

*Kalman Žiha, Janoš Kodvanj, Boris Ljubenković, Ante Bakić*  
*Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb*

## **ZNAČAJ EKSPERIMENTALNE MEHANIKE U BRODOGRADNJI**

### **Sažetak**

U ovom se izvješću sažimaju naponi u utvrđivanju svojstava materijala ugrađenih u brodski trup u suradnji Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku, Zavoda za brodogradnju i pomorsku tehniku i hrvatskih brodogradilišta. Svojstva materijala u brodogradnji se obično definiraju u fazi preliminarnog projektiranja i kao takva se koriste kroz cijeli proces projektiranja, konstruiranja, proizvodnje, gradnje i službe broda. Nova iskustva pak pokazuju da neka svojstva materijala mogu značajno odstupati od nazivnih vrijednosti. Uzorci materijala su odabrani tijekom izgradnje u brodogradilištu i podvrgavani vlačnom pokusu, pokusima zamora i udarne žilavosti. Izvješće razmatra utjecaje svojstava ugrađenih materijala s obzirom na zahtijevana svojstva prema Pravilima na lokalnu, globalnu i graničnu čvrstoću broda. Zaključak podržava ideju izvješća da brodovi zaslužuju individualizirano utvrđivanje čvrstoće kakva stvarno jest na osnovi sustavno prikupljenih i posebno ispitanih ugrađenih materijala.

*Ključne riječi: eksperimentalna mehanika, brodograđevni proces*

## **IMPORTANCE OF EXPERIMENTAL MECHANICS IN SHIPBUILDING**

### **Summary**

This report summarizes the efforts in testing of material built in the ship's hull which are performed in cooperation among the Laboratory for experimental mechanics, the Department of naval architecture and ocean engineering of the Faculty of mechanical engineering and naval architecture in Zagreb and Croatian shipyards. Recent experiences and observations indicated that some material properties might significantly deviate of the nominal or declared values.. Material specimens are selected during the ship production process in the shipyard and submitted to tensile testing, fatigue tests and Charpy impact tests in the laboratory. The report considers the influences of particular 'in-built' material properties with respect to the Rule requirements on local, global and ultimate strength of ships. The conclusion supports the stirring idea of this report that a ship deserves individualized assessment of the "as-built" ship hull strength based on the systematically collected and measured 'in-built' material properties.

*Key words: experimental mechanics, shipbuilding process*

## 1. Uvod

Imajući u vidu moguće dugoročne koristi u razvoju svojih djelatnosti istraživanja i obrazovanja na području konstrukcije i gradnje brodova, Zavod za brodogradnju i pomorsku tehniku podržao je 2000. godine kao zainteresirani korisnik nabavku kapitalne opreme u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu iz sredstava Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske.

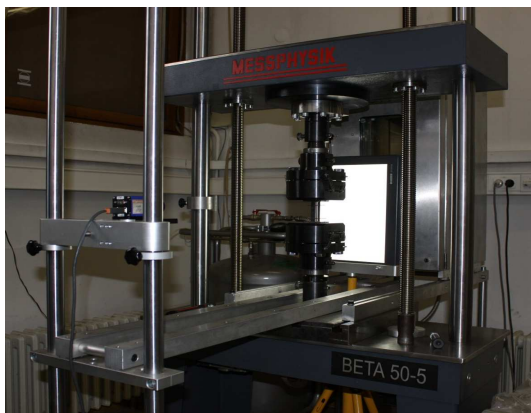
## 2. Opis mjerne opreme u Laboratorij za eksperimentalnu mehaniku

U okviru projekta popunjavanja kapitalne opreme Laboratorija nabavljeni su u dvije etape uređaji za statička i dinamička ispitivanja.

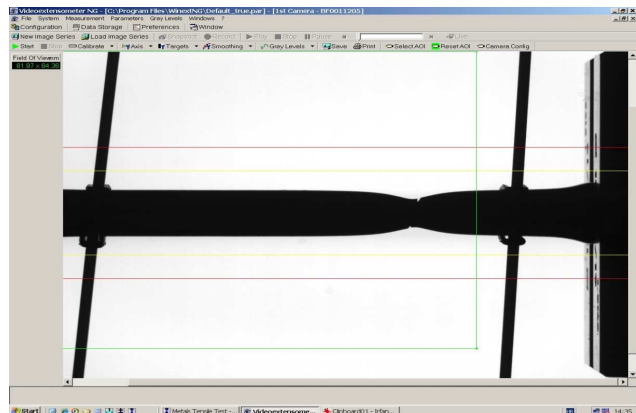
### 2.1. Ispitni uređaji i oprema za statičke pokuse

Najprije je 2002. nabavljena statička kidalica Messphysik Beta 50-5 s maksimalnom silom opterećenja od 50kN prikazana slikom 1. Ispitivanje se provodi brzinom od 5 mm/min. Pomak čeljusti kidalice se ostvaruje pomoću dva vretena. U programskom sučelju kidalice podešavaju se i unose svi potrebni parametri poput brzine ispitivanja, poprečnog presjeka epruvete, vrste ispitivanja te temperature u prostoriji tokom ispitivanja.

