Broj rada: 4.6
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.022

IZBOR NAJPOVOLJNIJE TEHNOLOGIJE REPARATURNOG NAVARIVANJA NA OSNOVU METALOGRAFSKIH I TRIBOLOŠKIH ISPITIVANJA

SELECTION OF THE MOST FAVORABLE HARD-FACING TECHNOLOGY BASED ON METALLOGRAPHIC AND TRIBOLOGICAL INVESTIGATIONS

Vukić N. Lazić[1] redovni profesor u penziji, ORCID: 0000-0001-9362-7184, Dušan M. Arsić[1] vanredni profesor, ORCID: 0000-0003-0326-0898, Katarina D. Dragutinović[1] doktorand, Aleksandar S. Sedmak[2] profesor emeritus, ORCID: 0000-0002-5438-1895, Milan V. Mutavdžić[3] profesor strukovnih studija u penziji, Milan T. Đorđević[4] vanredni profesor, ORCID: 0000-0001-7317-8334, Aleksandar T. Todić[4] redovni profesor, ORCID: 0000-0003-3308-5226

[1]Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, Srbija
[2]Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, Srbija
[3]Visoka tehnička škola, 24. novembra bb, 38218 Leposavić, Srbija
[4]Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Knjaza Miloša 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija

Correspondence to: dusan.arsic@fink.rs

Rezime: Oštećenje radnih delova mašina i uređaja u eksploataciji nastaje neminovno i ne može se izbeći. Reč je o složenim tribološkim procesima. U okruženjima gde su radni uslovi rigorozniji, promena oblika radnih delova nastaje zbog trenja, habanja, udarnih sila, povišene temperature, korozije i drugih uticajnih faktora, te se radni deo, posle određenog vremena mora zameniti ili reparaturno doraditi. Kako bi se zastoji, najčešće skupe opreme otklonili, deo se može zameniti novim ili reparirati zavarivanjem i vratiti u proizvodni proces. Vreme nabavke je često, zavisno od mase i geometrije dela, veoma dugo, pa se radi skraćenja vremena zastoja često pribegava reparaturnom navarivanju.

U ovom radu, na jednom konkretnom primeru, izrađenom od posebne vrste čeličnog liva, detaljno se ukazuje na pravilan izbor najpogodnijih dodatnih materijala, postupka zavarivanja odnosno najpovoljnije tehnologije zavarivanja, za odgovorni radni deo čiji je radni vek relativno kratak. Najpre se na probnim uzorcima izvode tzv. modelska ispitivanja navarivanjem različitim dodatnim materijalima, a zatim se analiziraju dobijeni rezultati, pre svega, na osnovu metalografskih ispitivanja i triboloških testova. Na osnovu tih rezultata, bira se najpovoljnija tehnologija i ona "prenosi" na realni deo. Konačan izbor tehnologije se izvodi na osnovu praćenja radnog dela u realnim radnim uslovima.

Ključne reči: udarna greda drobilice, metalografska ispitivanja, tribološki test, reparaturno navarivanje, tehno-ekonomski efekti.

Abstract: Damage to the working parts of machines and equipment in operation is inevitable and cannot be avoided. These are complex tribological processes. In environments where operating conditions are more rigorous, changes in the shape of working parts occur due to

friction, wear, impact forces, elevated temperatures, corrosion, and other influencing factors; thus, after a certain period, the working part must be replaced or reconditioned. To eliminate downtime-often of expensive equipment-the part can be replaced with a new one or repaired by welding and returned to the production process. Procurement time is often very long, depending on the mass and geometry of the part, which is why repair hardfacing is frequently used to shorten downtime.
This paper, using a specific example, made of a special type of cast steel, details the correct selection of the most suitable filler materials, welding processes, and optimal welding technology for a critical working part with a relatively short service life. First, model tests are carried out on test specimens by hardfacing with various filler materials. The obtained results are then evaluated, primarily based on metallographic examinations and tribological tests. Based on these results, the most favorable technology is selected and "transferred" to the actual part. The final choice of technology is made by monitoring the working part under real operating conditions.

Key words: Crusher blow bar, metallographic testing, tribological test, repair hardfacing, techno-economic effects.

