UDC 001.12.007.62:681.518.6

*Kalman ŽIHA**
*Pero PEKAS***

Utjecaji mjestimičnog hrđanja na savojnu čvrstoću brodskih ukrepljenih panela

Stručni rad

U radu se razmatraju tipični ravni ukrepljeni paneli brodske konstrukcije izloženi mjestimičnom hrđanju. Savojna čvrstoća panela provjerava se postupkom konačnih elemenata u elastičnom području ponašanja materijala pod statičkim vanjskim savojnim opterećenjem, primjenom dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih modela panela. Mjestimično hrđanje panela se modelira površinom i dubinom hrđanja i oplate i ukrepljenja, za razne smjerove širenja hrđanja neovisno o vremenu izloženosti. Prikazane su promjene deformacija i naprezanja pri savijanju brodskih panela za razne oblike hrđanja u prirodnom obliku i bezdimenzionalnim dijagramima za inženjerske potrebe. Pokazalo se da dubina hrđe panela utječe više od površine i smjera širenja i da je promjena deformacija i naprezanja kod savijanja panela gotovo jednoliko razmjerna zahvaćenosti hrđom.

Ključne riječi: *brodske konstrukcije, ukrepljeni paneli, hrđanje, postupak konačnih elemenata.*

Effect of local corrosion on ship stiffened panel bending strength

Professional paper

The article considers typical flat stiffened panels in ship constructions, exposed to local corrosion. The panel bending strength is checked by finite element methods for elastic material under static bending loading, using two and three dimensional models. The local corrosion of plating and stiffening is modeled by corroded area and depth for various corrosion spread directions, independently of the exposure period. Changes in deformations and stresses of ship panels under bending for different shapes of corrosion are presented in natural form and by dimensionless diagrams for engineering purposes. It becomes apparent that the panel corrosion depth under bending is more critical than the area and direction of spread. Moreover, the changes of panel deformations and stresses under bending are almost linear with respect to corrosion rate.

Key words: *ship construction, stiffened panels, corrosion, finite element method.*

Adresa autora (Authors' addresses):
* *Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu,* Zagreb, Ivana Lučića 5.
** *BERNARDIĆ BRODOGRADNJA* d.o.o., Sisak, Staro Pračno II. odvojak desno 5

Primljeno (Received): 10. 11. 2000.
Prihvaćeno (Accepted): 05. 01. 2001.

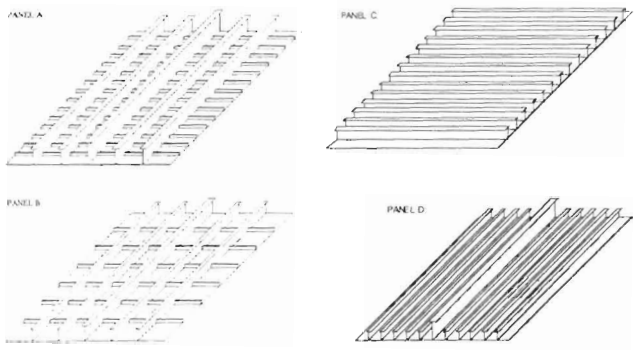
Uvod

Ukrepljeni paneli čine veliki dio brodske konstrukcije i važan su dio u cijeni trupa broda. Čvrstoća panela je presudno važna za sigurnost broda i pomno se provjerava u konstrukciji brodskog trupa. Na pomorskim brodovima su paneli izloženi nepovoljnim utjecajima mora, što se najviše odražava na njihovo mjestimično trošenje i slabljenje uslijed hrđanja. Do mjestimičnog trošenja i slabljenja ukrepljenih panela dolazi i zbog djelovanja tereta i drugih mehaničkih oštećenja. Sve su to razlozi za neprestano provjeravanje stanja istrošenosti brodske konstrukcije tijekom cijeloga radnog vijeka broda.

