

Kalman ŽIHA
Joško PARUNOV
Berislav TUŠEK

Granična čvrstoća brodske trupa

Stručni rad

U ovom se prikazu najprije sažimaju osnovni problemi i povijest razvoja granične čvrstoće, te zaključci međunarodnoga povjerenstva za graničnu čvrstoću International Ship Structure Committee ISSC iz 2001. i 2002. godine. Potom se, nakon pregleda postojećih postupaka, prikazuje praktična procedura za proračun granične čvrstoće prema jedinstvenim pravilima International Association of Classification Societies (IACS) koja je poslužila za izradu računalnoga programa ULTIS na *Fakultetu strojarstva i brodogradnje* u Zagrebu. U nastavku daju se rezultati proračuna granične čvrstoće jednoga broda za rasute terete iz hrvatskih brodogradilišta programom ULTIS i usporedbe s drugim sličnim programima. Prikazan je slijed popuštanja i izvijanja elemenata u tijeku slamanja brodske trupa, te su izvršene provjere utjecaja izbora materijala palube na graničnu čvrstoću pri progibu i određena naprezanja dna pri pregibu trupa. Na kraju se opisuje postupak za povećanje granične čvrstoće trupa postupnim pojačavanjem elemenata uzdužne čvrstoće slijedom njihova slamanja pri savijanju broda.

Ključne riječi: brod za naftu, brod za rasuti teret, čvrstoća trupa, granična čvrstoća, konstrukcija broda, pravila klasifikacijskih društava

The ultimate strength of the ship hull

Professional paper

This review paper first reveals for Croatian readers the basic issue and the history of ultimate strength and conclusions according to the International Ship Structure Committee. The following briefly recapitulates the practical method for ultimate strength analysis according to common rules of classification societies and presents a computer program, ULTIS, implemented at the *Faculty of Mechanical Engineering and Naval architecture* in Zagreb, based on IACS recommendations. Subsequently, benchmark studies of ultimate strength of a bulk carrier built in a Croatian shipyard employing ULTIS are attached to illustrate the stepwise yielding and buckling scenario of hull elements both for deck and bottom structures in sagging and hogging conditions, as well as the effect of higher tensile steel during the ship bending. Finally, the paper investigates a possible increase of the ship's hull ultimate strength by strengthening longitudinal structural elements after their failure sequence under bending.

Keywords: bulk carriers, classification societies rules, hull strength, oil tankers, ship construction, ultimate construction

Adresa autora (Authors' address):
Fakultet strojarstva i brodogradnje,
 Ivana Lučića 5, 10 000 Zagreb

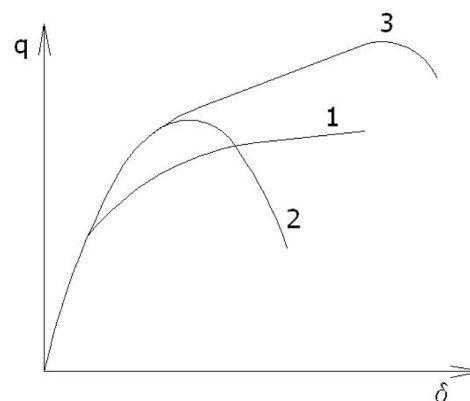
Primljeno (Received): 2006-09-22
Prihvaćeno (Accepted): 2007-01-16
Otvoreno za raspravu (Open for discussion): 2008-03-31

1. Uvod

Klasifikacijska društva sve više vode računa o graničnoj čvrstoći brodske trupa. Društva okupljena u IACS-u podupiru razvoj jedinstvenih pravila uzdužne čvrstoće broda uključujući i provjeru granične čvrstoće trupa. Lom pojedinih dijelova i cijeloga trupa broda zbog premašivanja granične čvrstoće je nelinearna pojava, bilo zbog geometrijske nelinearnosti (zbog izvijanja ili drugog znatnog pomaka), bilo zbog nelinearnosti materijala (popuštanje i plastična deformacija). Glavni načini loma čeličnih strukturnih elemenata prikazuju se na osnovi ovisnosti opterećenja q i defleksije δ [1] za lokalne plastične deformacije (krivulja 1, slika 1), izvijanje nosača (krivulja 2, slika 1) i izvijanje opločenja (krivulja 3, slika 1).

Vrijedeći zahtjevi na uzdužnu čvrstoću broda vezani su uz projektne kriterije oslonjene uglavnom na teoriju elastičnosti, a dodatno preporučene provjere granične čvrstoće trupa nalažu i primjene nelinearnih teorija čvrstoće. Pri razmatranju problema

Slika 1 Krivulje ovisnosti opterećenja q i defleksije δ za razne načine loma strukturnih elemenata [1]
 Figure 1 Load q – deflection δ curves for various types of failures of structural members [1]





1 Introduction

The review first summarizes in Croatian the basic [1] history of the ultimate strength of ships from the very beginning, i.e. Caldwell's proposals in 1996, to the recent practical recommendation of the classification societies. It also reveals observations and suggestions by ISSC-2001 [2] and 2006 [3] for the implementation of ultimate strength assessments in structural design and hull maintenance based either on sophisticated but time-consuming finite element methodology or a simplified and idealized, more practical structural method. The discussion on available methods for the ultimate strength analysis and the detailed description of the practical ultimate strength assessment procedure using load-end shortening curves according to common recommendations of the IACS [4] are attached for Croatian readers. In present use, the one-step method (HULS-1) based on a simplified method of reducing the hull bending stress accounting for deck buckling [5], [6] is particularly suitable for tankers. The ultimate bending moment is defined as $M_U = Z_{red} \sigma_{red}$, where Z_{red} is the reduced section modulus accounting for

effective deck area $A_{eff} = \frac{\sigma_U}{\sigma_{Yd}} A$ after buckling of deck ele-

ments, σ_U is the limit stress of stiffened panel obtained by an advanced method for buckling evaluation, σ_{Yd} is the minimal yielding stress and A is the actual deck cross sectional area. The advanced method for buckling evaluation accounts for geometric and material non-linearities, initial deformations and residual stresses due to welding, and also takes into account load redistributions among stiffeners. The evaluation is available as the computational procedure PULS at the Internet address www.itprules.com. Meanwhile, the interest for the damaged ship hull ultimate strength [7] has grown.

The computer program ULTIS [8] is applied to benchmark studies in this review. It is based on incremental-iterative approach for ultimate bending moment evaluation developed in the Visual Basic 5 programming language [9] and uses spreadsheet utilities for result interpretations. The results of ultimate strength studies of a bulk carrier obtained by using the program ULTIS are compared to the results of the program MARS [10] and are reported in detail in English in the sequel.

2 Example of ship hull ultimate strength calculation

Ultimate strength analysis is presented for the bulk carrier Yard 409, built in the *Brodosplit shipyard*, Croatia, in 1999, with the following main particulars:

Class: LR \boxtimes 100 A1 bBulk cCarrier Strengthened for Heavy Cargoes

Length over all: $L_{OA} = 187.6$ m

Length between perpendiculars: $L_{PP} = 179.35$ m

Scantling length: $L_{RL} = 177.95$ m

Breadth: $B = 30.8$ m

čvrstoće trupa potrebno je voditi računa o odgovarajućemu modeliranju brodske trupa, odabiru postupka analize i pritom valja procijeniti utjecaje nedostatnosti postupaka proračuna i početnih netočnosti na graničnu čvrstoću (početne deformacije, zaostala naprezanja zbog zavarivanja itd.). Mnogi se čimbenici koji utječu na graničnu čvrstoću i opterećenja ne mogu uvijek točno odrediti, već se računa s neizvjesnostima njihovih djelovanja i to ne samo za neoštećena stanja nego i za moguća oštećenja brodova. Povjerenstvo ISSC – a [2, 3] razmotrilo je razne mogućnosti i predložilo praktične metode za procjenu granične čvrstoće trupa uobičajenih tipova trgovačkih brodova, bilo u projektnom postupku da bi se postigla što sigurnija konstrukcija, ili za postojeće brodove uzimajući u obzir trošenja tijekom službe.

1.1. Povijest razmatranja granične čvrstoće

Teorijska razmatranja granične čvrstoće broda [2] pri uzdužnom savijanju započeo je Caldwell 1965. godine. Kako Caldwellov prijedlog nije uzimao u obzir smanjenje nosivosti strukturnih elemenata poslije premašivanja njihove granične čvrstoće, tako je granična čvrstoća brodske trupa bivala precijenjenom. Maestro i Marino proširili su Caldwellovu formulu 1989. godine slučajem dvoosnoga savijanja, a modificirani postupak omogućio je procjenu utjecaja oštećenja od nasukavanja na graničnu čvrstoću. Nishihara je 1983. godine primijenio Caldwellov postupak za računanje granične čvrstoće poboljšavši točnost redukcijskih čimbenika. Endo i dr. (1988.) i Mansour i dr. (1990.) predložili su jednostavne postupke za ocjenjivanje granične čvrstoće.

Premda ovi postupci ne uzimaju izričito u obzir smanjenje čvrstoće elemenata nakon premašivanja njihove granične čvrstoće, procijenjena granična čvrstoća brodske trupa u mnogim je slučajevima pokazala dobar odnos između izračunatih i izmjerenih vrijednosti. Postupak simulacije označen kao analiza progresivnoga sloma (eng. *Progressive Collapse Analysis*) uzima u obzir smanjenje čvrstoće (eng. *load shedding*) svakoga pojedinog elementa strukture kada se za opis ponašanja brodske trupa u tijeku slamanja koriste krivulje odnosa srednjeg naprezanja i srednje deformacije elementa (eng. *average stress – average strain relationship curves, load – end shortening curves*). Smithov postupak iz 1977. godine koji računa sa smanjenjem čvrstoće elemenata nakon premašivanja vlastite granične čvrstoće, kao i faznim pomakom u slamanju pojedinih elemenata, dodatno je ubrzao i olakšao postupak proračuna. Pritom je Smith prvi analitički dokazao da se u poprečnom presjeku ne može razviti potpuni plastični moment savijanja. Po Smithovom je postupku poprečni presjek strukture podijeljen na elemente koji se sastoje od ukrepa sa sunosivom širinom oplata, a odnos srednjeg naprezanja i srednje deformacije određen je prije izvođenja analize progresivnoga sloma. Da bi vrednovali graničnu čvrstoću brodske trupa određenu Smithovim postupkom, Gordo i Guedes Soares su 1993. i 1996. godine primijenili pojednostavljeni pristup koji predstavlja kolapsno ponašanje grede - štapa opterećenog na osno tlačenje. *Bureau Veritas* je u svoj program MARS implementirao postupak na osnovi modela progresivnoga sloma koji se zasniva na Smithovom postupku i Gordo – Soaresovim krivuljama srednjeg naprezanja i srednje deformacije za ploče i ukrepe.