1. UVODNE NAPOMENE O OPREMI ZA DROBLJENJE AGREGATA

Tehnologije reparaturnog i proizvodnog navarivanja nalaze sve širu primenu u raznim industrijskim granama, koje se svrstavaju u napredne tehnologije reparature radnih delova. One nose sa sobom niz prednosti: smanjenje vremena zamene radnih delova novim, smanjenje magacinskih troškova, nabavke skupih delova i niz drugih tehno-ekonomskih benefita. Kako bi se to ostvarilo, zahteva se pažljiv pristup izbora dodatnog materijala, postupka navarivanja, izbora energetskih parametara navarivanja, skupih modelskih ispitivanja, ali i visokostručnog kadra. Dakle, ovom poslu mora se pristupiti kao odgovornom tehničko-tehnološkom problemu, a ne kao silom nametnutom zadatku. Autori ovog rada uspešno su izveli niz reparatura veoma odgovornih radnih delova [1, 2].

Kao što je navedeno, između velikog broja uspešno reparaturno i proizvodno navarenih delova opredelili smo se za *udarnu gredu drobilica*, tj. jedne od najopterećenijih pozicija građevinske mehanizacije, izloženu jakom abrazivnom habanju uz pojačane udare. Razume se reč je o drobljenju različitih vrsta agregata, odnosno stenskih materijala, najčešće sedimentnog i metamorfnog porekla [1, 2].

Abrazivnom habanju visokog intenziteta pri istovremenim jakim udarnim opterećenjima, u širem smislu, izloženi su delovi drobiličnih postrojenja koji su u kontaktu sa agregatom koji se prerađuje. Drobilična postrojenja pripadaju grupi stabilne građevinske mehanizacije i koriste se pri proizvodnji i pripremi građevinskih materijala (kamena, cementa, kreča i dr.). Njihov zadatak jeste da drobe i usitnjavaju ~~i melju~~ stenske materijale kako bi se dobile različite frakcije kamenih agregata (granulata) za direktnu ugradnju ili dalju proizvodnju. Pored toga što se koriste u građevinarstvu, drobilična postrojenja su našla svoju primenu i u energetici, rudarstvu gde služe za usitnjavanje (drobljenje i lomljenje, ~~mlevenje~~) različitih vrsta ruda i uglja, vodoprivredi i tsl.

Procesima habanja i jakim udarnim opterećenjima najviše su izloženi delovi drobiličnog postrojenja koji su u direktnom kontaktu sa agregatima. Od mehaničkih svojstava materijala od koga su izrađeni ovi delovi i od svojstava stenskog materijala zavisi i intenzitet njihovog habanja. Materijal koji se usitnjava dovodi se u radni prostor između pokretnih i nepokretnih delova drobilice, gde se mehanička energija pokretnih delova pretvara u rad koji se troši na kidanje kohezionih i adhezionih veza stenskog materijala [1, 2].

Stenski materijali koji se koriste u građevinarstvu najčešće imaju veliku tvrdoću. Stoga

je neophodno da se za izradu i reparaturu navarivanjem radnih delova drobilica primene materijali koji imaju visoku žilavost i otpornost na habanje, da bi se proces obrade mogao uspešno izvoditi. Eksperimentalna istraživanja izvođena su na najopterećenijim delovima drobilice - *udarnim gredama* i *oblogama* koje sačinjavaju čeljust drobilice. Praćenje procesa habanja ovih delova u realnim radnim uslovima obavljeno je pri usitnjavanju stenskog materijala krečnjaka na drobiličnom postrojenju kapaciteta 350 *t*/h.

Kapacitet drobiličnih postrojenja zavisi od više faktora, a najviše od konstrukcionog rešenja i veličine drobilice. U konkretnom slučaju reč je o rotacionoj drobilici sa četiri udarne grede koje se montiraju na rotor, a kretanje se može ostvariti pomoću elektromotora ili motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Pri tome se obrtni moment prenosi preko mehaničkog prenosnika (kaišnika i klinastih kaiševa). Ovo konstrukciono rešenje omogućuje proklizavanje kaiševa kada dođe do preopterećenja, jer se na ovaj način štite vitalni delovi drobilice od loma.

