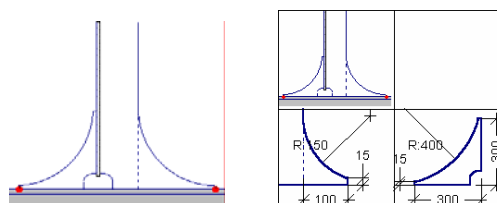
Slika 14 Vjerojatnost loma u 20 god. službe za detalj sa Sl. 13 (1. kritično mjesto)



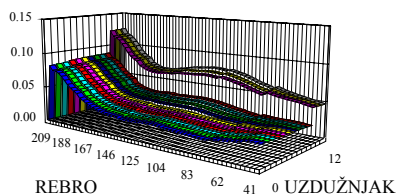
Slika 15 Vjerojatnost loma u 20 god. službe za detalj sa Sl. 13 (2. kritično mjesto)

Posljedica ove izmjene je znatno poboljšanje zamorne čvrstoće prvog kritičnog mjesta i nešto manje poboljšanje drugog kritičnog mjesta.

Sljedeće geometrijska promjena detalja je provedena prema preporukama LR-a za ovaj tip spoja, Sl. 16



Slika 16 Poboljšanje detalja prema preporukama LR-a



Slika 17 Vjerojatnost loma u 20 godina službe za detalj sa Sl. 13.

Primjenom preporučenog poboljšanja detalja (složenije i skuplje izvedbe), znatno se poboljšala zamorna čvrstoća za oba kritična mjesta.

6. Zaključak

U radu je s uspjehom primjenjen projektni postupak analize zamora sadržan u programskom paketu FDA (Fatigue Design Assessment) iz programskog paketa ShipRight izrađen u Lloyd' Registru. Program FDA predviđen za primjenu na osobnim računalima, zahtjeva i obrađuje veliki broj ulaznih podataka, te uz korištenje velike interne baze podataka i složenih numeričkih algoritama daje različite tabelarne i grafičke prezentacije rezultata, koji se mogu interaktivno pretraživati. Postupak se može primijeniti za konstrukcije svih novih tankera i brodova za rasuti teret duljine preko 190 m da bi se postigao neophodni stupanj pouzdanosti konfiguracije i detalja konstrukcije kroz iterativnu primjenu procedure.

Projektni postupak primjenjen je na dva broda, jedan brod za rasuti teret i jedan tanker iz hrvatskih brodogradilišta. Rezultati omogućavaju selektivno uočavanje kritičnih mjesta, za koja se promjenom oblika i dimenzija detalja može popraviti izdržljivost na zamor prema željenim kriterijima.

U svrhu uvida u ponašanje brodske konstrukcije obzirom na parametre zamora, provedena je parametarska studija variranjem oblika i dimenzija detalja za brod za rasuti teret. Kod primjene poboljšanih detalja prema preporukama LR, potvrđeno je značajno poboljšanje glede izdržljivosti na zamor (uz povećanu složenost i cijenu izvedbe).

Procedure za analizu zamora izlaze iz razvojne faze i implementiraju se u programe na elektroničkim računalima za praktičnu uporabu. Premda danas još nije uobičajena praksa rutinske primjene procedura za ocjenu zamora u brodogradilištima nego je odluka o primjeni ostavljena na volji konstruktora, u bliskoj budućnosti se može očekivati da će procedure analize zamora biti sastavni dio postupka projektiranja brodske strukture u cjelini.

Rad na ovom izvješću je omogućen susretljivošću Ureda Lloyd's Registra iz Rijeke i Centrale Lloyd's Registra iz Londona koji su iskazali povjerenje ustupanjem program FDA za istraživačke i nastavne ciljeve na Zavodu za brodogradnju i pomorsku tehniku, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Literatura

- [1] HUGHES, O. F., FRANKLIN, P.: "Definition and Validation of a Practical Rationally-Based Method for the Fatigue Analysis and Design of Ship Hulls", Technical & Research Report R-41, SNAME, NJ, 1993.
- [2] HUGHES, O. F.: "Ship Structural Design", The Society of Naval Architects, NJ 1988.
- [3] MADSEN, H, KRENK, S., LIND, N.: "Methods of Structural Safety, Chapter: Stochastic Models for Material Strength" Prentice- Hall, Englewood Cliffs, N.J.1986.
- [4] LR: "ShipRight Procedures for the Design, Construction and Lifetime Care of Ships" Part 3, Chapter 16, Lloyd's Register of Shipping, London 1996.
- [5] LR: "Fatigue Design Assessment procedure – Structural detail design guide", Lloyd's Register of Shipping, London 1996.
- [6] LR: "Fatigue Design Assessment procedure - Software user manual", Lloyd's Register of Shipping, London 1996.
- [7] DOMAZET, Ž.: "Metode zaustavljanja širenja pukotine", Disertacija, FSB, Zagreb 1993.
- [8] VULIĆ, N.: "Numeričko modeliranje postupka zaustavljanja širenja pukotine", Disertacija, FSB, Zagreb 1995.
- [9] TOPIĆ, M.: "Dinamička izdržljivost brodske konstrukcije", Diplomski rad, mentor prof. I. Senjanović, FSB, Zagreb 1997.
- [10] IVANČEVIĆ, V.: Projektni postupak za ocjenu umora materijala u konstrukciji broda, Diplomski rad, mentor doc. K. Žiha FSB, Zagreb 1998.
- [11] LR: "Double Hull Oil Tankers", Part 4, Chapter 9, Lloyd's Register of Shipping, London 1996.
- [12] IACS, "Bulk Carriers - Guidelines for Surveys, Assessment and repair of Hull Structure", International Association of Classification Societies, 1994.
- [13] LR, "Bulk Carriers", Part 4, Chapter 7, Lloyd's Register of Shipping, London 1996.

Zahvala