Yao je 1993. godine predložio analitički postupak za dobivanje odnosa srednjeg naprezanja i srednje deformacije za element koji se sastoji od ukrepe i pripadnog opločenja. Taj je

postupak implementiran u računalni program HULLST za analizu progresivnoga slamanja.

Rahman i Chowdhury su 1996. godine kombinirali Smithov postupak s pojednostavljenim krivuljama odnosa srednjeg naprezanja i srednje deformacije koje su se temeljile na računu granične čvrstoće ukrijepljenoga panela kojeg je razvio Hughes 1988. godine.

Razlog za još uvijek rijetku primjenu metode konačnih elemenata u analizi granične čvrstoće trupa leži u činjenici da se utjecaji nelinearnosti materijala i geometrije moraju uzeti u obzir korištenjem inkrementalnih procedura koje redovito iziskuju mnogo računalnog vremena.

Postupak idealiziranog elementa strukture ISUM (eng. *Idealized Structural Unit Method*), uz Smithov, još je jedan jednostavni postupak. U ovom se postupku velika strukturna jedinica promatra kao jedan element što smanjuje vrijeme potrebno za računanje. Najvažnija zadaća u ovom postupku jest razvijanje jednostavnog i učinkovitog elementa uzimajući u obzir utjecaje izvijanja i popuštanja. Ueda i dr. 1984. su godine razvili elemente ploča i ukrijepljenih ploča koji su vjerno oponašali ponašanje zbog izvijanja i plastičnoga sloma pod kombiniranim dvoosnim (tlak/vlak) i smičnim opterećenjima. Paik i dr. 1990. i 1992. godine poboljšali su tu metodu i proveli različite analize progresivnoga slamanja. Bai i dr. 1993. su godine razvili gredni element, element ploče, te smični element na temelju metode plastičnog zgloba (eng. *Plastic Node Method*) koju su razvili Ueda i Yao 1982. godine, te su ove elemente primijenili u analizi progresivnoga sloma.

Zasad je u brodogradnji najviše u uporabi praktična numerička metoda analize progresivnoga sloma s primjenom „load – end shortening“ krivulja za određivanje σ - ϵ krivulja naprezanje – deformacija pojedinih ploča i ukrijepljenih panela, koje se zatim integriraju zadržavajući pretpostavke o trupu kao jednostavnoj gredi da bi se konačno odredila krivulja progresivnoga sloma broda pod uzdužnim savijanjem.

1.2. Zaključci povjerenstva za graničnu čvrstoću ISSC

Prema Povjerenstvu za graničnu čvrstoću na simpoziju ISSC 2001 održanom u Tokyu [2] raspoloživi postupci za procjenu granične čvrstoće brodske trupa mogu se klasificirati na dva načina. Jedan je način putem izvođenja analize progresivnoga sloma, a drugi je izravno računanje granične čvrstoće primjenjujući empirijske i teorijske izraze. Najtočniji postupak za analizu progresivnoga slamanja jest analiza velikih elastoplastičnih defleksija koristeći metodu konačnih elemenata koja međutim zahtijeva velike računalne resurse, pa je preporučeno koristiti jednostavniji alternativni postupak. Smithovom pojednostavljenom metodom omogućena je relativno velika točnost u oponašanju progresivnoga sloma brodske trupa pri uzdužnom savijanju. Metoda idealiziranog elementa strukture mogla bi se također uporabiti za analizu progresivnoga sloma, no potrebno je razviti prikladniji element ukrijepljenoga panela da bi se dobili vjerodostojni rezultati. U pojednostavljenim postupcima analize progresivnoga sloma, točnost rezultata uvelike ovisi o točnosti određivanja ponašanja u tijeku sloma svakoga pojedinog strukturnog elementa.

Izvijanje i plastični slom palube dominiraju u općem slomu poprečnoga presjeka u slučaju progiba, a slom dna u slučaju pregiba. Najjednostavniji postupak za proračun granične čvrstoće

Height: $H = 15.45$ m

Design draft: $T = 10.1$ m

Block coefficient: $C_B = 0.823$ m

Trial speed:

$V_{pp} = 14.5$ kt at 10.1 m draft and 6435 kW/127 o/min

The maximum still water bending moments according to the shipyard data and the wave bending moments following unified IACS rules amount to:

3. Hogging bending moment:

$$M_{TH} = M_{SWH} + M_{WH} = 2348691 \text{ kNm}$$

4. Sagging bending moment:

$$M_{TS} = M_{SWS} + M_{WS} = -2550596 \text{ kNm.}$$

The transverse section is modelled for numerical calculation with characteristic stiffened panels and hard corners subjected to bending until the ship hull collapses, Fig. 8. The material of hull elements are in general of MS grade A shipbuilding steel with the yielding stress of $R_e^h = 235$ N/mm², while the deck panels are of grade AH 32 steel with the yielding stress of $R_e^h = 315$ N/mm².

The ultimate bending moment assessments for the purpose of this review in the sequel are first obtained by using the self-made program ULTIS, Fig. 9. Then, the calculations are repeated by using the computer program MARS 2000 developed at the *Technical University in Szczecin*, Poland, that implements the code for the ultimate strength calculation following the requirements of *Bureau Veritas* 2003, Fig. 10. The results obtained by ULTIS and by MARS 2000 are compared in Table 1. As it can be seen, they do not show good agreement, which could be due to different modelling as well as due to possibly different convergence criteria in numerical procedures.

2.1 Analysis of the failure sequences leading to collapse

The self-made program ULTIS provides a stepwise insight into the failure sequence of elements before the hull collapse occurs. The failure sequence is represented by the states of the hull elements before (point 1), during (point 2) and after (point 3) the ultimate bending moment is exceeded for hogging and for sagging conditions (points 4, 5 and 6, respectively), Fig. 9.

1-the pre-critical-point-hogging: Since the deck panels are of HT steel, the tensile stresses are below the yielding stress of 315 N/mm² and the yielding of the deck does not take place. However, the tensile stresses in three stiffeners of the wing tank lower panel of MS grade A steel exceed the yielding stress of 235 N/mm². The bottom structure in hogging conditions under compressive loads does not attain either the yielding or critical buckling stresses, Fig. 11.

2-the critical-point-hogging: In this case more stiffeners of the wing tank lower panel yield since the tensile stresses exceed 235 N/mm², causing a possible plastic deformation.

Compressive stresses in the bottom structure of MS exceed the working stress of 175 N/mm² and consequently reach the critical buckling stresses in the bottom panel. At the same time, the compressive stresses in the hard corners (bottom side girders) exceed 235 N/mm², causing yielding and plastic deformations.

3-the post-critical-point-hogging: Deck panel tensile stresses exceed the HT steel yielding point, resulting in plastic deformations. Almost all stiffeners of the wing tank lower panel yield.

The increase of compressive stresses in the double bottom structure causes further plastic deformations due to the exceeding of the yielding stress.

4-the pre-critical-point-sagging: The compressive stresses in deck panels exceed the allowed working stress of 225 N/mm² for HT steel, causing the buckling of the deck. The compressive stresses in the wing tank lower panel and in the side shell stiffeners of MS approach the yielding stress causing buckling and reduction of mean compressive stress in the panels.

Stresses in the bottom plating (excluding the double bottom and bilge structure) exceed the yielding point of the MS steel and cause the elasto-plastic collapse of the bottom. The stresses in the wing tank stiffeners are higher than those in the hopper tank stiffeners since the neutral axis is lowered due to the prior buckling of deck elements.

5-the critical-point-sagging: Deck panels, wing tank lower panel and side shell stiffeners continue to buckle due to the reaching of the critical buckling stresses. The elasto-plastic collapse of the bottom structure occurs since the stresses exceed the MS yielding point of 235 N/mm².

6-the post-critical-point-sagging: The increase of compressive stresses in the deck structure leads to further buckling and simultaneously causes further plastic deformations of the bottom structure due to intensive yielding.

2.2 Influence of deck panel material during sagging

Compressive loads during sagging cause buckling in the deck panels made of HT steel after exceeding the working stress of 225 N/mm², much before reaching the yielding stress of 315 N/mm². Therefore, a study of the replacement of the HT steel with the MS in the deck is performed.

Equivalent thickness of deck plating

$$t_{p235} = \frac{t_{p315}}{\sqrt{K}} = \frac{26.5}{\sqrt{0.78}} = 30 \text{ mm} \quad \text{and the equivalent deck sti-}$$

$$\text{ffener section modulus } W_{235} = \frac{W_{315}}{K} = \frac{1450}{0.78} = 1860 \text{ cm}^3 \text{ (HP}$$

430x17, $W = 1950 \text{ cm}^3$) of MS steel instead of HT steel are found using the appropriate material factor $K=0.78$.

In contrast to the deck panel of HT steel, it was found that the deck panel of MS steel yields before it buckles since the critical buckling stress of the panel in the case of MS is higher than the working stress of HT steel amounting to 225 N/mm², so it greatly exceeds the working stress of MS steel of 175 N/mm². In this case, the ultimate bending moment is reduced by 3 % for hogging and by about 1 % for sagging, which can easily be neglected.

2.3 Bottom panel in sagging

It is also shown that the bottom panel of MS steel due to compressive load in the hogging condition buckles before it would collapse due to yielding, Fig. 13.

jest postupak koji prati početak popuštanja panela palube pri progibu trupa. Lokalna čvrstoća na izvijanje dna uglavnom je zadovoljavajuća, a postupak za slučaj pregiba trupa može biti jednostavan. Valja imati na umu da prva metoda daje malo više, a druga nešto manje rezultate od prave vrijednosti.

Čvrstoća na početku popuštanja i čvrstoća na početku izvijanja izračunavaju se koristeći modul presjeka za elastično savijanje, te se uspoređuju s procijenjenom graničnom čvrstoćom. Obično se pokazuje da je čvrstoća na početku popuštanja palube malo viša od granične čvrstoće brodske grede u progibu, no razlika je praktički prihvatljiva. Isto tako, čvrstoća početka izvijanja dna malo je niža od granične čvrstoće brodske grede u pregibu. Ispitivanja su pokazala da opterećenje u poprečnoj ravnini i lateralni tlak ponešto smanjuju graničnu čvrstoću ukrijepljenoga panela kod uzdužnoga savijanja.

Za neke vrste brodova, te za određena stanja opterećenja, utjecaji dvoosnoga savijanja, dvoosne smične sile i torzijskog momenta ne mogu se zanemariti. Dvoosno se savijanje lako uključuje putem Smithove metode. Utjecaji smičnih sila i torzijskih momenata mogu se dobiti približnim metodama što bi u budućnosti trebalo točnije odrediti.