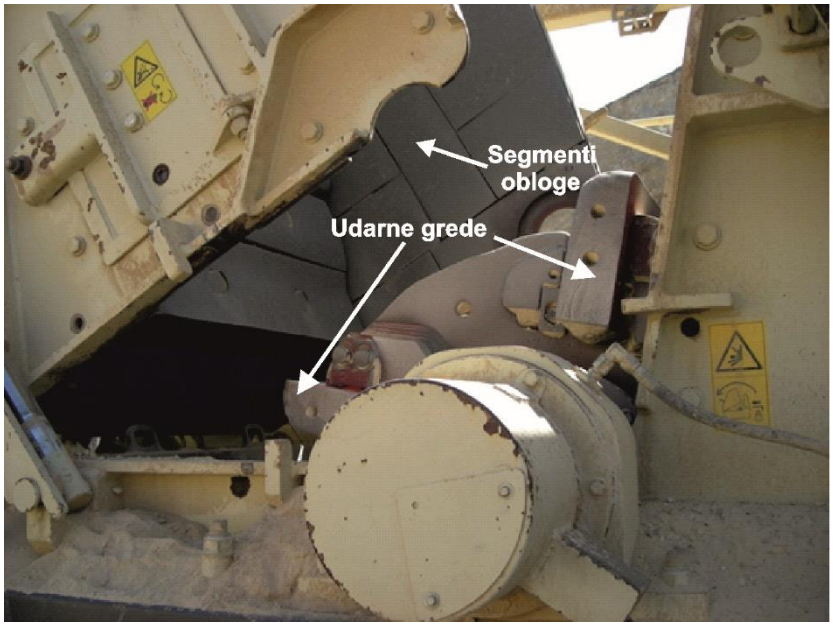
Udarne grede služe da svojom mehaničkom energijom razbijaju i usitnjavaju kamen. Na rotor drobilice se montiraju tako što se ubacuju u specijalno napravljene žlebove koji onemogućavaju njihovo pomeranje u radijalnom i aksijalnom pravcu, čime se sprečava njihovo ispadanje iz rotora. Imaju dve radne površine što omogućava da se posle habanja jedne radne površine, okretanjem grede iskoristi i druga radna površina, čime se donekle produžava njihov radni vek. Obloga drobilice se sastoji iz segmenata koji su različitog oblika (ravni i sferični) i njen zadatak je da usitnjava kamen i štiti telo drobilice od oštećenja. Izgled novih i oštećenih greda udarnih greda dat je na slici 1. Izgled savremenih drobiličnih postrojenja prikazan je na slikama 2 i 3.



Slika 1. Izgled novih (a) i oštećenih (b) udarnih greda



Slika 2. Izgled pokretnog drobiličnog postrojenja kapaciteta 350 t/h



Slika 3. Unutrašnji izgled rotacione drobilice sa udarnim gredama kapaciteta 350 *t/h*

Udarne grede su zajedno sa oblogama radni delovi drobilice koji su u direktnom kontaktu sa agregatom/kamenom, a njihov zadatak je da razbiju i izdrobe kamen na odgovarajuće dimenzije (frakcije). Udarne grede drobilice na kojima su izvedena ispitivanja izrađene su livenjem od austenitnog manganskog čelika tzv. Hadfildovog čelika. U drobilicu se montiraju četiri udarne grede dimenzija 300×120×1200 *mm* čija je izmerena masa po jednom komadu oko 300 *kg*. Izrađuju se u više specifičnih oblika koji omogućavaju pričvršćivanje za rotor drobilice pomoću držača i drugih elemenata za fiksiranje, jer se u toku rada grede ne smeju pomerati u odnosu na rotor ni u aksijalnom ni radijalnom pravcu. Kao što je spomenuto ovi delovi su pri radu izloženi jakoj abraziji i udarima, te se kao material preporučuje material velike žilavosti, pri čemu u pripovršinskom sloju pri plastičnoj deformaciji na hladno nastaje lokalna transformacija austenita u martenzit i na taj način povećava otpornost na habanje. Tvrdoća novonastalog martenzita zavisi isključivo od vrste dodatnog materijala.

Potrebno je reći da su udarne grede drobilice na kojima su obavljena eksperimentalna

navarivanja izrađene od manganskog čeličnog liva ČL 3460. Segmenti obloge imaju debljinu zida 30 *mm* i ~~pojedinačnu~~ masu oko 20 *kg*, a izrađeni su od manganskog čeličnog liva ČL 3160. S obzirom na potrebnu količinu dodatnog materijala, navarivanje u realnim radnim uslovima, proces proizvodnje i dr., može se reći da su ova ispitivanja izvedena u dosta složenim uslovima [1].