Tijekom jedno-osnih vlačnih pokusa na materijalima, naprezanja se dobivaju namještanjem mjernog uzorka u čeljusti i opterećivanjem pomoću kalibrirane mjerne doze. Deformacije materijala se mjere videoekstenzometrom koji pomoću kamere "prati" deformacije epruvete. Na epruvete se postavljaju markeri prije nego se podvrgnu mjerenju. Na slici 2 prikazan je lom epruvete u programskom sučelju videoekstenzometra.



**Slika 1.** Statička kidalica Messphysik Beta 50-5  
**Fig. 1** The testing machine Messphysik Beta 50-5



**Slika 2.** Sučelje videoekstenzometra – prikaz loma epruvete  
**Fig. 2** Videoeextensometer interface - crack of the specimen

### 2.2. Ispitni uređaji i oprema za dinamičke pokuse

Za potrebe dinamičkih pokusa 2007. godine nabavljena je servohidraulička kidalica W+B LFV 50-HH sa upravljačkom jedinicom DIGWIN 2000 švicarskog proizvođača Walter Bai prikazana slikom 3. Prije ispitivanja u upravljački program umaralice Dion-Pro unose se parametri ispitivanja, odnosno oblik i visina opterećenja te frekvencija. Osim visine opterećenja i frekvencije u upravljačkom sučelju se prati i pomak gornje čeljusti umaralice. Pomak gornje čeljusti moguće prati se na dva načina:

- Kod opterećivanja konstantnom amplitudom prate se vršne vrijednosti pomaka;
- Kod opterećivanja varijabilnom amplitudom mjerenje pomaka se zadaje u nekom vremenskom intervalu u kojem će program zapisivati podatke o pomaku.

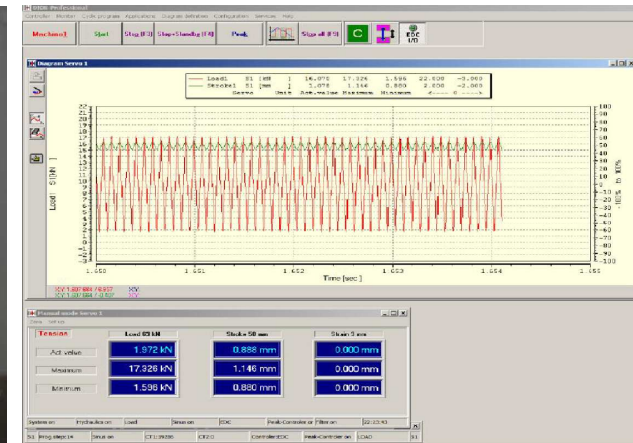


**Slika 3.** Servohidraulička umaralica LFV 50-HH s upravljačkom jedinicom  
**Fig. 3** The hydraulic testing machine LFV 50-HH with control unit

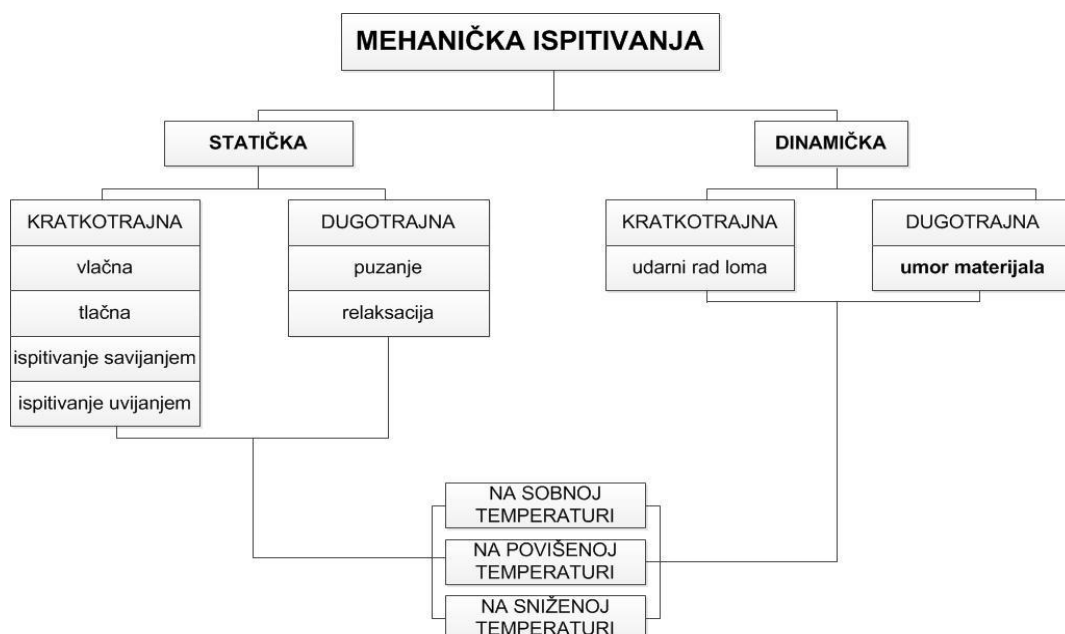
Na slici 4a prikazana je epruveta za vrijeme dinamičkog ispitivanja a na 4b je prikazano sučelje upravljačkog programa umaralice Dion – Pro. Crvena linija prikazuje amplitudu opterećenja dok zelena bilježi pomak gornje čeljusti umaralice.