U naravnim uvjetima korištenja broda su mjesta i oblici mjestimičnog hrđanja nepredvidljivi i nepravilni i bitno ovise o vremenima i načinima izloženosti. Točno modeliranje mjestimičnog hrđanja radi provjere čvrstoće u praksi je rijetko izvedivo i odvija se od slučaja do slučaja, što iziskuje veliki trud i vrijeme. U ovom su radu odabrana četiri tipična, statički opterećena ravna ukrepljena panela [1], i na njima je ispitano kako mjestimično hrđanje djeluje na njihovu savojnu čvrstoću. Proračuni čvrstoće su provedeni programom za konačne elemente u brodogradnji *Ship Design Assessment (SDA) Lloyd's Registra* [2], a rezultati su prikazani u prirodnom obliku i bezdimenzionalnim dijagramima.

Tipovi, opterećenja i načini oštećenja ukrepljenih panela

Mnogobrojnim ispitivanjima u većem broju brodogradilišta došlo se do najčešćih tipova ravnih ukrepljenih panela [1], sl.1. Paneli brodske konstrukcije općenito sudjeluju u uzdužnoj, poprečnoj i lokalnoj čvrstoći brodskog trupa. Paneli prema svom položaju preuzimaju statička i dinamička, tlačna i vlačna opterećenja u vlastitoj ravnini, te lateralna opterećenja okomito na svoju ravninu, moguće i istovremeno. Paneli su podložni popuštanju i izvijanju oplate, ukrepljenja ili cijelog panela. Strukturna jednakovrijednost razmatranih panela je zamišljena na osnovi jednakih udjela ravninskih i lateralnih opterećenja, pod pretpostavkom da su izloženi jednakim opterećenjima uslijed uzdužnog savijanja brodskog trupa i da su lokalno opterećeni zamišljenim jednolikim tlakom po cijeloj svojoj površini, koji odgovara stupcu od tri metra vode [1]. Promjene u uzdužnoj čvrstoći broda zbog mjestimičnog hrđanja, mogu se ocijeniti gubicima geometrijskih svojstava poprečnog presjeka panela i brodskog trupa u cjelini

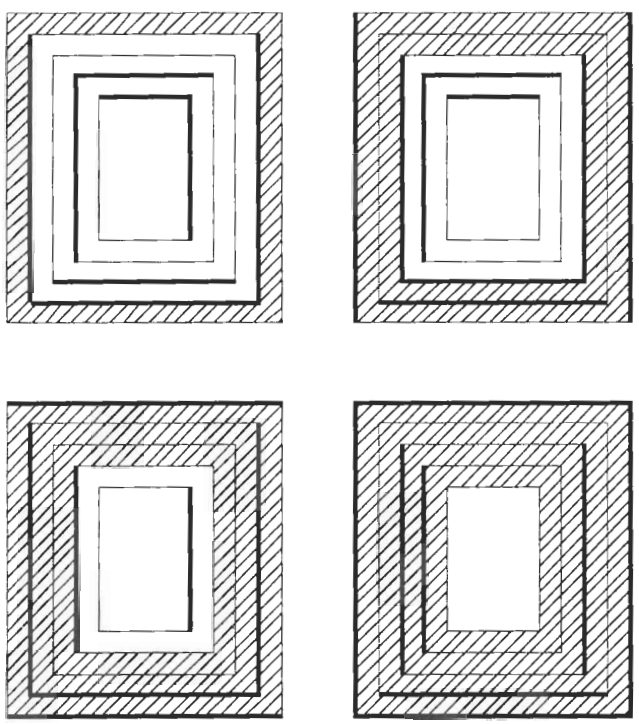


Slika 1. **Tipovi ukrepljenih panela**
Figure 1. **Types of stiffened panels**

[3], što se u ovom radu neće posebno razmatrati. Utjecaji mjestimičnog hrđanja panela na naprezanja u ravnini i time izazvane promjene u čvrstoći izvijanja zahtijevaju dodatna istraživanja koja nisu provedena u radu. Utjecaj hrđom zahvaćenih spojeva i detalja ukrepljenih panela izloženih promjenljivim opterećenjima na zamornu izdržljivost, može se ocijeniti parametarskom analizom [4].