2. IZBOR TEHNOLOGIJE REPARATURE OŠTEĆENIH UDARNIH GREDA

2.1 Materijali udarnih greda i njihova najvažnija svojstva

Kao što je spomenuto, udarne grede su izložene jakom abrazivnom habanju i visokim udarnim opterećenjima, te se posle relativno kratkog vremena rada, mereno u desetinama sati, moraju zameniti novim ili reparirati. Sličan slučaj je i sa segmentima drobilica. U našim uslovima građevinska preduzeća u Srbiji su se opredeljivala za nabavku novih delova, strahujući za uspeh izvođenja reparaturnog navarivanja. Manja grupa nastavnika i saradnika sa dva tehnička fakulteta iz Srbije je odlučila da pokuša ovu veoma riskantnu reparaturu[1, 2].

Ovde navodimo samo neke od najčešće korišćenih materijala za radne delove drobilica, prvenstveno udarne grede i segmente. Potrebno je istaći, da su pri popunjavanju narednih tablica unošeni ne samo literaturni podaci [1], već i eksperimentalno ispitan hemijski sastav, izmerena tvrdoća i očitavana mikrostruktura svih preporučenih osnovnih materijala.

Čelični liv (ČL 3134) primenjuje se za izradu većeg broja radnih delova građevinskih mašina: zuba utovarnih kašika utovarivača, rovokopača i bagera, ivica utovarnih kašika, naglavaka ripera grejdera i buldozera; stabilnih i pokretnih valjaka za vođenje i zatezanje gusenica kod građevinskih mašina, pogonskih lančanika i vodećih točkova kod guseničara, lanaca i papuča gusenica, valjaka transportnih traka, delova mlinova i dr. Ovaj čelični liv, najkraće rečeno, primenjuje se za izradu radnih delova građevinske mehanizacije izloženih abrazivnom habanju i udarima srednjeg intenziteta.

Propisan i analiziran hemijski sastav osnovnog materijala (OM) ČL 3134 i smernice za njegovu namenu dati su u tablici 1, a uporedne oznake, mehanička svojstva i mikrostruktura u tablici 2.

Tablica 1. Hemijski sastav i namena ČL 3134

OM ČL 3134	Hemijski sastav, %					Namena
	C	Si	Mn	P	S	ČL 3134 - Za izradu delova otpornih na habanje: delovi drobilica i mlinova izloženih habanju manjeg intenziteta, delova gusenica, delova kašina građevinske mehanizacije i dr.
Propisan	0.45	0.50	1.80	0.04	0.04	
Analiziran	0.35	0.40	1.85	0.04	0.035	

Tablica 2. Uporedne oznake, mehanička svojstva i mikrostruktura ČL 3134

Uporedne oznake		Mehanička svojstva					Mikrostruktura
JUS	DIN	R_m, *MPa*	R_{eH}, *MPa*	A_5, %	KV, *J*	Tvrdoća, HB	ČL 3134 - Međufazna struktura poboljšanja (martenzitno-bejnitna)
ČL 3134	GS-36 Mn5	780-930	390	7	-	340-430 posle poboljšanja	

Čelični liv (ČL 4150) primenjuje se za radne delove građevinskih mašina izložene abrazivnom habanju i udarima niskog intenziteta. Primenjuje se za izradu lopatica i obloga mešalica za proizvodnju asfalta, betona i drugih građevinskih materijala.

Hemijski sastav čeličnog liva ČL 4150 i smernice za njegovu namenu dati su u tablici 3, a uporedne oznake, mehanička svojstva i mikrostruktura u tablici 4.

Tablica 3. Hemijski sastav i namena ČL 4150

OM ČL 4150	Hemijski sastav, %							Namena
	C	Si	Mn	Cr	V	P	S	
Propisan	2.00	0.40	0.30	12.00	0.10	0.035	0.035	ČL 4150 - Za izradu delova izloženim habanju i udarima manjeg intenziteta.
Analiziran	2.00	0.38	0.30	12.50	0.10	0.025	0.025	

Tablica 4. Uporedne oznake, mehanička svojstva i mikrostruktura ČL 4150

Uporedne oznake		Mehanička svojstva					Mikrostruktura
JUS	DIN	R_m, *MPa*	R_{eH}, *MPa*	A_5, %	KV, *J*	Tvrdoća, HB	
ČL 4150	G-X190Cr10	-	-	-	-	552-555 posle kaljenja	ČL 4150 – Ledeburitna.

Čelični livovi (ČL 3160 i ČL 3460) primenjuju se za izradu radnih delova građevinskih mašina izloženih abrazivnom habanju i jakim udarima. Od ovih materijala se izrađuju delovi drobiličnih postrojenja i to: obloga drobilice, čekići, čeljusti, uvodnici materijala i dr. Propisan i analiziran hemijski sastav i smernice za namenu ovih materijala dati su u tablici 5, a uporedne oznake, najvažnija mehanička svojstva i mikrostruktura ovih materijala dati su u tablici 6.