**Slika 4a.** Epruveta u čeljusti  
**Fig. 4a** Specimen in the crosshead



**Slika 4b.** Sučelje upravljačkog programa umaralice  
**Fig. 4b** The testing machine control unit interface



**Slika 5.** Shema mehaničkih ispitivanja materijala  
**Fig. 5** Scheme of the material mechanical testings

### 3. Ispitivanje mehaničkih svojstava građevnih materijala broda u naravi

Pristigla oprema, nakon instaliranja i uhodavanja, omogućuje raznovrsne pokuse na materijalima od posebnog interesa u brodogradnji. Opća sistematizacija mehaničkih ispitivanja je prikazana slikom 5 [1].

#### 3.1. Utjecaj svojstava ugrađenih materijal na čvrstoću broskog trupa

Većina osnovnih svojstava broda se određuje u pred-projektnoj i projektnoj fazi. Neka se od tih svojstava međutim mijenjaju u raznim fazama životnog vijeka broda, tijekom projektiranja, gradnje, kontrole kvalitete i službe. Neka se osnovna projektna svojstva broda, kao što su geometrija, nosivost, stabilitet i brzina, provjeravaju i utvrđuju se kao svojstva izgrađenog broda. Međutim, to najčešće nije slučaj s vrlo bitnim svojstvima ugrađenih materijala, te čvrstoćom i pouzdanošću izgrađenog broda koji se u cijelom životnom vijeku broda tretiraju kao projektne veličine jednake nominalnim svojstvima kako se propisuje za minimalne uvjete prihvatljivosti od proizvođača.

Određivanje lokalne i globalne čvrstoća broskog trupa, kao i uzdužne i granične čvrstoće te procjena životnog vijeka prema pravilima i direktnim proračunima su normalno dio projektne procedure da se osigura dovoljna čvrstoća broskog trupa i rijetko se provjeravaju nakon isporuke gotovih brodova.

Provjera svojstava ugrađenih materijala, čvrstoće i pouzdanosti broskog trupa se iznimno traži u slučajevima uočenih strukturnih problema na pokusnim vožnjama ili u službi.

Na osnovi mnogih opažanja svojstva ugrađenih materijala se mogu znatno razlikovati od projektnih vrijednosti a posljedica toga je razlika između čvrstoće izgrađenih brodova u odnosu na njihovu projektiranu čvrstoću. Ova pojava može utjecati na uvjete korištenja i nadzora. Prema pravilima registra/IMO brod se prema odredjenim modelima nadzora kontrolira u eksploataciji, među nekima: CSH-continuous survey hull svake godine drugih 20% broda, SS survey special svake 4-5 godine cijeli brod prema specifikaciji poslova, tu je i dokovanje svakih cca 2 godine i odredjeni svakogodišnji pregledi određenih detalja (nepropusnost poklopaca, vijak, obrastanje) i tome sl. U tim je saznanjima poticaj za slijedeća ispitivanja.

#### 3.2. Prikupljanje uzoraka

Uzorci za ispitivanje se uzimaju u brodogradilištu za pojedini brod i moraju biti odrezani na određenim mjestima te se mogu uzeti samo nakon završetka svih mehaničkih i/ili toplinskih obrada proizvoda prije isporuke. Najpogodniji način je uzimanje uzoraka od ostataka limova i profila u vrijeme rezanja kad su još označeni prema svojstvima i proizvodnim specifikacijama. Kod pripreme uzoraka se preporuča rezanje vodenim mlazom kako bi se izbjegao unos topline koja bi utjecala na strukturu materijala, a time i na mehanička svojstva.