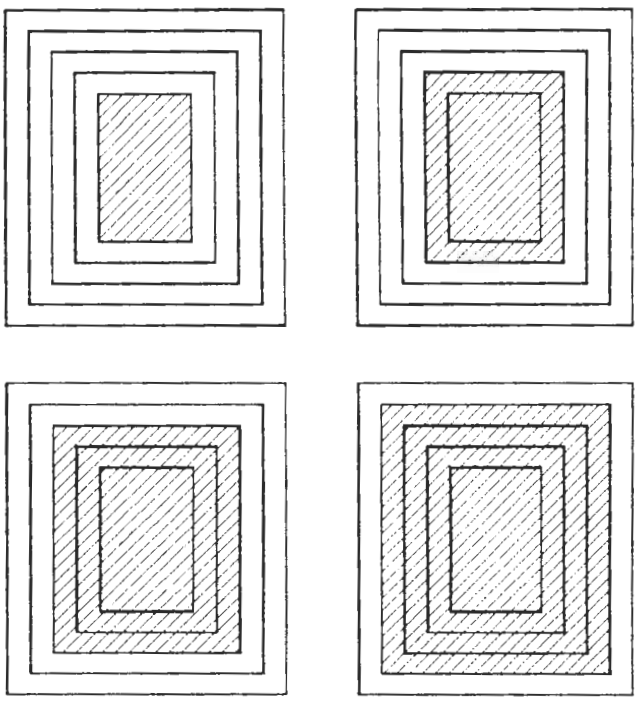
Opis mjestimične zahvaćenosti hrđanjem

U radu se pretpostavljaju oblici i veličine površine zahvaćene hrđanjem i smjerovi širenja prema rubovima ili prema središtu panela, a sve to za razne dubine hrđanja, neovisno o vremenima izloženosti.



Slika 2. **Širenje hrđe od rubova prema središtu**
Figure 2. **Corrosion spread from edges towards center**

S obzirom na pravokutni oblik razmatranih panela, te na pravokutne konačne elemente primijenjene u modeliranju, površine zahvaćene hrđanjem oplate i ukrepljenja istovremeno, izražene u postocima ukupne površine panela, modelirane su s četiri pravokutna okvirna oblika za smjer širenja hrđanja od rubova prema sredini, sl. 2. i s četiri pravokutna puna oblika za smjer širenja hrđanja od sredine prema rubovima sl. 3.



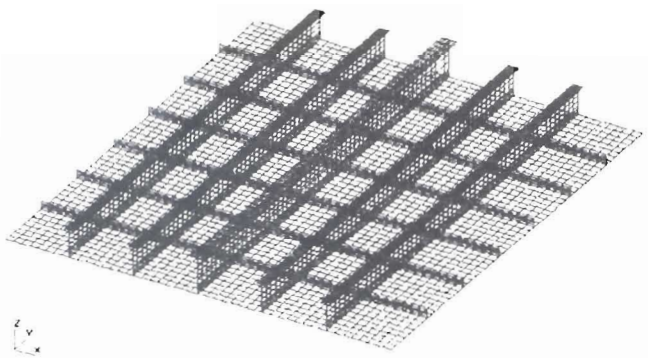
Slika 3. **Širenje hrđe od središta prema rubovima**
Figure 3. **Corrosion spread from center towards edges**

Uobičajeni pristup predmnijeva jednoliki gubitak materijala zbog hrđanja u vremenu [5]. Novija ispitivanja pokazuju da se dubine hrđanja u vremenu do dvije ili čak pet godina izloženosti, odvijaju nelinearno, a da bi poslije toga vremena bile manje-više jednolike [6]. Problemi hrđanja u naravi pokazuju veliko rasipanje rezultata opažanja zbog čega se primjenjuju statistički postupci u njihovom predočavanju [7]. Dodaci izmjerama zbog hrđanja za elemente konstrukcije u pojedinim dijelovima brodskog trupa prema pravilima klasifikacijskih zavoda kreću se od 1 do 3 *mm*, ovisno o izloženosti i projektiranim izmjerama novoga gradevnog dijela [8]. Ne postoje sustavni podaci o mjestimičnom hrđanju brodskih gradevnih dijelova.