Tablica 5. Hemijski sastav i namena ČL 3160 i ČL 3460

Osnovni materijal		Hemijski sastav, %						Namena
		C	Si	Mn	Cr	P	S	
ČL 3160	Propisan	1.2	0.50	12.00	-	0.035	0.10	Namenjeni su za izradu delova izloženih abrazivnom habanju i jakim udarnim opterećenjima kao što su: radni delovi mlinova, drobilica, građevinskih mašina za rad sa materijalima velike tvrdoće i dr.
	Analiziran	1.2	0.48	12.35	-	0.025	0.10	
ČL 3460	Propisan	1.2	0.50	13.00	1.00	0.040	0.10	
	Analiziran	1.2	0.55	13.14	1.12	0.350	0.15	

Tablica 6. Uporedne oznake, neka mehanička svojstva i mikrostruktura ČL 3160 i ČL 3460

Uporedne oznake		Mehanička svojstva					Mikrostruktura
JUS	DIN	R_m *MPa*	R_{eH} *MPa*	A_5 %	KV *J*	Tvrdoća HB	
ČL 3160	G-X120Mn12	≈ 1200	-	-	-	200 posle gašenja	ČL 3160 – Austenitna ČL 3460 - Austenitna
ČL 3460	G-X120Mn12	≈ 210	-	-	-	210 posle gašenja	

2.2 Dodatni materijal

Za izvođenje ovih eksperimentalnih ispitivanja korišćeni su različiti dodatni materijali (INOX B 18/8/6 kao puferna/međuslojna; E Mn 14, E Mn 17 Cr 13, ABRADUR 58, Cr WC 600 i EDUR 600 - za modelska navarivanja). Svojstva dodatnog materijala INOX B 18/8/6 data su odgovarajućoj literaturi [1, 3]. Elektrode tipa INOX B 18/8/6 su korišćene za izvođenje međuslojnih navara, posebno tamo gde se hemijski sastav OM i DM bitno razlikuje. Pored navedenih dodatnih materijala, korišćene su i elektrode različitih svojstava, ali i punjenje žice [1, 3-7]. Hemijski sastav i uporedne oznake korišćenih dodatnih

materijala dati su u tablici 7, a mehanička svojstva čistog metala navara dobijena ovim ispitivanim dodatnim materijalima data su u tablici 8 [3].

Tablica 7. Hemijski sastav i uporedne oznake ispitivanih dodatnih materijala

Uporedne oznake DM		Hemijski sastav,%						
SŽ - Elektrode Jesenice	DIN 8555, 8556	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo
INOX B 18/8/6	E 18 8 Mn B20	0.12	0.80	7.00	19.00	9.00	-	-
E Mn 14	E7-UM-200-KP	1.20	-	12.50	-	-	-	0.70
E Mn 17 Cr 13	E7-UM-200-KP	0.60	-	16.50	13.50	-	-	-
Cr WC 600	E10-UM-60-C	4.00	-	-	26.00	-	4.00	-
E DUR 600	E6-UM-60	0.50	-	-	7.50	-	-	-
ABRADUR 58	E10-UM-60-GR	3.60	-	-	32.00	-	-	-

Tablica 8. Mehanička svojstva čistog metala navara ispitivanih dodatnih materijala

Oznake DM	Mehanička svojstva				
SŽ – Elektrode Jesenice	R_m, *MPa*	R_{eH}, *MPa*	A_5, %	KV, *J*	Tvrdoća, HB, HRC
ABRADUR 58	-	-	-	-	Од 57-62 HRC, a најчешће 58 HRC на 20ºC
Cr WC 600	-	-	-	-	Од 57-62 HRC, a најчешће 60 HRC на 20ºC
E DUR 600	-	-	-	-	Од 57-62 HRC, a најчешће 60 HRC на 20ºC
INOX B 18/8/6	590 do 690	>350	>40	>80 на 20ºC	Приближно 200 HB
E Mn 14	-	-	-	-	Од 175-225 HB, a најчешће 220 HB, odnosno 48 HRC posle deformacije na hladno
E Mn 17 Cr 13	-	-	-	-	Од 220-260 HB, a најчешће 220 HB, odnosno 48 HRC posle deformacije na hladno

Treba napomenuti da su korišćene i punjene žice, ali zbog obima rada dobijeni rezultati nisu ovde objavljeni [1].