#### 3.3. Provođenje pokusa na brodograđevnim materijalima

Do sada je u suradnji Katedre za gradnju plovnih objekata i Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku za potrebe brodogradnje izvršeno više ispitivanja, a to su:

- statička ispitivanja austenitnog čelika na niskim temperaturama, vidjeti SORTA 2010,
- statička ispitivanja brodograđevnog čelika za tanker,
- statička ispitivanja brodograđevnog čelika za brod za prijevoz rasutog tereta,
- dinamička ispitivanja brodograđevnog čelika za tanker.

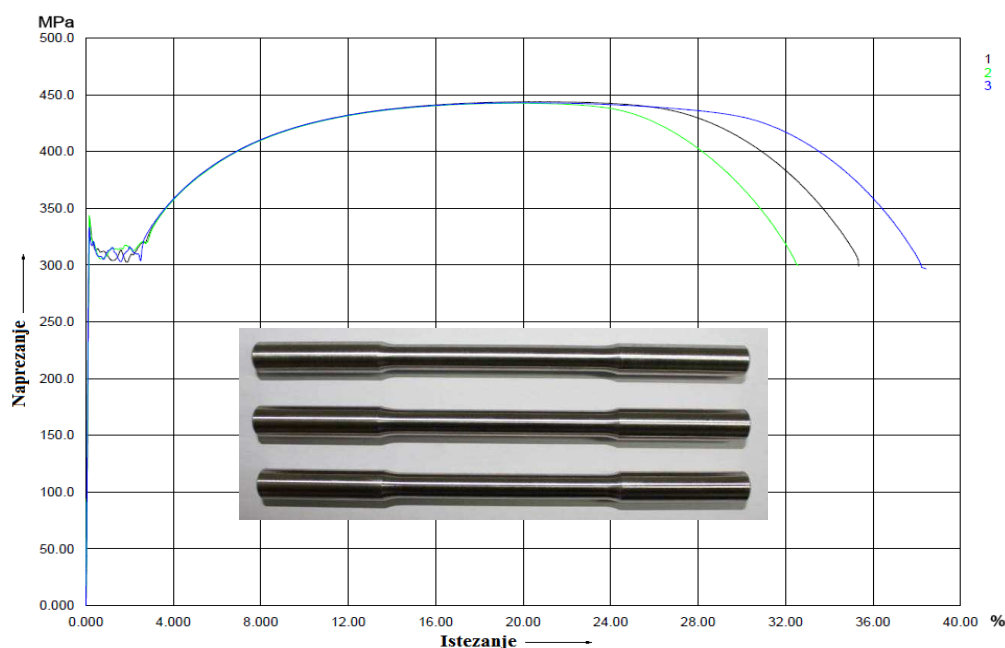
Trenutno se pripremaju i provode još i dodatna ispitivanja brodograđevnog čelika na slijedećim područjima od interesa:

- dinamička ispitivanja brodograđevnog čelika u uvjetima starenja strukture u suradnji sa Instituto Superior Tecnico iz Lisabona
- statička i dinamička ispitivanja brodograđevnog čelika povišene čvrstoće

U nastavku će se prikazati rezultati statičkih i dinamičkih ispitivanja brodograđevnog čelika. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava austenitnog nehrđajućeg čelika su prikazani na Simpoziju SORTA2010 [8] i u zborniku međunarodnog skupa [10].

### 3.4. Rezultati ispitivanja statičkih mehaničkih svojstava brodograđevnog čelika za tanker

U ovom poglavlju će se prikazati rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava običnog brodograđevnog čelika (MS-A) koji se koristio za gradnju tankera [4]. Epruvete su izrezane od dijela lima koji se nalazi u teretnom prostoru broda. Ispitivanja su napravljena za tri epruvete, a rezultati su prikazani dijagramom 'naprezanje-istezanje' na slici 6 i u tablici 1.



Slika 6. Dijagram 'naprezanje – istezanje' za brodograđevni čelik - tanker

Fig. 6 'Stress-Strain' diagram for shipbuilding steel – tanker

Tablica 1. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava brodograđevnog čelika - tanker

Table 1 The results of the shipbuilding steel mechanical characteristics testing - tanker

	epruvete	d	So	E	R <sub>e</sub> <sup>h</sup>	Rm	ε <sub>m</sub>	ε <sub>u</sub>
		[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
1.	E-1	8,12	51,86	215	320	444	20,79	35,34
2.	E-2	8,00	50,35	206	320	442	19,92	32,57
3.	E-3	8,12	51,82	201	318	443	19,86	38,43
	Sr.vrijednost	8,08	51,34	207	319	443	20,19	35,45

Dijagrami 'naprezanje-istezanje' se dobro preklapaju u cijelom području, a značajnija odstupanja se pojavljuju u plastičnom području prije pucanja epruvete. Ta odstupanja su posljedica strukturnih nesavršenosti prilikom izrade epruvete, te položaja nastanka pukotine.