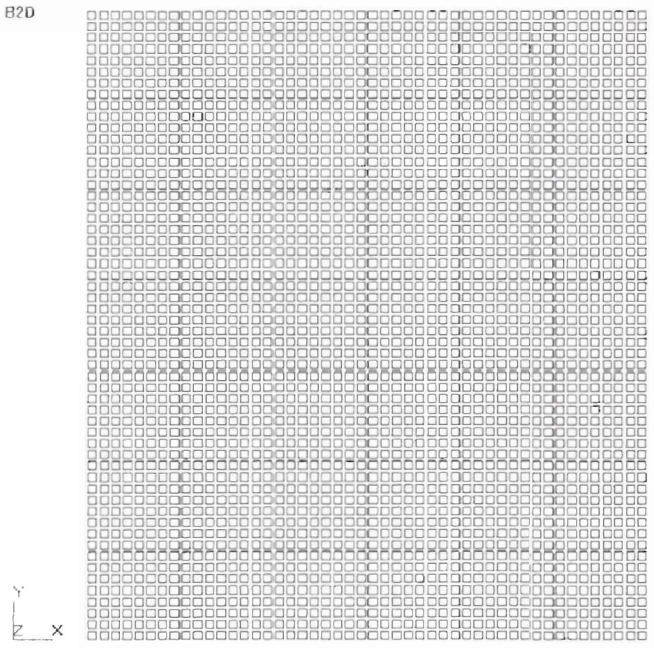
Za sve oblike površina zahvaćenih hrđanjem u radu se razmatraju sve dimenzije svih zahvaćenih gradevnih dijelova oplate i ukrepljenja istovremeno, umanjene za niz odabranih vrijednosti dubina hrđanja [9].

Deformacije i naprezanja u prirodnom obliku

Svi su paneli modelirani plošnim konačnim elementima [10] i ispitani na 2-D i 3-D modelima panela [10]. 3-D žičani model panela B sa sl. 1., prikazan je na sl. 4., a 2-D model s razmacima medu elementima istog panela, prikazan je na sl. 5.



Slika 4. **3-D žičani model panela B**
Figure 4. **3-D wire model of panel B**

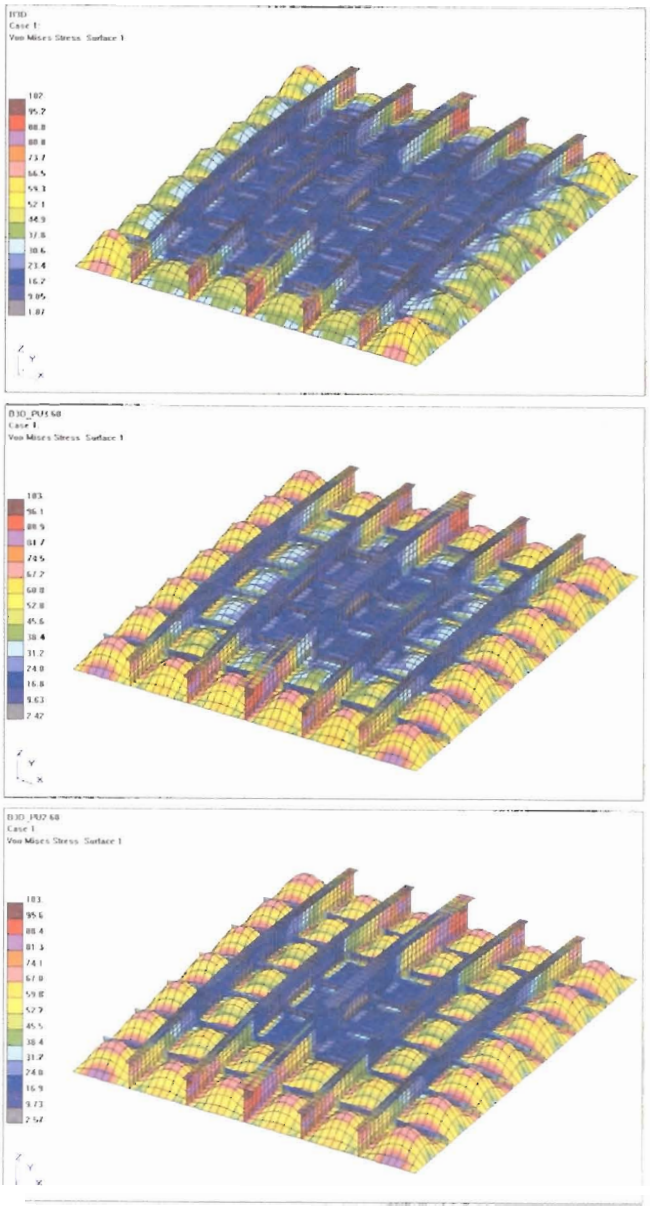


Slika 5. **2-D model panela B s razmacima**
Figure 5. **2-D model of panel B with shrinkage**

Budući da hrđanje na jednom mjestu izaziva promjene pomaka i naprezanja na cijelom panelu, na svakom je panelu odabrano više zanimljivih točaka, bilo zbog velikih deformacija, velikih naprezanja ili nekog posebnog razloga, u kojima se prate promjene deformacija i naprezanja uslijed mjestimičnog hrđanja. Inženjerski je opravdano pratiti promjene na mjestima najvećih deformacija ili naprezanja.