2.3 Ocena zavarljivosti i izbor parametara zavarivanja – modelska ispitivanja

Radni delovi građevinske mehanizacije su u toku eksploatacije najčešće istovremeno izloženi različitim vidovima habanja (dominantno abraziji), koroziji, stalnim ili povremenim udarnim opterećenjima i drugim uticajima. Zbog toga se ovi delovi izrađuju od visokokvalitetnih legiranih čelika i čeličnih livova. Ovi materijali uglavnom pripadaju grupi uslovno zavarljivih, pa je neophodno pri zavarivanju i navarivanju preduzeti dopunske mere, kako bi se dobili navari zahtevanog kvaliteta. Često se umesto predgrevanja nanose puferni (međuslojni) austenitni slojevi kako bi se ublažila razlika između navara i podloge, ili između samih slojeva navara kad je reč o heterogenim spojevima.

2.4 Priprema uzoraka za modelska ispitivanja

Priprema uzoraka za modelska ispitivanja sastojala su se iz sečenja materijala na odgovarajuće dimenzije, njihovog odmašćivanja i hrapavljenja navarivanih površina. Sečenje

uzoraka izvedeno je uz intenzivno hlađenje da bi se sprečila promena strukture usled unosa toplote. Priprema dodatnog materijala za izradu fizičkih modela odnosi se na sušenje na temperaturi 350-400ºC u trajanju od 2 h [1-3].

Eksperimentalnim ispitivanjima varirani su parametri navarivanja, kako bi se utvrdila povoljna tehnologija reparature na osnovu dobijene mikrostrukture i triboloških testova u cilju dobijanja navara traženog kvaliteta. Osnovni kriterijum za ocenu kvaliteta navara jeste da navar bude homogen, bez prslina, šupljina i uključaka, kako u metalu navara tako i metalu osnovnog materijala odnosno zoni uticaja toplote (ZUT-u). Potrebno je napomenuti da se pri izvođenju brojnih proba došlo do saznanja da postoje znatne razlike između preporučenih i potrebnih parametara navarivanja kako bi se dobio navar traženog kvaliteta. Takođe, izbor najpovoljnijih energetskih parametara navarivanja nije nimalo jednostavan zadatak, jer je bio neophodan veliki broj eksperimentalnih proba sa različitim parametrima navarivanja, što je zahtevalo dugo vreme ispitivanja [8, 9].

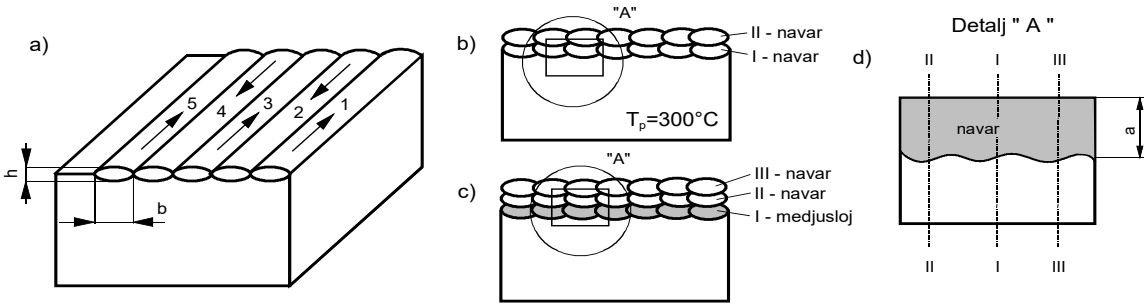
Navareni modeli su poslužili za određivanje svojstava karakterističnih zona navara u laboratorijskim uslovima. Procesni parametri navarivanja pri izradi fizičkih modela (modela) za navarivanje obloženim elektrodama dati su u tablici 9 [1-3].