Srednja vrijednosti granice razvlačenja od 319MPa u je ovom slučaju veća za 35% od nominalne vrijednosti granice razvlačenja za obični brodograđevni čelik od 235MPa.

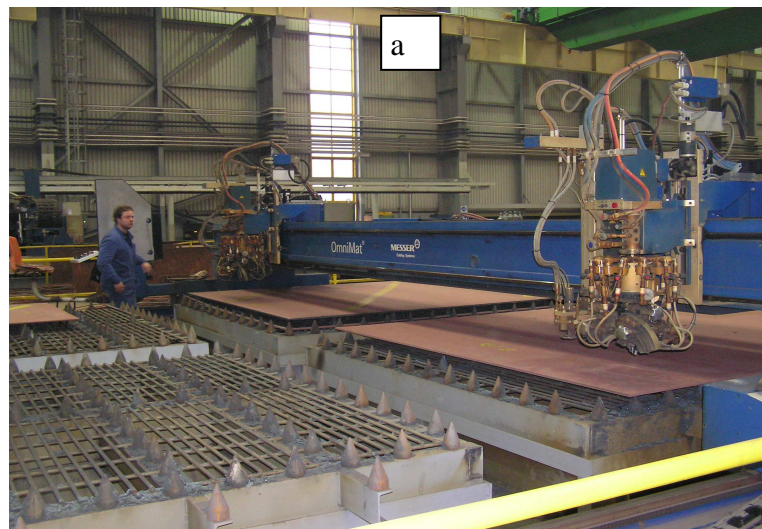


### 3.5. Rezultati ispitivanja svojstava brodograđevnog čelika broda za rasuti teret

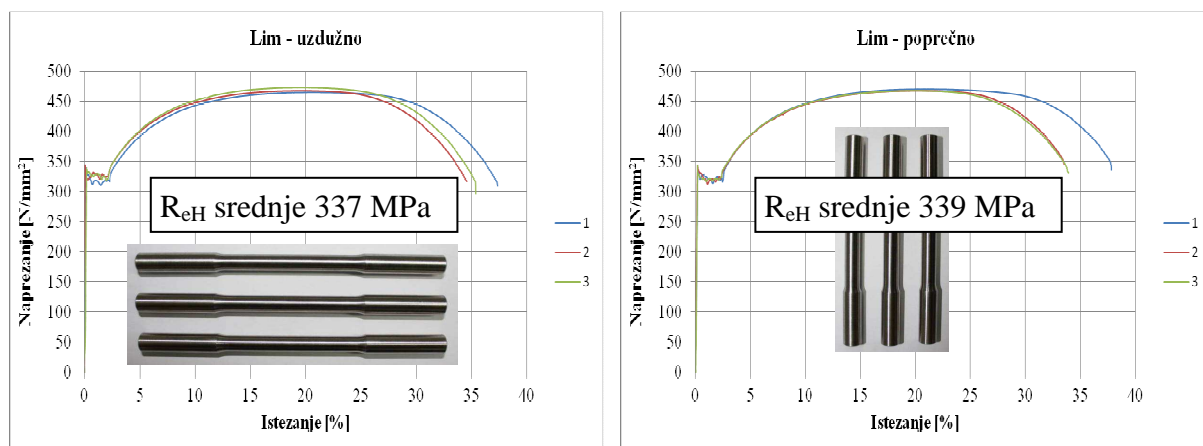
U ovom poglavlju će se prikazati rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava običnog brodograđevnog čelika (MS-A) koji se koristio za gradnju broda za prijevoz rasutog tereta. Provedena su ispitivanja valjanih materijala limova prikazanih na slikama 7a i 7b te profila [3, 9] u različitim smjerovima valjanja. U brodograđevnoj praksi se nastoji da se limovi i profili postavljaju tako da se podudara smjer valjanja materijala s uzdužnom osi broda.

Ispitivanja su napravljena za po tri epruvete u uzdužnom i poprečnom smjeru za limove i profile, na slikama 8a i 8b (ukupno 12 epruveta).