U slučaju tankera s jednostrukom oplatom pokazalo se da je smanjenje čvrstoće zbog utjecaja korozije gotovo proporcionalno smanjenju momenta otpora. Zaključeno je da je dopustivo 15 postotno smanjenje momenta otpora sa stajališta granične čvrstoće.

Od svih čimbenika najveći utjecaj na graničnu čvrstoću imaju debljina opločenja i dimenzije ukrepa kao i čvrstoća popuštanja materijala. Utjecaji početnih deformacija i zaostalih naprežanja od zavarivanja nisu znatni. Općenito je čimbenik sigurnosti pri progibu manji nego pri pregibu. Pri projektiranju pojedinih tipova brodova trebalo bi uzeti u obzir projektne značajke ovisne o tipu broda.

Povjerenstvo za graničnu čvrstoću ISSC-a se na sastanku 2006. godine u Southamptonu [3] osvrnulo na razvoj granične čvrstoće u odnosu na prethodni sastanak povjerenstva, 2001. godine u Tokiju [2]. U proteklom razdoblju, granična čvrstoća obrađivala se u tri važna smjera: GBS (*Goal-Based New Ship Construction Standards*), CSR (*Common Structural Rules*), organizacije IACS, te ULS (*Ultimate Limit State*), prema IMO prijedlozima. U međuvremenu razmotreno je više pojednostavljenih metoda za predviđanje granične čvrstoće i ponašanja nakon njezina premašivanja i za ukrijepljene i za neukrijepljene panele koje međutim ipak nisu u potpunosti prikazale međuovisnost raznih oblika sloma, pogotovo kod općeg izvijanja panela ukrijepljenih u više smjerova, pa ovo predstavlja jedan od budućih zadataka. Metoda konačnih elemenata sve se više upotrebljava u predviđanju granične čvrstoće strukturnih elemenata poput opločenja i ukrijepljenih ploča premda se računalna učinkovitost same metode nije poboljšala u protekle tri godine. Novopredložena metoda bez mrežne podjele još nije našla pravu primjenu pri analizi sloma strukturnih elemenata, ali su s druge strane razvijeni novi ISUM elementi pravokutne ploče koji bolje oponašaju djelovanje ploča prigodom sloma.

Sve je više nastojanja za primjenu vjerojatnosti pri slomu brodske grede kao rezultat slijeda ponašanja raznih elemenata strukture s raznim pojednostima proračuna. Štoviše, pokazuje se i zanimanje da se predviđanja vjerojatnosti sloma sredine broda prošire i na druga mjesta zbog stanovitog oštećenja i to za očekivani životni vijek strukture. Osim dobro istraženih

ukrijepljenih cilindara koji su važni na primjer za podmornice, potrebna su dodatna istraživanja na koničnim ljuskama, polusferama i torusima, pogotovo glede nesavršenosti oblika. Kako je kod brodova velika zastupljenost zakrivljenih ploča potrebni su novi doprinosi kojima bi se poboljšala predviđanja za zakrivljene elemente koja su zasad utemeljena na iskustvima za ravne dijelove. Osim brodova, granična čvrstoća sve se više razmatra i kod drugih pučinskih objekata gdje su potrebna istraživanja spojeva, međudjelovanja trupa i oslonaca, te granični uvjeti koji uključuju međudjelovanje strukture i morskog dna itd. Kako se kompozitni materijali sve više koriste, pogotovo u vojnoj brodogradnji, predstavljen je višegodišnji istraživački program na *Univerzitetu* u Maineu koji uključuje vjerojatnosnu metodu konačnih elemenata, slom modela laminirane ploče, trajnost čvrstoće kompozitnih materijala glede vlage itd. Također se obrađuje granična čvrstoća aluminijskih struktura, pogotovo brzih putničkih brodova. Predloženi su neki empirijski izrazi za procjenu granične čvrstoće aluminijskih ukrijepljenih panela koji su opterećeni na tlačno opterećenje u svim smjerovima. Također je predložena modifikacija Eurocodea 3 za čelične grede zbog razlike u materijalu kad se isti koristi za aluminijske grede.

Provedena je usporedna procjena granične čvrstoće putničkoga broda s visokim i dugim nadgrađem i velikim otvorima za balkone i čamce za spašavanje. Koristile su se Smithova, metoda ISUM, te metoda konačnih elemenata (FEM). Zbog spomenutih se otvora naprezanja i deformacije ne protežu linearno preko poprečnoga presjeka. Istraživanje je provedeno u tri faze. U prvoj je pretpostavljena linearna raspodjela deformacija, a u drugoj nelinearna prema elastičnoj FEM analizi. Treća faza predstavlja nelinearnu FEM analizu. Prema rezultatima FEM analize, uzdužna pregrada najprije popušta zbog smičnog naprezanja na četvrtini duljine broda od oba kraja. Potom slamanjem dominira izvijanje panela najgornje palube ili dna na sredini broda. Pokazano je da korištenje Smithove metode u drugoj fazi daje više rezultate granične čvrstoće nego nelinearna FEM metoda. Zaključeno je da, u slučaju korištenja Smithove metode, treba obratiti posebnu pozornost pri razmatranju granične čvrstoće putničkih brodova s visokim i dugim nadgrađem i velikim otvorima za spasilačke čamce.

2. Postupci proračuna granične čvrstoće brodsoga trupa

Proteklih se godina metoda konačnih elemenata prilagođavala rješavanju nelinearnih problema čvrstoće brodsoga trupa koji uključuju obje nelinearnosti, geometrijsku i materijalnu, uvođenjem inkrementalnog i iterativnog pristupa korištenjem krivulja opterećenje – defleksija [4]. Ovaj pristup omogućava analizu istodobne pojave izvijanja i popuštanja, moguće ga je primijeniti ne samo na pojedine elemente strukture, nego i na kompletnu strukturu koja uključuje interaktivni slom nekoliko elemenata zbog kombiniranog izvijanja i popuštanja, ali je cijeli postupak vremenski i numerički previše zahtjevan.

Prvo moguće pojednostavljenje postiže se idealizacijom geometrije brodsoga trupa tako da se odrede dijelovi strukture za koje se mogu razviti i primijeniti približne metode analize granične čvrstoće, uz nužno zanemarenje uzajamnih utjecaja dijelova. Drugo moguće pojednostavljenje zasniva se na zasebnim analizama izvijanja i pojave plastičnih zglobova. Oba pojednostavljenja zanemaruju mogućnost istodobnoga pojavljivanja više

2.4 One step method

The one step procedure evaluates the ultimate bending moment as the moment M_p due to elasto-plastic yielding using only the vertical plastic section modulus Z_p as

$$M_p = R_e^h \cdot \frac{A}{2} \cdot d = R_e^h \cdot Z_p. \quad \text{The appropriate shape factor } v \text{ is}$$

$$\text{defined as } v = \frac{R_e^h \cdot \frac{A}{2} \cdot d}{R_e^h \cdot \frac{I}{Y_{\max}}} = \frac{R_e^h \cdot Z_p}{R_e^h \cdot Z_e} = \frac{Z_p}{Z_e}, \quad \text{where } R_e^h \text{ is the}$$

yielding stress, A is total cross-sectional area, I is the cross-sectional moment of inertia about horizontal axis, y_{\max} is the greatest distance of a section from the horizontal neutral axis and d is the distance between the centroids of the upper and the lower half of the resisting area.

The ultimate vertical plastic bending moment for the case study amounts to

$$M_p = Z_p \cdot R_h^s \cdot 10^3 = 13.21287 \cdot 315 \cdot 10^3 = 4162000 \text{ kNm}$$

and exceeds the result obtained by the iterative procedure in program ULTIS by 12%. The appropriate value of the shape

$$\text{factor is } v = \frac{M_p}{M_E} = \frac{4162000}{3105024} = 1,34, \quad \text{which points to the}$$

safety regarding plastic vs. elastic bending.

2.5 Increase of the ship hull ultimate strength

Midship section optimization is commonly governed by a minimal weight requirement of longitudinal elements that satisfy the required elastic section modulus. The same procedure can be simply applied to the optimization of the ultimate strength using the one step method under the condition of satisfying the required plastic section modulus. However, in the ultimate strength iterative optimization procedure the yielding and buckling criteria have to be satisfied in the sequence of their occurrence during the iterative series of bending for given hull curvatures. In the presented example, the scantlings of the bottom, bilge and wing tanks that have first undergone yielding and/or buckling are gradually strengthened. First, the wing tank stiffeners that buckled under compressive loads during sagging were strengthened from the HP320x12 to the HP340x12 and the tank plating thickness increased from 16 to 17 mm. Concurrently with the increase in the section mass of 0.8 %, the ultimate strength of the hull increased by 1.13% for hogging conditions and by 2.24% for sagging conditions. Furthermore, the repeated strengthening to HP 370x13 and the shell plate thickening to 18 mm cause a 2% increase in the section mass followed by the hull ultimate strength increase of 1.91 % for hogging and of 3.6% for sagging conditions. Finally, the bottom and the bilge plating that collapse due to yielding under tension in the sagging condition are strengthened from 15 to 17 mm, retaining the wing tank bulkhead panel dimensions from previous step. Along with the overall 4% increase in the section mass, the total hull ultimate strength has increased by 2.56 % for hogging and by 6.4% for sagging conditions, Fig. 14.

3 Conclusion

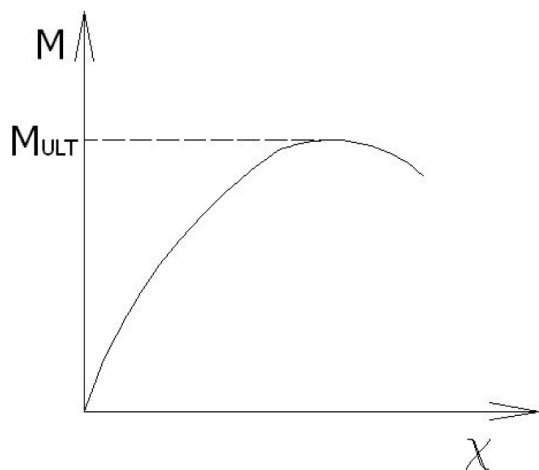
This short review in English presents the results of a bulk carrier case study using a self-made computer program implemented at the *Department of Naval Architecture and Ocean Engineering* in Zagreb denoted ULTIS. The program is based on the simplified method for ship hull ultimate strength evaluation and is primarily provided for educational and research purposes. Besides the normal ultimate strength analysis and possible parametric studies such as the effects of the hull material properties, the program's intermediate results can be used for the detection of the collapse sequence. It is shown how it is possible to increase the ship hull ultimate strength with an appropriate increase in the hull weight by effective reinforcement of the hull longitudinal elements that yield or buckle first during the collapse sequence under bending.

načina sloma, na različitim mjestima strukture, te mogućnost kombinacije uzajamnih utjecaja.