Primarni odzivi panela smatraju se konstantnima i mogu se zamisliti kao naprezanja i deformacije u ravnini uslijed globalnih uzdužnih opterećenja brodskog trupa, koji se ne razmatraju u ovom radu. Lokalni odzivi na lateralna opterećenja okomita na ravnine panela se u ovom radu promatraju kao sekundarni, kad se odnose na cijeli panel s opločenjem, ukrepama i nosačima, i kao tercijarni, kad se odnose na glatka polja limova između ukrepa i nosača.

Na nizu prikaza predočene su sukcesivne promjene deformacija s velikim faktorom uvećanja deformacija i naprezanja u konzistentnim bojama, panela tipa B s potpuno upetim rubovima u prirodnom obliku, za smjer širenja hrđe od rubova prema središtu, sl. 6. i za širenje hrđe u dubinu, sl. 7.

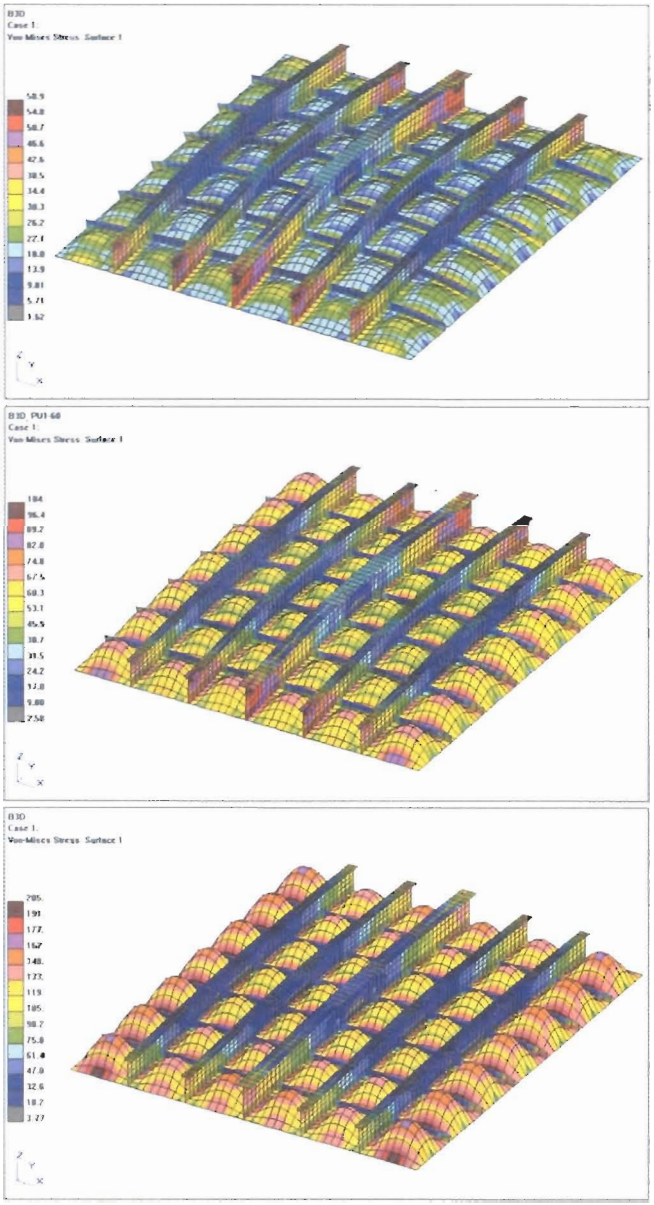


Slika 6. **Prirodne deformacije i naprezanja za panel B upetih rubova, širenje hrđe oplate i ukrepa od rubova prema središtu**
Figure 6. **Natural presentation of deformations and stresses for panel B with clamped edges, plating and stiffening corrosion spread from edges towards center**

Utjecaj površine i dubine hrđe

Svi su provedeni proračuni sažeti na bezdimenzionalnim dijagramima koji prikazuju promjenu savojne čvrstoće ukrepljenih panela ovisno o zahvaćenoj površini i dubini hrđe i oplate i ukrepljenja.