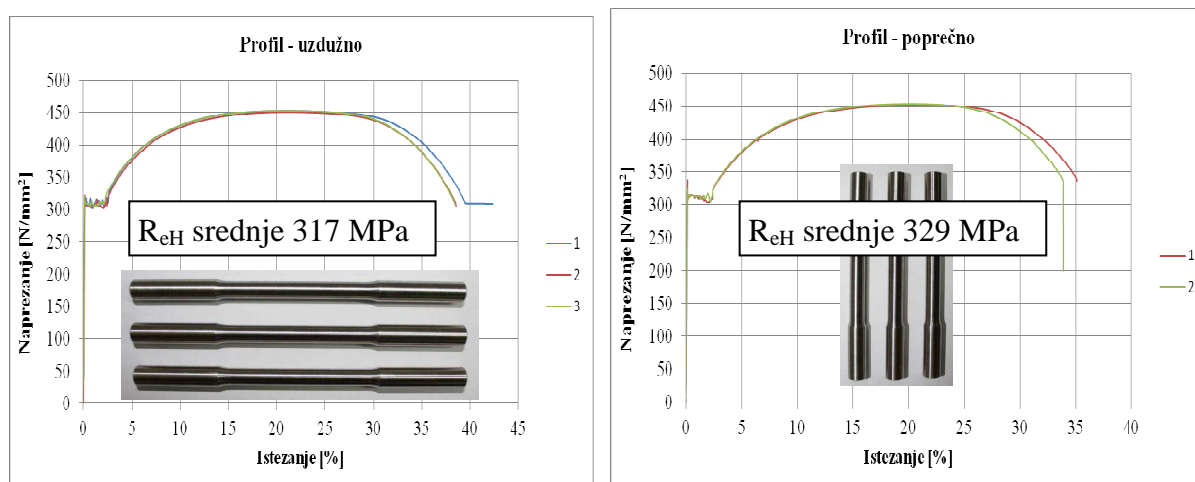
Koeficijent varijacije svih 12 pokusa je vrlo mali i iznosi 0.01 dok je srednja vrijednost granice razvlačenja u iznosu 330MPa veće od nominalne vrijednosti od 235MPa za 40%.



**Slika 7.** Rezanje limova u brodogradilištu (a) i dio od kojeg su uzimani uzorci (b)  
**Fig. 7** Plate cutting in shipyard (a) and the plate from which the specimens were extracted (b)



**Slika 8a.** Dijagram 'naprezanje – istezanje' za brodograđevni čelik – brod za rasuti teret  
**Fig. 8a** 'Stress-Strain' diagram for shipbuilding steel – bulk carrier



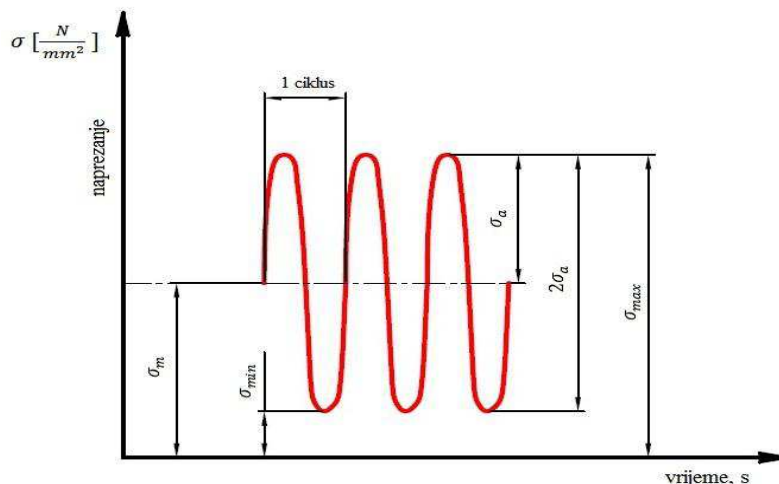
Slika 8b. Dijagram 'naprezanje – istezanje' za brodograđevni čelik – brod za rasuti teret

Fig. 8b 'Stress-Strain' diagram for shipbuilding steel – bulk carrier

### 3.6. Ispitivanje dinamičkih svojstava brodograđevnog čelika broda za rasuti teret

U radu su prikazani rezultati dinamičkih ispitivanja konstantnom amplitudom [7] na običnom brodograđevnom čeliku (MS-A) korištenim u gradnji tankera iz tablice 1. Amplitude opterećenja prikazane su slikom 9.

Osnovne vrijednosti na slici su:  $\sigma_{\max}$  – maksimalno naprezanje ciklusa,  $\sigma_{\min}$  – minimalno naprezanje ciklusa,  $\sigma_m$  – srednje naprezanje ciklusa,  $\sigma_a$  – amplituda i  $r$  – koeficijent asimetrije ciklusa.