Pod slomom brodske trupa pojednostavljeno se smatra gubitak krutosti grede na savijanje, smik ili torziju, pri čemu se uzima da je modul trupa prizmatičan, a poprečna struktura okomita na uzdužnu, te da velika ravninska krutost opločenja onemogućuje znatnije uzdužne pomake spojeva. U okvirima ovih pretpostavki može se zamisliti da se opći slom može dogoditi samo u uzdužnom smjeru i to slomom dostatnoga broja uzdužnih elemenata brodske grede što uzrokuje velik gubitak krutosti na savijanje, smik ili torziju i/ili u poprečnoj ravnini, te se stvara mehanizam u poprečnom orebrenju što smanjuje potporu elementima uzdužne čvrstoće. Uvođenjem ograničenja da su svi poprečni presjeci dostatno čvrsti tako da svi uzdužni elementi dožive slom između dva poprečna presjeka, uzdužni i poprečni tipovi sloma postaju neovisni, te se mogu analizirati odvojeno što dodatno olakšava postupak.

Za uzdužni globalni slom brodske trupa promatranog kao idealna greda prevladavajuće opterećenje je moment savijanja M , a glavni je odziv savijanje grede, što se može izraziti putem zakrivljenosti grede χ , slika 2. Svi ostali uzdužni odzivi mogu se predstaviti korekcijama ili modifikacijama glavnog odziva.

Slika 2 Ovisnost momenta savijanja M o zakrivljenosti trupa χ
Figure 2 Bending moment capacity M versus hull curvature χ



Granični moment savijanja M_{ult} nastupa kad se dostatan broj elemenata unutar pojedinoga segmenta brodske trupa slomi bilo zbog vlačnog ili tlačnog opterećenja što se očituje u krajnjim vrijednostima na krivulji momenta savijanja ovisno o zakrivljenosti trupa, slika 2. Tijekom globalnoga sloma razni paneli nalaze se u različitim stupnjevima slamanja i unutar svakoga panela glavni utjecaj opterećenja je produženje ili skraćenje koje u gredi nastaje zbog nametnutog momenta savijanja kao rezultat zakrivljenosti trupa χ . Uzdužna se deformacija prije nastanka oštećenja određuje na osnovi teorije elastičnoga savijanja grede. Budući da je svaki panel u presjeku brodske trupa izložen procesu loma što pretpostavlja popuštanje, izvijanje ili oboje, odgovarajuća raspodjela naprezanja u presjeku kritičnoga segmenta vrlo je nelinearna. Čak i unutar svakoga panela odnos između srednjeg naprezanja i deformacije varira kako se opterećenje povećava. Svejedno, smatra se da raspored deformacija ostaje približno linearan sve do sloma grede. Prema tome, granične vrijednosti elemenata koje imaju najveću važnost u uzdužnom slomu su vrijednosti granične deformacije ϵ_{ULT} ukrijepljenih panela. Za svaki panel granična deformacija ϵ_{ULT} je veličina nametnute deformacije koja uzrokuje slom toga panela.

Za globalni slom u poprečnom smislu glavni utjecaj opterećenja je moment savijanja u nosačima koji čine poprečno orebrenje, posebno momenti na krajevima i sredini nosača. Taj efekt ima tri različite granične vrijednosti; kritični moment savijanja M_{CR} za savojno – torzijsko izvijanje, te momenti M_P i M_{FY} čije vrijednosti uzrokuju pojavu i razvoj plastičnog zgloba u nosaču, te plastični mehanizam u pojasu nosača, zbog popuštanja pojasa.

Posebno se za tankere koristi postupak jednoga koraka (HULS-1). Procedura se koristi za određivanje granične čvrstoće trupa u stanju progiba primjenom pojednostavljenoga proračuna zasnovanom na smanjenju čvrstoće savijanja trupa uzimajući u obzir izvijanje glavne palube [5], [6]. Granični moment savijanja brodske trupa određuje se kao $M_U = Z_{red} \sigma_{Yd}$, gdje je Z_{red} umanjeni moment otpora presjeka izračunat na osnovi učinkovite površine palube nakon izvijanja $A_{eff} = \frac{\sigma_U}{\sigma_{Yd}} A$, gdje je σ_U

granična čvrstoća ukrijepljenoga panela palube određena naprednim postupcima za analizu izvijanja, a σ_{Yd} je najmanje naprezanje popuštanja materijala dok je A stvarna površina presjeka glavne palube.

Napredna analiza izvijanja granične čvrstoće palube istodobno razmatra učine geometrijske i materijalne nelinearnosti, početnih deformacija i zaostalih naprezanja zbog zavarivanja. Izračunate vrijednosti predstavljaju maksimalna opterećenja palube uzimajući u obzir i preraspodjele opterećenja zbog elastičnog izvijanja opločenja među uzdužnjacima. U praksi se granična čvrstoća izvijanja izračunava uz pomoć računalne procedure PULS s ugrađenim mogućnostima opisa pomaka pri izvijanju i inkrementalnog numeričkog proračuna za rješavanje diferencijalne jednačine zasnovane na energetskom pristupu koja se može preuzeti s internetske adrese www.jtprules.com. U međuvremenu raste i zanimanje prema graničnoj čvrstoći brodske trupa u oštećenim stanjima, na primjer [7].

3. Praktični proračun granične čvrstoće brodske trupa

Klasifikacijska društva za sada se u praktičnim proračunima uglavnom oslanjaju na skupinu inkrementalno – iterativnih postu-

paka analize progresivnoga sloma brodskoga trupa s izračunatim krivuljama naprezanje – deformacija (eng. *load – end shortening curves*) uključenih u jedinstvene propise uzdužne čvrstoće IACS – a, [4] i to zbog njihove jednostavne primjene u numeričkim postupcima na elektroničkim računalima. Inkrementalni se dio postupka očituje u postupnom povećavanju zamišljene zakrivljenosti trupa broda promatranoga kao greda. Iterativnim se putem u svakom koraku postupka dobiva novi položaj neutralne osi presjeka trupa zbog možebitnih gubitaka čvrstoće pojedinih uzdužnih elemenata. Na kraju svakoga koraka računa se ukupni odzivni moment savijanja zbrajanjem doprinosa momentu savijanja unutarnjih sila svakoga pojedinog uzdužnog elementa u promatranom poprečnom presjeku. Rezultat postupka jest krivulja momenta savijanja M u ovisnosti o zakrivljenosti c , a granični moment predstavlja vršne vrijednosti krivulje, u slučaju progiba (negativni predznak) i pregiba (pozitivni predznak).

3.1. Krivulje naprezanje – deformacija

Sa šest vrsta krivulja koje predočavaju odnos naprezanja i deformacija $\sigma - \varepsilon$ zvanih „*load – end shortening curves*“ IACS [4], opisuju se ponašanja triju vrsta elemenata pri procesu sloma brodskoga trupa: kruti kutovi (eng. *hard corner*), poprečno ukrijepljena opločenja i uzdužno ukrijepljeni paneli, ovisno o tlačnom ili vlačnom opterećenju, odnosno o položaju elementa u odnosu na neutralnu os poprečnoga presjeka trupa broda.

3.1.1. Elasto – plastični slom

Krivulja elastično – plastičnog sloma opisuje ponašanje produljenih poprečno ili uzdužno ukrijepljenih panela. Na primjer, taj način sloma prati panel dna pri progibu ili panel palube pri pregibu. Po ovom se načinu slamaju i kruti spojevi kao što su spojevi bočnih nosača dvodna s opločenjem dna ili pokrova dvodna. Naprezanje je pozitivno za produljenje, a negativno za skraćenje.

Izraz koji općenito daje naprezanje elementa glasi: $\sigma = \phi \cdot R_{eh}$, [N/mm²] gdje je:

ϕ : granična funkcija definirana kako slijedi:

$$\phi = -1 \text{ za } \varepsilon < -1$$

$$\phi = \varepsilon \text{ za } -1 < \varepsilon < 1$$

$$\phi = 1 \text{ za } \varepsilon > 1$$

ε : relativna deformacija određuje se kako slijedi:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_Y}$$

ε_E : deformacija elementa:

$$\varepsilon_E = \chi_i \cdot z_i$$

ε_Y : deformacija popuštanja materijala:

$$\varepsilon_Y = \frac{R_{eh}}{E}$$

R_{eh} : naprezanje popuštanja materijala:

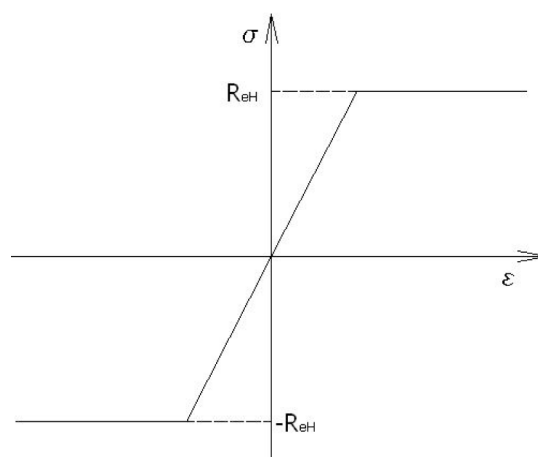
$$R_{eh} = 235 \text{ N/mm}^2 \text{ za B klasu čelika}$$

$$R_{eh} = 315 \text{ N/mm}^2 \text{ za AH32 klasu čelika}$$

$$R_{eh} = 355 \text{ N/mm}^2 \text{ za AH36 klasu čelika}$$

E : modul elastičnosti: $E = 206000 \text{ N/mm}^2$ za čelik

Krivulja naprezanje – deformacije za elasto – plastični slom prikazana je na slici 3.



Slika 3 Krivulje $\sigma - \varepsilon$ za elasto – plastični način sloma
Figure 3 Curves of $\sigma - \varepsilon$ relation for elasto – plastic collapse

3.1.2. Gredno – štapno izvijanje

Krivulja gredno – štapnog izvijanja opisuju slom skraćenih uzdužno ukrijepljenih panela. Na primjer, na taj se način slamaju panel palube pri progibu ili panel dna pri pregibu.