Tablica 9. Procesni parametri navarivanja primenom REL navarivanja

Debljina OM, s, *mm*	Oznaka elektrode, SŽ-Elektroda Jasenice d.o.o.	Prečnik elektrode, d_e, *mm*	Jačina struje, I, *A*	Radni napon U, *V*	Brzina zavarivanja, v_z,*cm/s*	Pogonska energija, $ql = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta_i^*, J/cm$
10-24	ABRADUR 58	3.25-5.00	130-160	25-26	0.124-0.145	20968-22952
	Cr WC 600	3.25-5.00	125-220	25-29	0.116-0.180	21555-28356
	E DUR 600	3.25-5.00	120-200	25-28	0.119-0.220	20168-25455
	INOX B 18/8/6	3.25-5.00	100-140	24-26	0.136-0.178	14118-18696
	E Mn 14	3.25-5.00	120-180	25-27	0.148-0.162	16216-24000
	E Mn 17 Cr 13	3.25-5.00	130-200	25-28	0.152-0.168	17105-26667

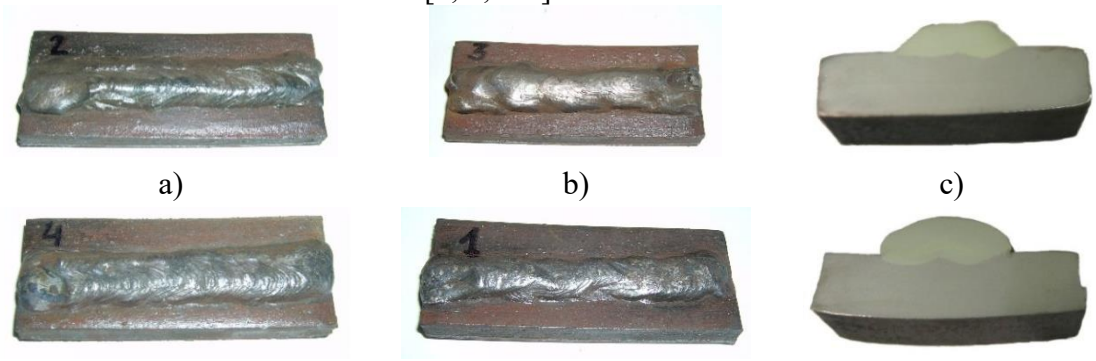
**Napomena: ηi-koeficijent iskorišćenja toplote i iznosi 0.80 pri navarivanju bazičnim elektrodama i 0.90 pri navarivanju rutilnim elektrodama.*

Uzorci za modelska ispitivanja priprermani su u dve varijante, a sa istom tehnologijom i istim energetskim parametrima navarivanja. Prva varijanta izrade uzoraka odnosila se na navarivanje sa ili bez predgrevanja, u zavisnosti od zavarljivosti osnovnih materijala. Druga varijanta izrade uzorka zasniva se na nanošenju plastičnog međusloja elektrodom INOX B 18/8/6, čime bi se eliminisalo predgrevanje i pojednostavio proces navarivanja. Način polaganja navara, redosled i broj nanetih slojeva i izgled uzoraka prikazan je na slici 4.



Slika 4. Način pripreme metalografskih uzoraka (a, b, c) i fizički izgled jednog uzorka (d) za metalografska i tribološka ispitivanja

Pri polaganju navara, pre svakog narednog sloja, uklanjala se troska navara. Posle navarivanja gotovi modeli hladili su se na mirnom vazduhu. Pri izradi fizičkih modela (sl. 5) nije izvođena naknadna termička obrada, iz razumljivih razloga, da bi se ispitala stvarna svojstva karakterističnih zona navara [1, 2, 5-7].



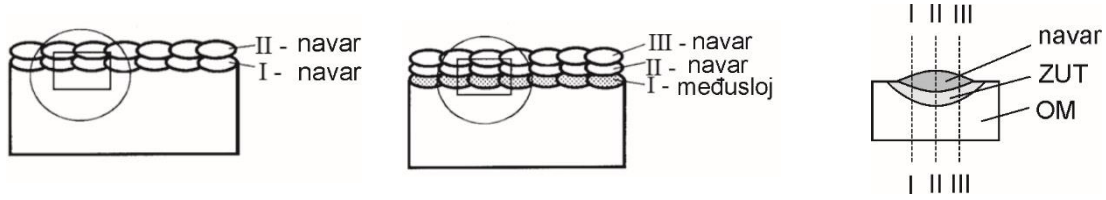
a) b) c)

d) e) f)

Slika 5. Izgled nekih pripremljenih fizičkih modela (a, b, d, e) i metalografskih izbrusaka (c, f) koji su korišćeni za laboratorijska eksperimentalna ispitivanja