Slika 9. Amplitude opterećenja

Fig. 9 Range of load

Vrijednost osnovne amplitude definira se na temelju rezultata statičkog vlačnog pokusa, a uzima se prema izrazu  $\sigma_o = 0,6 \cdot R_m$ . Izbor vrijednosti osnovne amplitude ovisi i o prihvatljivom vremenskom trajanju mjerenja koji obično iznosi dva dana. Na osnovi srednje vrijednosti vlačne čvrstoće  $R_m = 443 \text{ MPa}$  iz tablice 1, osnovna amplituda iznosi  $\sigma_o = 266 \text{ N/mm}$ . Parametri opterećenja su dani u tablici 2.

U primjeru se radi o istosmjernom promjenljivom opterećenju s prednaprežanjem kod kojeg je u svakom trenutku ispitivanja vlačno naprežanje.

**Tablica 2:** Parametri spektra opterećenja**Table 2** Range of load parameters

Parametar	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	r	f [Hz]
Vrijednost	340	34	187	0,1	12

Ispitivanja su se provela pri sobnoj temperaturi na tri epruvete oznaka E\_6, E\_9 i E\_18 čije su oblik i geometrijske značajke dane u tablici 1. Rezultati ispitivanja dani su u tablici 3.

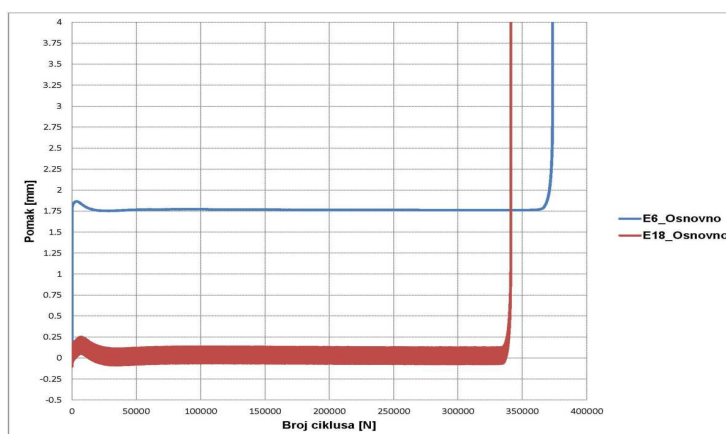
**Tablica 3.** Rezultati dinamičkog ispitivanja brodograđevnog čelika**Table 3** Results of the dynamic testing of the shipbuilding steel

Br.	Vrsta opterećenja	$\sigma_m$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	Broj ciklusa do loma
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
E_6	Osnovno	187	340.00	34.00	372561
E_9	Osnovno	187	340.00	34.00	379342
E_18	Osnovno	187	340.00	34.00	341148
Srednja vrijednost					364350

Ispitivanja su uspješno provedena, a prema podacima iz tablice vidi se da su se sve tri epruvete pod dinamičkim opterećenjima ponašale slično. Prikazani rezultati imaju malo rasipanje obzirom da se kod dinamičkih ispitivanja očekuju puno veća rasipanja rezultata.

Osim ovog načina prikazivanja rezultata u praksi se koristi prikaz ovisnosti pomaka gornje čeljusti umaralice o broju ciklusa koji je za ovo ispitivanje prikazan slikom 10. Kod epruvete E\_6 uzimane su samo vršne vrijednosti pomaka, a kod epruvete E\_18 su uzimane vrijednosti u vremenskom intervalu od jedne milisekunde. U tom slučaju se ne uzimaju samo vršne vrijednosti nego veći niz podataka, pa je prikaz rezultata vizualno drugačiji. Kod opterećenja promjenjivim amplitudama jedino je ovakav način prikupljanja i prikazivanja podataka moguć radi ograničenja programskog paketa.

Što se rezultata ispitivanja tiče, može se primjetiti da epruvete zadržavaju konstantno produljenje sve do loma. Razlika vrijednosti koje su pojavile između epruveta E\_6 i E\_18 je u tome što je kod epruvete E\_6 došlo do urezivanja čeljusti u tijelo epruvete.



**Slika 10.** Mjerenje pomaka gornje čeljusti umaralice  
**Fig. 10** Measurement of specimen upper crosshead shifts



#### 4. Zaključak

Prvi nalaz ovih ispitivanja na primjeru 3 uzorka materijala tankera u gradnji ukazao je da je čvrstoća ugrađenih materijala u brodski trup značajno viša od svojstava materijala koji se koriste u projektiranju strukture broda.