Izraz naprezanja za gredno – štapno izvijanje:

$$\sigma = \Phi \sigma_c \frac{A_s + 10 \cdot b_E \cdot t_p}{A_s + 10 \cdot s \cdot t_p}, \quad [\text{N/mm}^2], \text{ gdje je:}$$

Φ : granična funkcija, kako je definirana u točki 3.1.1.

σ_c : kritično naprezanje, [N/mm²]:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_E}{\varepsilon} \quad \text{za } \sigma_E \leq \frac{R_{eh}}{2} \varepsilon$$

$$\sigma_c = R_{eh} \left(1 - \frac{\Phi R_{eh} \varepsilon}{4 \sigma_E} \right) \quad \text{za } \sigma_E > \frac{R_{eh}}{2} \varepsilon$$

ε : relativna deformacija, kako je definirana u točki 3.1.1.

σ_E : Eulerovo naprezanje štapnog izvijanja, [N/mm²]:

$$\sigma_E = \pi^2 E \frac{I_E}{A_E l^2} 10^{-4}$$

I_E : moment tromosti običnih ukrepa, [cm⁴], s pridruženom širinom oplate b_{E1} ,

b_{E1} : širina pridružene oplate, [m]:

$$b_{E1} = \frac{s}{\beta_E} \quad \text{za } \beta_E > 1$$

$$b_{E1} = s \quad \text{za } \beta_E \leq 1$$

$$\beta_E = 10^3 \frac{s}{t_p} \sqrt{\frac{\varepsilon R_{eh}}{E}}$$

A_E : površina presjeka, [cm²], običnih ukrepa s pridruženom širinom oplate b_E .

A_s : površina presjeka struka uzdužnjaka, [cm²], s : razmak uzdužnjaka, [m], t_p : debljina pridružene oplate, [mm], b_E : širina pridružene oplate, [m]:

$$b_E = \left(\frac{2,25}{\beta_E} - \frac{1,25}{\beta_E^2} \right) s \quad \text{za } \beta_E > 1,25$$

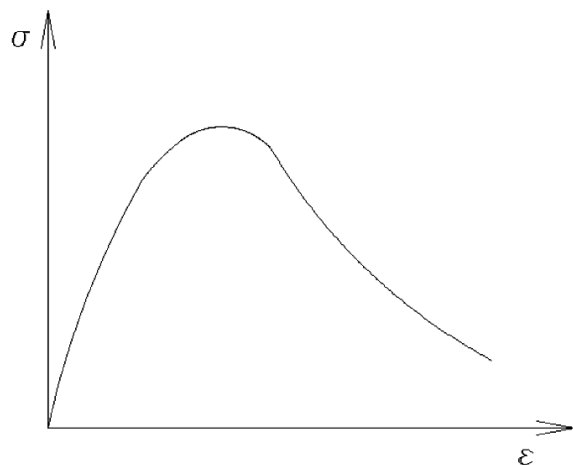
$$b_E = s \quad \text{za } \beta_E \leq 1,25$$

3.1.3. Torzijsko izvijanje

Po torzijskom se izvijanju također mogu slamati skraćeni uzdužno ukrepljeni paneli koji trpe lateralno – savojna opterećenja, slika 5.



Slika 4 Izgled krivulje $\sigma - \varepsilon$ za slom putem gredno – štapnog izvijanja
Figure 4 Load – end shortening curve $\sigma - \varepsilon$ for beam column buckling



Slika 5 Izgled krivulje $\sigma - \varepsilon$ za slom uslijed torzijskog izvijanja
Figure 5 Load – end shortening curve $\sigma - \varepsilon$ for torsional buckling

Izraz koji daje naprezanje elementa:

$$\sigma = \Phi \frac{A_s \cdot \sigma_c + 10 \cdot s \cdot t_p \cdot \sigma_{CP}}{A_s + 10 \cdot s \cdot t_p}, \quad [\text{N/mm}^2], \quad \text{gdje je:}$$

Φ : granična funkcija, kako je definirano ranije,
 σ_c : kritično naprezanje, $[\text{N/mm}^2]$:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_E}{\varepsilon} \quad \text{za } \sigma_E \leq \frac{R_{eH}}{2} \varepsilon$$

$$\sigma_c = R_{eH} \left(1 - \frac{\Phi \cdot R_{eH} \cdot \varepsilon}{4 \cdot \sigma_E} \right) \quad \text{za } \sigma_E > \frac{R_{eH}}{2} \varepsilon$$

σ_E : Eulerovo naprezanje torzijskog izvijanja, $[\text{N/mm}^2]$, ε : relativna deformacija, kako je definirana u točki 3.1.2.

σ_{CP} : naprezanje izvijanja sunosive širine opločenja, $[\text{N/mm}^2]$:

$$\sigma_{CP} = \left(\frac{2,25}{\beta_E} - \frac{1,25}{\beta_E^2} \right) R_{eH} \quad \text{za } \beta_E > 1,25$$

$$\sigma_{CP} = R_{eH} \quad \text{za } \beta_E \leq 1,25$$

β_E : koeficijent definiran u točki 3.1.2.

A_s : površina presjeka struka uzdužnjaka, $[\text{cm}^2]$, s : razmak uzdužnjaka, $[\text{m}]$, t_p : debljina pridružene oplata, $[\text{mm}]$.

3.1.4. Lokalno izvijanje struka složenih ukrepa s pojasom

Ovaj način slamanja prate skraćeni uzdužno ukrijepljeni paneli.

Izraz za naprezanje elementa:

$$\sigma = \Phi \cdot R_{eH} \frac{10^3 \cdot b_E \cdot t_p + h_W \cdot t_W + b_E \cdot t_p}{10^3 \cdot s \cdot t_p + h_W \cdot t_W + b_E \cdot t_p}, \quad [\text{N/mm}^2],$$

gdje je:

Φ : granična funkcija, kako je definirano ranije,

b_E : širina pridružene oplata, $[\text{m}]$, kako je definirana u točki 3.1.2.

h_W : visina struka, $[\text{mm}]$, t_W : debljina struka, $[\text{mm}]$, h_{WE} : efektivna visina struka, $[\text{mm}]$:

$$h_{WE} = \left(\frac{2,25}{\beta_W} - \frac{1,25}{\beta_W^2} \right) h_W \quad \text{za } \beta_W > 1,25$$

$$h_{WE} = h_W \quad \text{za } \beta_W \leq 1,25$$

β_E : koeficijent definiran ranije.

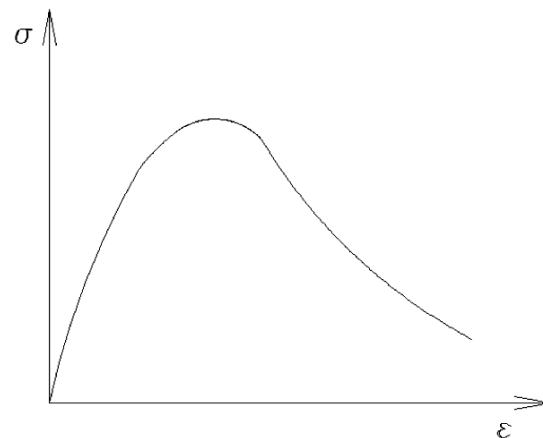
$$\beta_W = 10^3 \frac{h_W}{t_W} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot R_{eH}}{E}}$$

ε : relativna deformacija, kako je definirano ranije, s : razmak uzdužnjaka, $[\text{m}]$, t_p : debljina pridružene oplata, $[\text{mm}]$.

3.1.5. Lokalno izvijanje struka plosnih ukrepa

Slika 6 Krivulje $\sigma - \varepsilon$ za slom putem lokalnog izvijanja struka običnih ukrepa

Figure 6 Load – end shortening curve $\sigma - \varepsilon$ for web local buckling of ordinary stiffeners



Također ovaj način slamanja prate skraćeni uzdužno ukrijepljeni paneli, slika 6.

Izraz za naprezanje elementa:

$$\sigma = \Phi \frac{10 \cdot s \cdot t_p \cdot \sigma_{CP} + A_s \cdot \sigma_C}{A_s + 10 \cdot s \cdot t_p}, \quad [\text{N/mm}^2], \quad \text{gdje je:}$$

Φ : granična funkcija, kako je definirana u točki 3.1.1.

σ_{CP} : naprezanje izvijanja sunosive širine opločenja, $[\text{N/mm}^2]$, definirano ranije

σ_C : kritično naprezanje, $[\text{N/mm}^2]$:

$$\sigma_C = \frac{\sigma_E}{\varepsilon} \quad \text{za } \sigma_E \leq \frac{R_{eH}}{2} \varepsilon$$

$$\sigma_C = R_{eH} \left(1 - \frac{\Phi \cdot R_{eH} \cdot \varepsilon}{4 \cdot \sigma_E} \right) \quad \text{za } \sigma_E > \frac{R_{eH}}{2} \varepsilon$$

σ_E : Eulerovo lokalno naprezanje izvijanja, $[\text{N/mm}^2]$:

$$\sigma_E = 160000 \left(\frac{t_w}{h_w} \right)^2$$

ε : relativna deformacija, kako je definirano ranije

A_s : površina presjeka struka uzdužnjaka, $[\text{cm}^2]$, s : razmak uzdužnjaka, $[\text{m}]$, t_p : debljina pridružene oplate, $[\text{mm}]$.

3.1.6. Izvijanje opločenja

Ovaj izraz opisuje način slamanja putem izvijanja poprečno ukrepljene oplate:

$$\sigma = R_{eH} \left[\frac{s}{l} \left(\frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) + 0.1 \left(1 - \frac{s}{l} \right) \left(1 + \frac{1}{\beta_E^2} \right)^2 \right], \quad [\text{N/mm}^2]$$

gdje je: s : razmak rebara, $[\text{m}]$,

l : duljina ploče, $[\text{m}]$, β_E : koeficijent definiran ranije.

3.2. Inkrementalno-iterativni postupak

Narinuta zakrivljenost trupa c izaziva uzdužne deformacije svakoga strukturnog elementa trupa čije vrijednosti ovise o vertikalnom položaju elementa u odnosu na neutralnu os trupa, a naprezanje kojemu je podvrgnut pojedini element određuje se u nelinearnom elasto – plastičnom području pomoću krivulja „load – end shortening curves“ svakog elementa.

Za svaki narinuti korak povećanja zakrivljenosti trupa c, raspored naprezanja svih elemenata koji čine poprečni presjek trupa određuju položaj trenutačne neutralne osi budući da u pojedinom koraku odnos naprezanja i deformacije $\sigma - \varepsilon$ nije linearan. Nova neutralna os koja se odnosi na promatrani korak određuje se iterativnim putem, tako da se odredi ravnoteža između naprezanja koja djeluju u elementima strukture iznad i ispod neutralne linije.