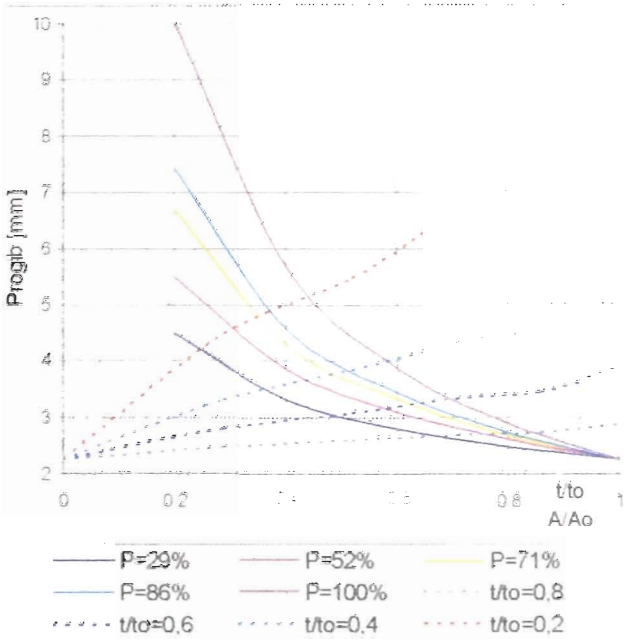
Promjena savojne čvrstoće prikazuje se na ordinatnoj osi relativno prema najvećem ustanovljenom naprezanju u odabranom mjestu promatranja. Dubina hrđanja se prikazuje na apscisnoj osi kao preostala izmjera građevnih dijelova oplate i



Slika 7. **Prirodne deformacije i naprezanja za panel B upetih rubova, širenje hrđe oplate i ukrepa po dubini**

Figure 7. **Natural presentation of deformations and stresses for panel B with clamped edges, plating and stiffening corrosion spread in depth**

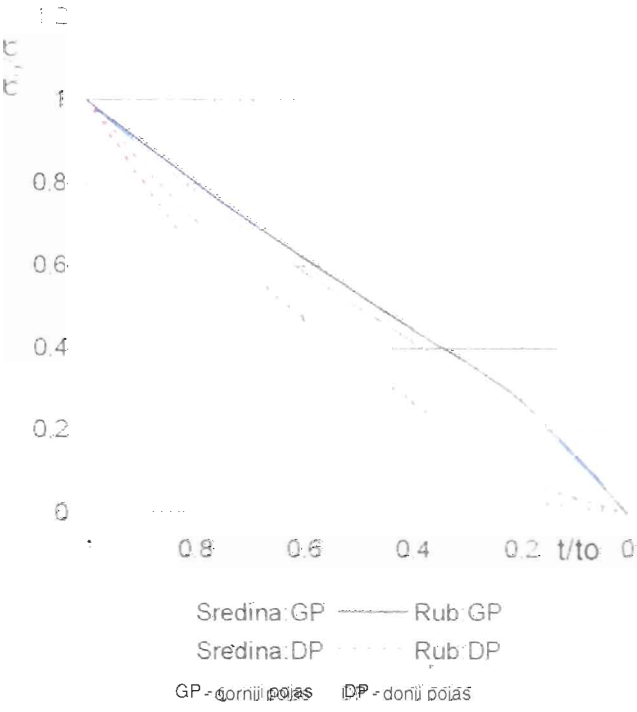
ukrepljenja nakon izuzimanja hrđom zahvaćenog materijala prema ukupnoj izmjeri nezahrđalog panela. Površina zahvaćena hrđom se prikazuje parametarski za odabrane smjerove širenja, i to u odnosu na cijelu površinu nezahrđalog panela. Dijagram utjecaja dubine i površine hrđe na vlastite maksimalne progibe nosača panela B s potpuno upetim rubovima prikazan je na sl. 8. Dijagram utjecaja promatranog mjesta na promjene naprezanja panela B s potpuno upetim rubovima prikazan je na sl. 9. Dijagram utjecaja načina širenja hrđe (prema središtu ili prema rubovima) 2D - model MKE prikazan je na sl. 10. Dijagram utjecaja dubine hrđe po cijeloj površini svih panela na vlastita maksimalna naprezanja prikazan je na sl. 11.