Drugi nalaz ovih ispitivanja na primjeru 12 uzorka materijala broda za rasute terete u gradnji ukazao je da je rasipanje vrijednosti mehaničkih svojstava i čvrstoće ugrađenih materijala u brodski trup izuzetno malo kad se radi o isporukama materijala pouzdanih proizvođača. Pokusi su pokazali da postoje razlike u čvrstoći valjanih limova i profila (~5%) i nešto manje razlike u čvrstoći u uzdužnom i poprečnom smjeru valjanja (~1%).

Treći nalaz ovih ispitivanja na zamor na primjeru 3 uzorka materijala tankera u gradnji ukazao je da je rasipanje rezultata mjerenja dinamička čvrstoća ugrađenih materijala uglednog proizvođača u brodski trup manje od očekivanih i uobičajenih.

U zaključku ovih ispitivanja se može reći da se veće granične čvrstoće ugrađenih materijala od projektnih vrijednosti povoljno odražavaju na opću sigurnost broda na lokalnoj i globalnoj razini sa stajališta izvijanja elemenata, zamora strukturnih detalja, otpora na koroziju te na ukupnu graničnu čvrstoću trupa. Malo rasipanje izmjerene vrijednosti granične čvrstoće ugrađenih materijala znatno povećavaju pouzdanost proračun granične čvrstoće.

Međutim, ugradnja materijala trupa veće čvrstoće u brodski trup od vrijednosti koje su primijenjene u projektiranju strukture nalaže i preispitivanje čvrstoće zavarenih spojeva. U slučaju da čvrstoća osnovnog materijala premašuje čvrstoću zavarenih spojeva moguća je promjena u slici kritičnih mjesta na brodu sa stajališta lokalne, globalne čvrstoće na izvijanje, popuštanje i zamor, i to na mjesta zavara koja postaju slabija mjesta nego projektom predviđena slaba mjesta konstrukcije od osnovnog materijala.

Na osnovi suradnje do sada je u zajedništvu Katedre za gradnju plovnih objekata izrađena su 2 seminarska rada, 2 završna rada i 4 diplomatska rada. Rezultati suradnje su prikazani na domaćem Simpoziju SORTA2010 s međunarodnim sudjelovanjem i na međunarodnom skupu OMAE2012 te su doveli i do uspostavljanja znanstvene suradnje sa Instituto Superior Tecnico iz Lisabona. Svakako treba istaknuti podršku i entuzijazam kolega Matka Balića i Darka Jankovića iz brodogradilišta Split koji su nam omogućili potreban materijal za ispitivanje.

Dosadašnja iskustva otvaraju perspektive uspješne suradnje i nastavka primjene eksperimentalnih metoda pogotovo dinamičkih ispitivanja gdje se mogu ispitivati različiti materijali s različitim spektrima i redosljedima opterećenja.

Planira se nastavak istraživanja mogućeg problema oko nesrazmjera čvrstoće čelika i pripadajućeg zavara te svojstava čelika povišene čvrstoće. Nadalje, planira se ispitivanje svojstava brodograđevnih čelika tijekom službe broda prema uobičajenim procedurama provjere stanja trupa, te utjecaj promjenjivih opterećenja i starenja broda na zamorni vijek detalja brodskih konstrukcija.

**LITERATURA**

- [1] M. Franz: Mehanička svojstva materijala, FSB, 1998
- [2] Hrvatski registar brodova: Pravila za tehnički nadzor pomorskih objekata, dio25–metalni materijali, 2005.
- [3] N. Dupor: Utjecaji karakteristika ugrađenog čelika na svojstva izgrađenog broda, diplomski, FSB, 2011.
- [4] A. El Saleh: Ispitivanje mehaničkih svojstava brodograđevnog čelika, završni rad, FSB, 2011.
- [5] D. Jelaska: Osnovi mehanike loma, 1. dio, FESB,
- [6] N. Krančević: Proračun spojeva konstrukcija, FSB, 2008.
- [7] V. Salopek: Dinamička izdržljivost brodograđevnog čelika, diplomski rad, FSB, 2011.
- [8] Ljubičić P., Kodvanj J., Ljubenkov B.: Mehanička svojstva nehrđajućeg čelika pri niskim temperaturama, XIX. SIMPOZIJ, SORTA 2010, Split, FESB, 2010.
- [9] Žiha, K.: Strength and reliability of ships 'as-built', Proceedings of the ASME 2012, 31th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2012, Rio de Janeiro, 2012.
- [10] Kodvanj, J., Žiha, K., Ljubenkov, B., Bakić, A.: Mechanical characteristics of the shipbuilding stainless steel at sub-zero temperatures, CRC Press, Taylor and Francis Group, London, 2011.