Kad je određena neutralna os i prema tome raspored naprezanja, moment savijanja M_i oko nove neutralne osi, koji odgovara zakrivljenosti u promatranom i-tom koraku χ_i , dobije se zbrajanjem doprinosa momentu savijanja svakog elementa posebno.

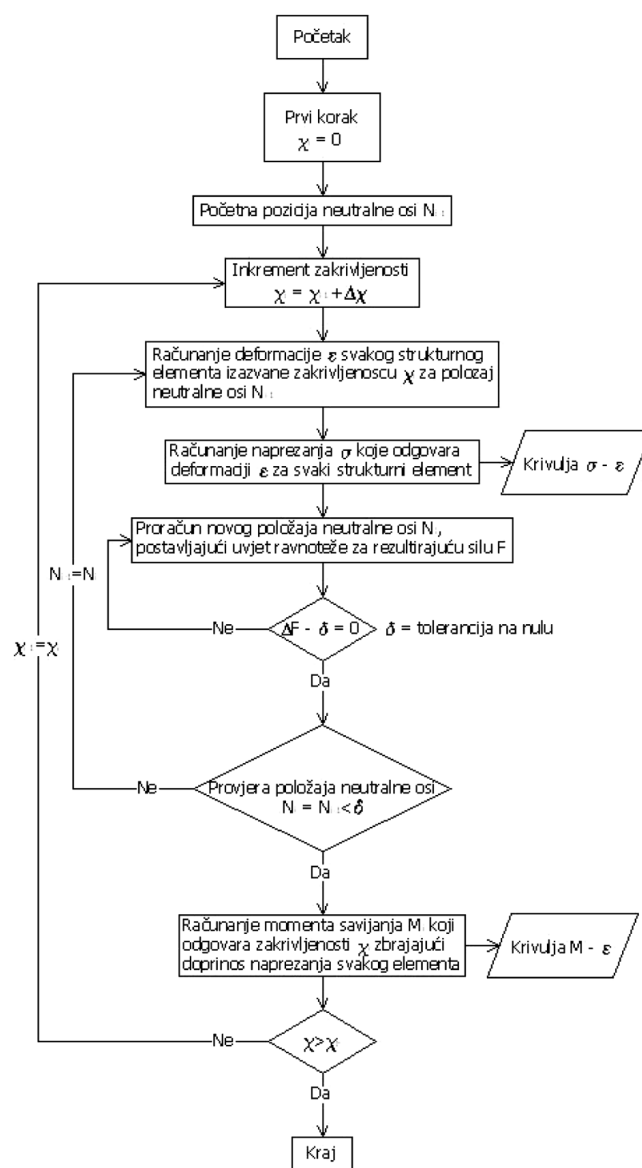
Inkrementalno – iterativni pristup proračunu graničnog momenta savijanja podoban je za numeričko rješavanje na električkim računalima i to prema sljedećim glavnim koracima:

1. Podjela poprečnoga presjeka na elemente ukrijepljenih panela
2. Određivanje neutralne osi za nedeformiranu strukturu
3. Definicija odnosa naprezanje – deformacija za sve elemente
4. Početak postupka određivanjem početne zakrivljenosti
5. Određivanje odgovarajućeg naprezanja za svaki element
6. Nalaženje nove neutralne osi postavljanjem uvjeta ravnoteže preko cijeloga presjeka
7. Račun ukupnog momenta savijanja zbrajanjem doprinosa svih elemenata momentu savijanja.

Početna se zakrivljenost dobije iz izraza: $\chi_0 = 0,01 \cdot \varepsilon_Y$ gdje je ε_Y deformacija popuštanja.

Slika 7 **Algoritam numeričkog rješenja proračuna graničnog momenta savijanja [2]**

Figure 7 **Flow chart for numerical solution of ultimate bending moment calculation [2]**



Deformacija popuštanja uzima u obzir gornju granicu razvlačenja i modul elastičnosti: $\epsilon_y = \frac{R_e^H}{E}$.

Ravnoteža naprezanja preko cijeloga poprečnog presjeka trupa postiže se tako da sila koju uzrokuje naprezanje u elementima iznad neutralne osi bude jednaka sili koju izaziva naprezanje u elementima ispod neutralne osi. Jednadžba uvjeta ravnoteže: $\sum A_i \sigma_i = \sum A_j \sigma_j$, [N], gdje je i indeks elemenata ispod, a j indeks elemenata iznad neutralne osi.

Kad je izračunata neutralna os za pojedini korak, zbrajaju se doprinosi naprezanja svih elemenata presjeka ukupnom momentu savijanja, prema izrazu:

$$M_U = \sum \sigma_{U_i} A_i (z_i - z_{NOi}), \quad [Nm]$$

Algoritam numeričkog rješenja prema ujednačenim preporukama IACS – a [4] prikazan je na slici 7. Iz slike su vidljivi inkrementalni i iterativni dijelovi procedure.

Za provedbu inkrementalno – iterativnog pristupa proračunu graničnog momenta savijanja napisan je računalni program UL-TIS [8] u programskom jeziku Visual Basic 5 [9]. Program se sastoji od četiri forme (prozora), te jednog modula. U prvoj se formi upisuju opći podaci o brodu (širina, visina trupa, te visina dvodna). Druga forma sadrži ulazne podatke o strukturi dna. Treća forma je istovjetna drugoj, samo što se u njoj upisuju strukturni elementi boka i palube. Četvrta forma služi za proračun granične čvrstoće, te daje izlazne podatke poput ukupnog momenta savijanja i naprezanja pojedinih panela.

Izlazni podaci prebacuju se u aplikaciju Excel gdje se naknadno obrađuju i pripremaju za grafičke prikaze.

4. Primjer proračuna granične čvrstoće brodske trupa

Razmatra se trup broda za rasute terete izgrađen u brodogradilištu *Brodosplit* 1999. godine kao novogradnja 409, prema pravilima klasifikacijskog društva *Lloyd's Register of Shipping*, te prema zahtjevima IACS-a.

Glavne značajke broda su sljedeće:

Klasa: \times 100 A1 Bulk Carrier Strengthened for Heavy Cargoes

Duljina preko svega: $L_{OA} = 187,6$ m

Duljina između okomica: $L_{pp} = 179,37$ m

Računska duljina: $L_{RL} = 177,95$ m

Širina: $B = 30,8$ m

Visina: $H = 15,45$ m

Projektirani gaz: $T = 10,1$ m

Koeficijent punoće: $C_B = 0,823$

Brzina na pokusnoj plovidbi: $v_{pp} = 14,5$ čv na gazu 10,1 m pri 6435 kW/127 o/min

Prema podacima iz samoga brodogradilišta za vrijednosti maksimalnih momenata savijanja na mirnoj vodi, te momenata savijanja na valovima prema propisima IACS-a, ukupni proračunski momenti savijanja iznose:

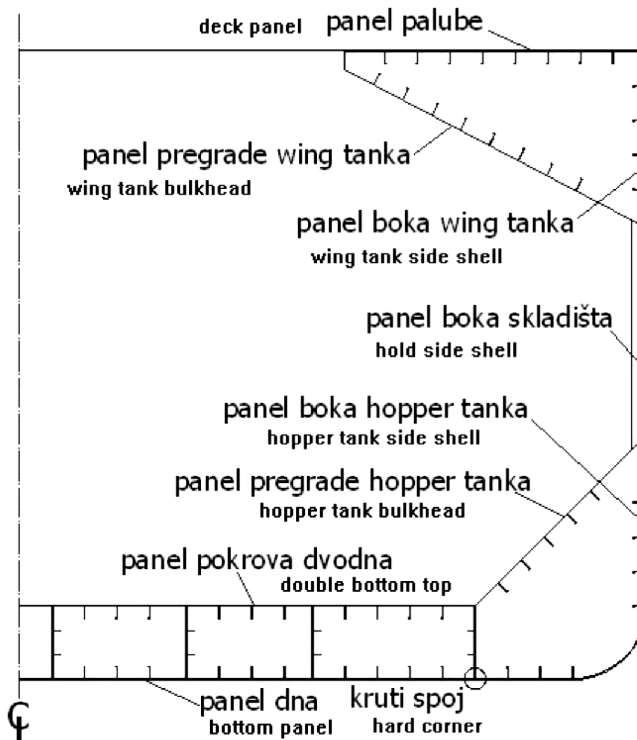
1. Pregibni moment savijanja:

$$M_{TH} = M_{SWH} + M_{WH} = 2348691 \text{ kNm}$$

2. Prohibni moment savijanja:

$$M_{TS} = M_{SWS} + M_{WS} = -2550596 \text{ kNm}$$

Poprečni presjek podijeljen je na ukrepljene panele i krute spojeve kako bi se pratilo ponašanje svakog od njih u procesu slamanja brodske trupa, slika 8.



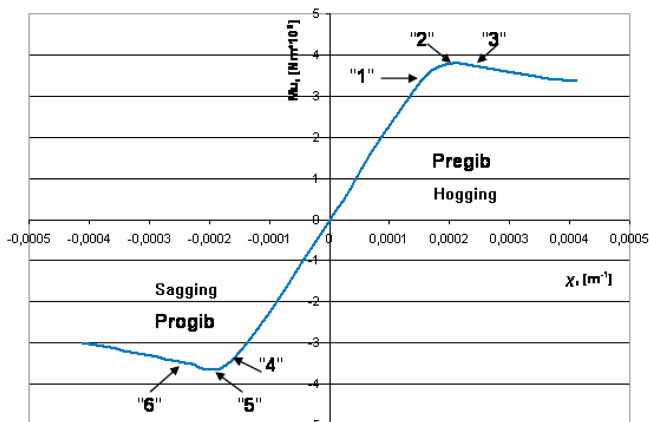
Slika 8 Podjela poprečnog presjeka na ukrepljene panele i krute spojeve

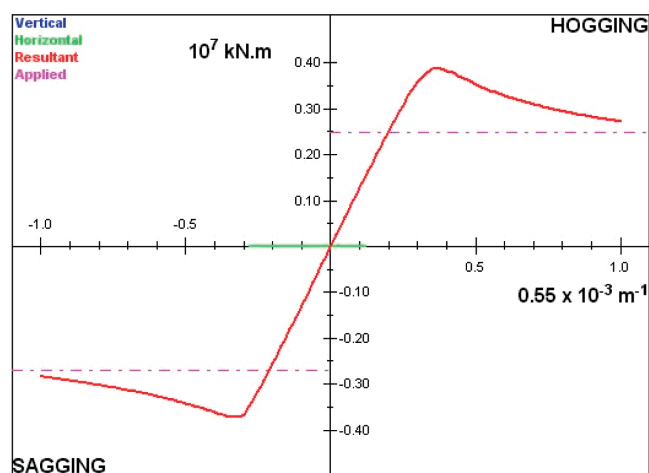
Figure 8 Transverse section subdivision onto stiffened panels and hard corners

Programom UL-TIS [8] dobiveni su rezultati graničnih momenata savijanja prikazani na slici 9.