to - početna debljina oplate
t - debljina oplate nakon korozije
Ao - površina panela
A - površina panela zahvaćena korozijom

Slika 8. **Dijagram utjecaja dubine i površine hrđe oplate i ukrepa na maksimalne progibe nosača panela B upetih rubova**

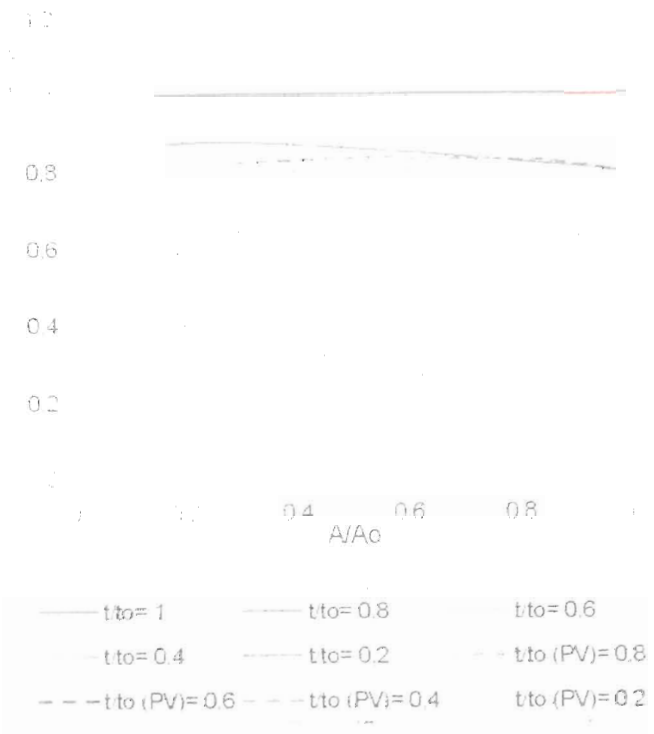
Figure 8. **Diagram of the effects of plating and stiffening corrosion depth and spread on maximal girder deflections for panel B with clamped edges**



GP - gornji pojas DP - donji pojas

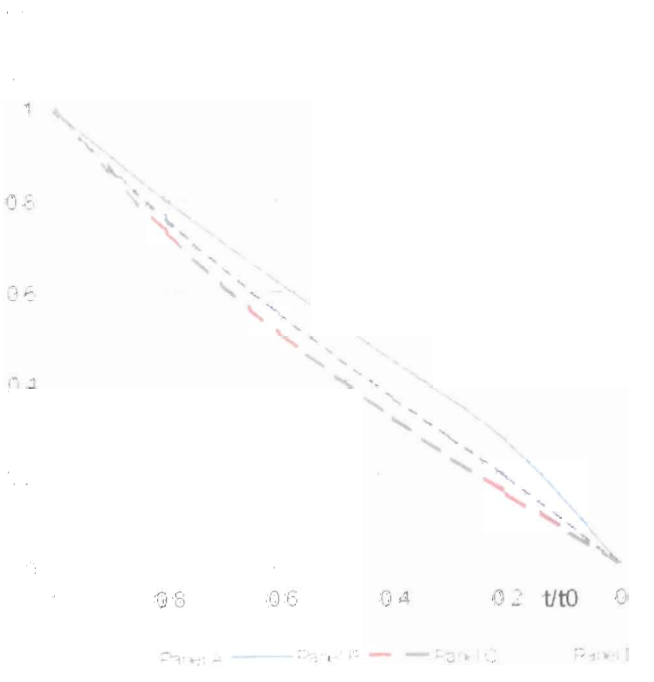
Slika 9. **Dijagram utjecaja promatranog mjesta na oblik promjene naprezanja uslijed hrđanja oplate i ukrepa panela B upetih rubova**

Figure 9. **Diagram of the effects of the considered position on stresses due to plating and stiffening corrosion for panel B with clamped edges**



Slika 10. Dijagram utjecaja načina širenja hrđe (prema središtu ili prema rubovima) 2-D - model MKE

Figure 10. Diagram of the effects of direction of corrosion spread for panel B 2-D FEM model



Slika 11. Dijagram utjecaja dubine hrđe po cijeloj površini svih panela na vlastita maksimalna naprezanja

Figure 11. Diagram of the effects of overall corrosion depth on maximal stresses for panel B

Promjene naprezanja uslijed hrđanja lateralno opterećenih ukrepljenih panela nisu jako ovisne o promatranom položaju, sl. 9. Na primjer, za gornji su pojas nosača vrlo slične promjene naprezanja uslijed hrđanja na rubu ili na sredini panela. Utjecaj smjera širenja hrđe, a tako ni površine zahvaćene hrđom, nije velik, sl. 10. Dubina hrđe je najutjecajnija veličina na čvrstoću panela sl. 11.

Zaključak

Ukupno je provedeno 295 proračuna, od toga 219 2-D modela i 76 proračuna 3-D modela za sve panele [9].

Usporedba 2-D i 3-D modela je pokazala da je za istraživačke ciljeve ovoga rada potrebno koristiti se 3-D modelom, radi bolje preglednosti i točnijih rezultata.

Za točno modeliranje oblika mjestimične zahvaćenosti hrđom u naravi postupkom konačnih elemenata potrebno je mnogo truda i vremena. Za olakšavanje ovog problema mogli bi se primijeniti posebni predprocesori koji bi oblike površine i dubine hrđanja ustanovljene mjerenjima u naravi mogli automatski "utiskivati" u postojeće mreže elemenata nezahrđalih panela. Međutim, rezultati dobiveni u ovom radu pokazuju da se u razumnim inženjerskim granicama mogu primijeniti pretpostavke o gotovo linearnom djelovanju dubine hrđe i o malom djelovanju površine hrđe na promjene deformacija i naprezanja u lateralno opterećenim ukrepljenim panelima.

Rad na ovom izvješću omogućen je sustručljivošću Ureda iz Rijeke i Središta *Lloyd's Registera* iz Londona koji su iskazali povjerenje ustupanjem programa SDA za istraživačke i nastavne ciljeve na Zavodu za brodogradnju i pomorsku tehniku, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Literatura

[1] HATZIDAKIS, N., BERNITSAS, M. M.: Comparative design of orthogonally stiffened plates for production and structural integrity. Journal of Ship Production, Vol. 10., No. 3., Aug. 1994.

[2] Lloyd's Register. Structural Design Assessment procedure. Direct calculations - guidance notes. London, 1996.

[3] ŽIHA, K., MAVRIĆ, I., MAKSIMOVIĆ, S.: Utjecaj tolerancí gradevnih dijelova na masu osnovnih sklopova brodskih konstrukcija. Zbornik radova XIII. Simpozija SORTA'98, Zadar, Vol. 1, 1998., pp. 321-328.

[4] ŽIHA, K., IVANČEVIĆ, V.: Primjena procedure za analizu zamora, Brodogradnja, God. 46, Br. 3., 1998., str. 271-277

[5] GUEDES SOARES, C., GARBATOV, Y.: Reliability of maintained, corrosion protected plates subjected to non-linear corrosion and compressive loads. Marine Structures, 12(1999).

[6] SOUTHWELL, C. R., BULTMAN, J. D., HUMMER JR. C. W.: Estimating of service life of steel in seawater. Seawater corrosion handbook, ed. Schumacher, M., New Jersey, Noyes Data Corporation, 1979.

[7] MANSOUR, A. E., JAN, H. Y., ZIGELMAN, C. I., CHEN, Y. N., HARDING, S. J.: Implementation of reliability methods to marine structures. SNAME Annual Meeting, New York, 1984.

[8] Hrvatski registar brodova, Pravila za tehnički nadzor pomorskih brodova, Dio 2, Trup, Split, 1999.

[9] PEKAS, P.: Utjecaj lokalne korozije na čvrstoću ukrepljenih panela, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2000.

[10] SENJANOVIĆ, I.: Metoda konačnih elemenata u analizi brodskih konstrukcija, FSB, Zagreb, 1998.