Slika 9 Krivulja momenta savijanja i zakrivljenosti trupa za slučaj pregiba i progiba prema programu UL-TIS i karakteristične točke u slijedu slamanja trupa

Figure 9 Bending moments versus hull curvature for hogging and sagging conditions obtained by UL-TIS and the characteristic points





Slika 10 Krivulja momenta savijanja i zakrivljenosti trupa za pregib i progib prema programu MARS 2000
Figure 10 Bending moments versus hull curvature for hogging and sagging conditions obtained by MARS 2000

Program MARS 2000 [10] napisan je za proračun uzdužne čvrstoće, te ima implementiran kôd za proračun granične čvrstoće razvijen na *Tehničkom Sveučilištu* u Szczecinu u Poljskoj. U proračunu uzdužne čvrstoće uključena su pravila *Bureau Veritasa* iz 2003. godine. U programu MARS 2000 najprije je potrebno modelirati poprečni presjek glavnog rebra pojedinoga broda, sa svim elementima uzdužne čvrstoće, te s elementima poprečne krutosti kao što su koljena i rebra oplate boka skladišta u navedenom primjeru. Program ima mogućnost računanja uzdužne čvrstoće za više stanja krcanja, može uzimati u obzir utjecaj korozije, te projektnu smičnu silu na mirmoj vodi.

Usporedba rezultata programa ULTIS i MARS 2000 prikazana je u tablici 1.

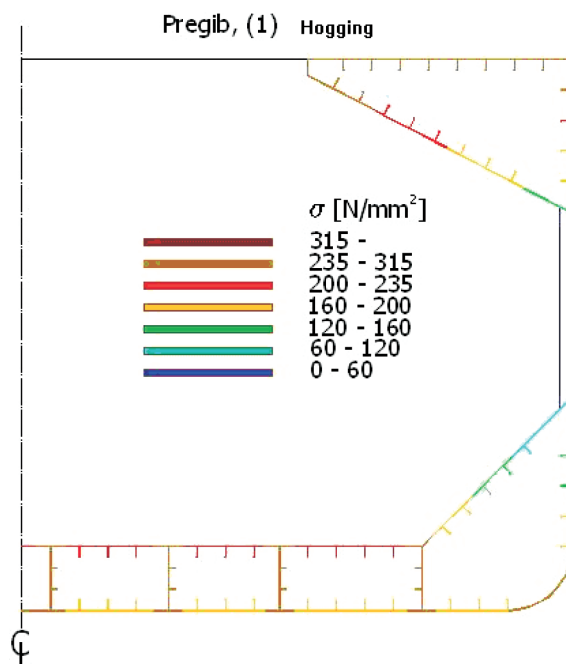
Tablica 1 Usporedba rezultata programa ULTIS i MARS 2000
Table 1 Result comparison between ULTIS and MARS 2000

	Početna neutralna os, [m]	Zahtijevani moment otpora elastičnosti, [m ³]	Granični moment savijanja u pregibu, [kNm]	Čimbenik sigurnosti u pregibu	Granični moment savijanja u progibu, [kNm]	Čimbenik sigurnosti u progibu
ULTIS	6,706	13,2129	3 789 523	1,613	-3 646 710	1,430
MARS 2000	6,745	13,1366	3 886 818	1,655	-3 730 394	1,524
Razlika, [%]	0,58	0,58	2,5	2,54	2,24	6,17

Male razlike u rezultatima primjera dobivenih programima ULTIS i MARS 2000 posljedica su načina modeliranja strukture i kriterija konvergencije proračunskih algoritama.

5. Analiza procesa sloma pomoću programa ULTIS

Raspoloživost međurezultata naprezanja pojedinih elemenata trupa u ovisnosti o zakrivljenosti u programu ULTIS omogućuje praćenje slijeda slamanja, kako pojedinih elemenata, tako i cijeloga poprečnog presjeka. Proces sloma prikazuje se stanjima elemenata trupa prije (točka 1), za vrijeme (točka 2) i nakon (točka 3) premašivanja graničnog momenta za pregib i analogno točke 4, 5 i 6 za progib, slika 9.



Slika 11 Raspored naprezanja kod dostizanja granične čvrstoće za pregib
Figure 11 Stress distribution by reaching the ultimate strength for hogging condition

1-pred-kritična-točka-pregib: Paluba građena od čelika povišene čvrstoće u stanju pregiba trpi vlačna naprezanja, po iznosima manjima od granice razvlačenja 315 N/mm², i ne dolazi do popuštanja palube. Međutim, nekoliko gornjih uzdužnjaka kose pregrade *wing* tanka od običnoga brodograđevnog čelika popuštaju dostigavši granicu razvlačenja od 235 N/mm², slika 11.

Naprezanja u strukturi dna od običnoga brodograđevnog čelika pod tlačnim opterećenjima u stanju pregiba ne dostižu granicu razvlačenja niti premašuju kritična naprezanja izvijanja.

2-kritična-točka-pregib: Sve više gornjih uzdužnjaka kose pregrade *wing* popušta dostigavši granicu razvlačenja od 235 N/mm² zbog čega se javljaju trajne plastične deformacije.

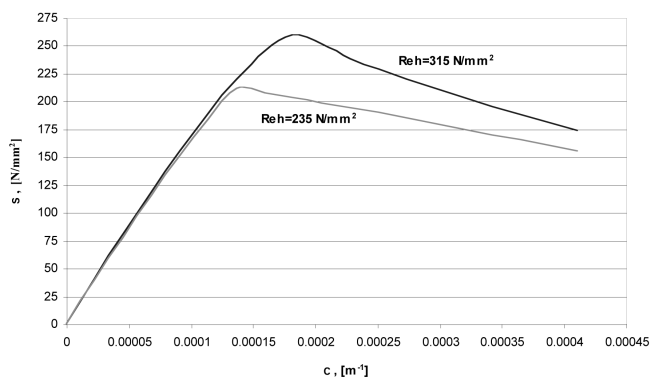
Naprezanja u strukturi dna premašuju dopuštena radna naprezanja od 175 N/mm², a potom i kritična naprezanja izvijanja u panelu dna, zbog čega se smanjuje srednje tlačno naprezanje u panelu dna. Istodobno, naprezanja u krutim spojevima (uzdužni bočni nosači dna) u stanju pregiba premašuju granicu razvlačenja od 235 N/mm² zbog čega se javljaju trajne plastične deformacije.

3-poslije-kritična-točka-pregib: Paluba premašuje granicu razvlačenja, zbog čega se javljaju trajne plastične deformacije.

Skoro svi uzdužnjaci kose pregrade i bočne stijenke *wing* tanka popuštaju dostigavši granicu razvlačenja.

Naprezanja u strukturi dna i pokrova dvodna uzrokuju dalje plastične deformacije zbog premašivanja granice razvlačenja.

4-pred-kritična-točka-progib: Paluba trpi tlačna naprezanja, po iznosima koji premašuju dopuštena radna naprezanja za čelik povišene čvrstoće od 225 N/mm² te dolazi do izvijanja panela palube. Uzdužnjaci kose pregrade i bočne stijenke *wing* tanka od običnoga brodograđevnog čelika u stanju su progiba skoro dostigli granicu razvlačenja od 235 N/mm², a kako su premašili dopuštena radna naprezanja u iznosu od 175 N/mm² počinju se izvijati zbog čega se smanjuje srednje tlačno naprezanje u panelu palube, slika 12.



Slika 12 Srednja naprezanja panela palube za slučaj progiba u ovisnosti o zakrivljenosti trupa za običan brodograđevni čelik i čelik povišene čvrstoće u strukturi palube
Figure 12 Deck panel mean stresses versus hull curvature during sagging for MS and HT steel

Naprezanja u strukturi dna (ne i pokrova dvodna i uzvoja) od običnoga brodograđevnog čelika pod vlačnim opterećenjima u stanju progiba premašuju granicu razvlačenja od 235 N/mm² zbog čega dolazi do elasto – plastičnog sloma.

Naprezanja u uzdužnjacima *wing* tanka veća su nego u uzdužnjacima *hopper* tanka. Razlog je tome sniženje neutralne osi zbog smanjenja nosivosti elemenata palube zbog njihovog izvijanja.

5-kritična-točka-progib: Panel palube i uzdužnjaci kose pregrade i bočne stijenke *wing* tanka trpe dalje izvijanje. Naprezanja u strukturi dna premašuju granicu razvlačenja od 235 N/mm² zbog čega dolazi do elasto – plastičnog sloma.

6-poslije-kritična-točka-progib: Naprezanja u strukturi palube dovode do daljeg izvijanja, a u strukturi dna i dalje se javljaju plastične deformacije.

5.1. Utjecaj materijala panela palube pri progibu

Tlačna opterećenja pri progibu u panelima palube od čelika povišene čvrstoće izazivaju izvijanje nakon premašivanja predviđenih radnih naprezanja u iznosu od 225 N/mm², i to znatno prije nego što dođe do popuštanja pri premašivanju granice razvlačenja od 315 N/mm².

Ekvivalentne dimenzije panela palube od običnoga brodograđevnog čelika određene su na osnovi čimbenika materijala $K=0,78$, kako slijedi:

$$\text{debljina oplate palube: } t_{p235} = \frac{t_{p315}}{\sqrt{K}} = \frac{26,5}{\sqrt{0,78}} = 30 \text{ mm},$$

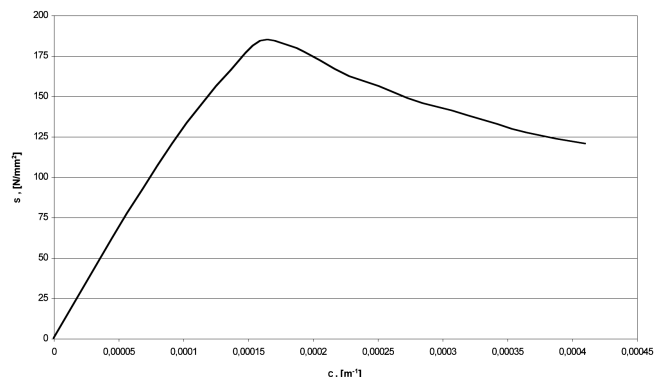
$$\text{moment otpora ukrepa: } W_{235} = \frac{W_{315}}{K} = \frac{1450}{0,78} = 1860 \text{ cm}^3 .$$

(HP 430x17, $W = 1950 \text{ cm}^3$).

Provjerom srednjih naprezanja panela palube programom ULTIS, slika 12, ustanovljeno je da će panel palube iz običnoga brodograđevnog čelika kojemu su u odgovarajućem iznosu povećane dimenzije ukrepa i debljina oplčenja prije popustiti, a da do izvijanja uopće neće doći, kao što je slučaj panela palube od čelika povišene čvrstoće. Kritično je naprezanje izvijanja panela primjenom običnoga brodograđevnog čelika zbog većih dimenzija oplčenja i ukrepljenja povećano iznad radnog naprezanja od 225 N/mm² kako je predviđeno za čelik povišene čvrstoće, dakle u još većem iznosu premašuje radno naprezanje predviđeno za obični brodograđevni čelik u iznosu od 175 N/mm². Pritom se ukupni granični moment savijanja smanjuje za 3 posto za slučaj pregiba, te za nešto više od 1 posto u slučaju progiba što je praktički zanemarivo.

5.2. Panel dna pri pregibu

Primjenom programa ULTIS pokazano je da se panel dna od običnoga brodograđevnog čelika pri tlačnim naprezanjima u slučaju pregiba prije izvijanja zbog premašivanja radnih naprezanja od 175 N/mm² nego što dođe do popuštanja premašivanjem granice tečenja od 235 N/mm², slika 13.



Slika 13 Naprezanja panela dna u slučaju pregiba u ovisnosti o zakrivljenosti trupa
Figure 13 Bottom panel stresses versus hull curvature for hogging condition

5.3. Metoda jednog koraka

Smatrajući da se pri savijanju odvija samo popuštanje, a ne i izvijanje uzdužnih elemenata trupa broda, moguće je gornju granicu granične čvrstoće savijanja M_U ocijeniti u jednom koraku na osnovi vertikalnog momenta otpora presjeka plastičnom savijanju M_p prema sljedećem izrazu:

$$M_U = M_p = R_e^h \cdot \frac{A}{2} \cdot d = R_e^h \cdot Z_p .$$

Čimbenik oblika v koji se za uobičajene izvedbe brodova kreće od $v=1,1$ do $v=1,5$ definira se kako slijedi:

$$v = \frac{M_p}{M_e} = \frac{R_e^h \cdot \frac{A}{2} \cdot d}{R_e^h \cdot \frac{I}{y_{\max}}} = \frac{R_e^h \cdot Z_p}{R_e^h \cdot Z_e} = \frac{Z_p}{Z_e}$$

gdje su

M_p : vertikalni moment otpora plastičnom savijanju

M_E : vertikalni moment otpora elastičnom savijanju

A : ukupna površina poprečnoga presjeka

I : moment tromosti presjeka oko horizontalne osi

y_{max} : najveća udaljenost presjeka od horizontalne neutralne osi

d : razmak težišta gornje i donje polovine površine poprečnoga presjeka

Z_p : vertikalni modul plastičnosti presjeka

Z_E : vertikalni modul elastičnosti presjeka.

Napomena: kod nas je uobičajeno veličine Z_c i Z_p nazivati momentom otpora presjeka. Prema stranim izvorima, momenti otpora presjeka savijanju M_c i M_p su veličine koje se dobiju kao umnožak gornje granice razvlačenja materijala R_c^h i veličina Z_c i Z_p . Ako se prihvati da se izvanjskim momentima uzdužnoga savijanja opiru momenti unutarnjih sila, tad je ova definicija momenta otpora savijanju fizikalno prihvatljiva. Veličine Z_c i Z_p se prema stranim izvorima nazivaju modulima elastičnosti, odnosno plastičnosti presjeka.

Vertikalni moment otpora presjeka plastičnom savijanju u razmatranom primjeru iznosi:

$$M_p = Z_p \cdot R_c^h \cdot 10^3 = 13,21287 \cdot 315 \cdot 10^3 = 4162000 \text{ kNm}$$

i veći je od rezultata programa ULTIS za 12 posto, a od rezultata programa MARS 2000 za 10 posto. Za ispitivani brod

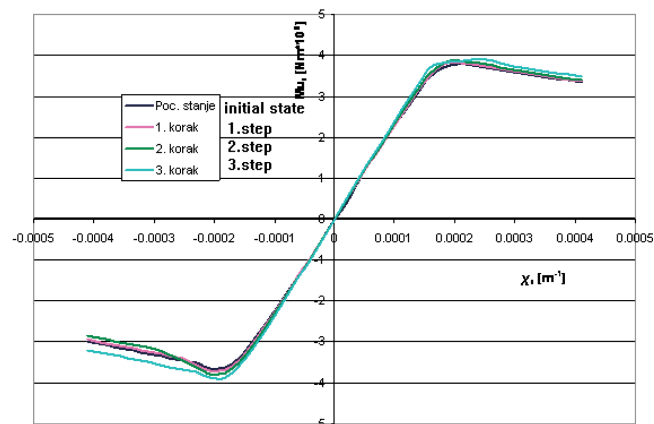
čimbenik oblika iznosi $v = \frac{M_p}{M_c} = \frac{4162000}{3105024} = 1,34$ što ukazuje

na sigurnost glede premašivanja momenta otpora plastičnom savijanju u odnosu na elastično savijanje.

5.4. Povećanje granične čvrstoće broskog trupa

Postupak optimizacije granične čvrstoće jednostavno se može primijeniti u „jednom koraku“ pod uvjetom da se zadovolji modul presjeka glede elasto-plastičnoga savijanja slično kao kod uzdužne čvrstoće kad se treba zadovoljiti modul presjeka glede elastičnoga savijanja. Međutim, u slučaju optimizacije granične uzdužne čvrstoće po iterativnom postupku moraju se primijeniti kriteriji popuštanja i izvijanja i to onim slijedom kojim se ostvaruju tijekom iterativnoga slijeda savijanja za određenu zakrivljenost. U sljedećem su prikazu predočeni rezultati ispitivanja slijeda sloma konstrukcije, pri čemu su postupno pojačavani oplata uzvoja, dna i donje pregrade *wing* tanka koji su najprije doživjeli popuštanja i/ili izvijanja.

U prvom su koraku uzdužnjaci kose pregrade *wing* tanka, koji se pod tlačnim opterećenjima pri savijanju u progibu prvi izvijaju, pojačani sa profila HP 320x12 na profil HP 340x12, a debljina opločenja povećana je sa 16 na 17 mm. Uz povećanje jedinične mase poprečnoga presjeka od 0,8 posto, dobiveno je povećanje granične čvrstoće od 1,13 posto za pregib i 2,24 posto za progib. Nadalje su uzdužnjaci pojačani na profil HP 370 x 13, a debljina je povećana na 18 mm. Jedinična masa poprečnoga presjeka povećana je za 2 posto. Granična čvrstoća u pregibu povećana je za 1,91 posto, a u progibu za 3,6 posto. U zadnjem su koraku debljine oplata dna i uzvoja koji popuštaju pod vlačnim opterećenjima pri savijanju u progibu povećane sa 15 na 17 mm, a dimenzije panela kose pregrade *wing* tanka ostavljene su iz prethodnoga koraka. Uz 4 postotno povećanje jedinične mase poprečnoga presjeka, granična čvrstoća u pregibu je, u odnosu na početno stanje, povećana za 2,56 posto, a u progibu za 6,4 posto. Krivulje momenata savijanja i zakrivljenosti svih navedenih koraka prikazane su na slici 14.



Slika 14 Krivulje momenata savijanja i zakrivljenosti za sukcesivne korake optimizacije

Figure 14 Bending moments versus hull curvature for successive optimization steps

6. Zaključak

Problem granične čvrstoće već je prije razmatran teorijski, a projektanti konstrukcije brodova tek ga odnedavno počinju uzimati u obzir i provjeravati u praksi, a na osnovi preporuka klasifikacijskih društava. S jedne se strane neprestano radi na istraživanju i razvoju teorijski složenijih postupaka koji međutim iziskuju puno priprema i računalnih mogućnosti dok se s druge strane u praksu uvode pojednostavljeni postupci prilagođeni projektantskim potrebama. Oba pristupa uzajamno se dopunjuju novim spoznajama zajedno s istraživanjima u naravi i povećanjima računalnih mogućnosti. U ovom je pregledu prikazan računalni program za pojednostavljeni postupak provjere granične čvrstoće broskog trupa predviđen za edukaciju i istraživanje. Prednost koji takav vlastiti program pruža sastoji se i u mogućnosti da se međurezultati proračuna koji u drugim programima obično nisu dostupni iskoriste za dodatne analize kao što je u ovom pregledu prikazan slijed slamanja strukture trupa. Praćenjem slijeda slamanja trupa moguće je učinkovito pojačavanje redom onih elemenata koji najprije popuštaju ili se izvijaju i tako povećati graničnu čvrstoću broskog trupa tamo gdje je najslabiji uz odgovarajuće povećanje mase trupa. Pregledom istraživanja i razvoja postupaka za određivanje i provjeru granične čvrstoće broskog trupa koji je dijelom i ovdje prikazan, može se potvrditi dojam o velikom zanimanju brodograđevne inženjerske zajednice prema sigurnosti konstrukcije broda, što se očekuje i u budućnosti.

Literatura

- [1] HUGHES, O. F.: Ship Structural Design, SNAME, New Jersey, 1988.
- [2] ISSC: Ultimate Hull Girder Strength, Proceedings of the 14th International Ship and Offshore Structure Congress, Tokyo, 2001.
- [3] ISSC: Ultimate Hull Girder Strength, Proceedings of the 16th International Ship and Offshore Structure Congress, Southampton, 2006.
- [4] IACS: Joint Bulker Project
- [5] ABS, DNV, LLOYD'S REGISTER – Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, 2006.
- [6] GUEDES SOARES, C., PARUNOV, J., Structural Reliability of Suezmax oil tanker designed according to new joint tanker project rules, Proceedings of the 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2006, ASME, NY, paper no 92650.
- [7] ŽIHA, K., PEDIŠIĆ, M.: Sposobnost preživljavanja broda pri oštećivanju trupa, BRODOGRADNJA, Vol. 48, No. 1, 2000.
- [8] TUŠEK, B.: Izrada računalnoga programa za proračun granične čvrstoće broskog trupa, Diplomski rad, FSB Zagreb, 2005.
- [9] HERGERT, D.: Visual Basic 5 Bible, IDG Books WorldWide, Foster City, 1998.
- [10] Bureau Veritas: MARS 2000, Paris, 2003.