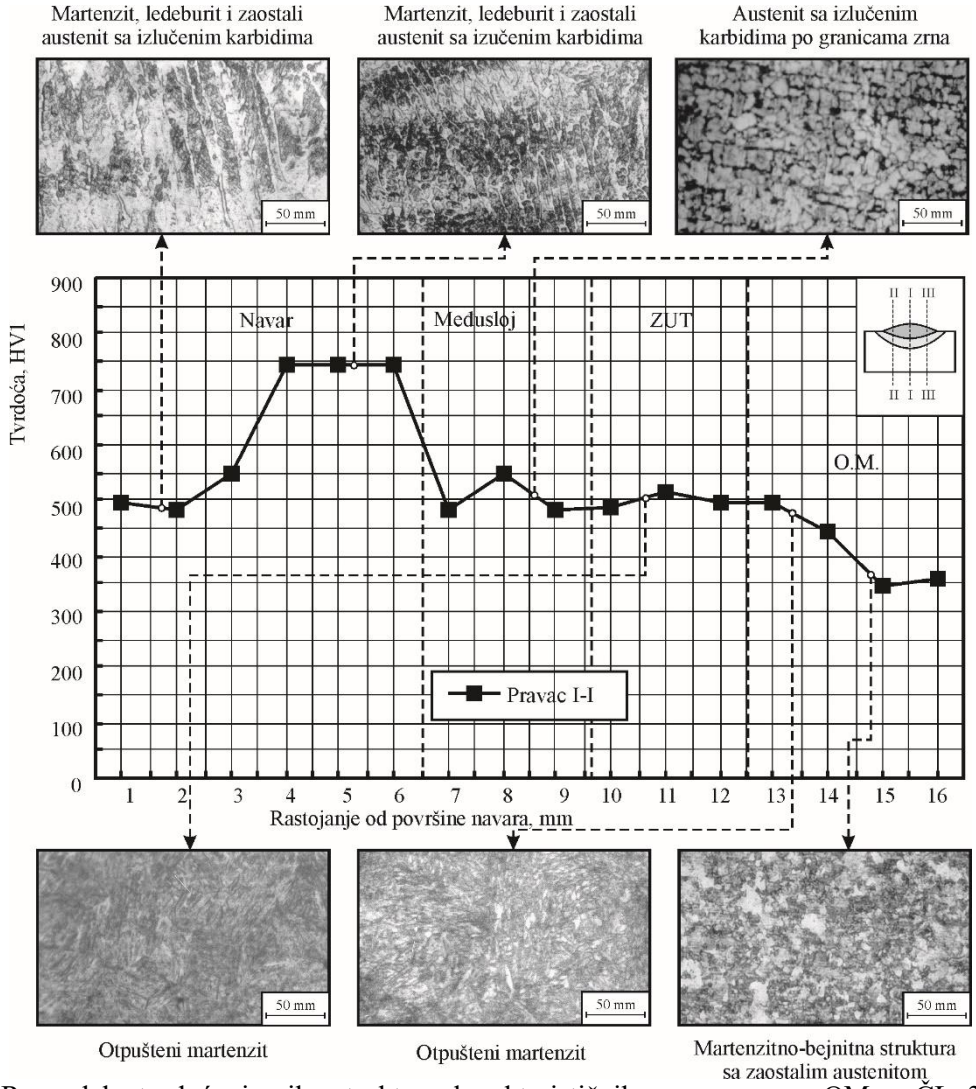
3. METALOGRAFSKA ISPITIVANJA I MERENJE TVRDOĆE ZONA NAVARA

Metalografska ispitivanja izvode se radi utvrđivanja struktura pojedinih zona navara: metala šava, zone uticaja toplote (ZUT-a) i osnovnog materijala (OM), kao i širine ZUT-a, strukturnih grešaka (gasnih mehurova, uključaka troske, oksida, nitrida, mikropreloma, zona naugljeničenja i razugljeničenja, zone zakaljivanja i dr.). Poznavanjem vrednosti tvrdoće u pojedinim zonama navara stiče se slika o otpornosti na habanje, posebno površinskih slojeva navara. Na slici 6 a,b prikazano je isecanje uzorka, a na slici 6c pravci merenja tvrdoće, dok je na slici 7 prikazana je raspodela tvrdoće i mikrostruktura karakterističnih zona navara, dobijena obloženom elektrodom prečnika d_e= 3.25 *mm* na ČL 3134 debljine s= 10 *mm*.



a) b) c)

Slika 6. Način pripreme metalografskih uzoraka (izbrusaka/šlifova): a) isecanje iz dvoslojnog navara, b) isecanje iz troslojnog navara i c) pravci merenja tvrdoće



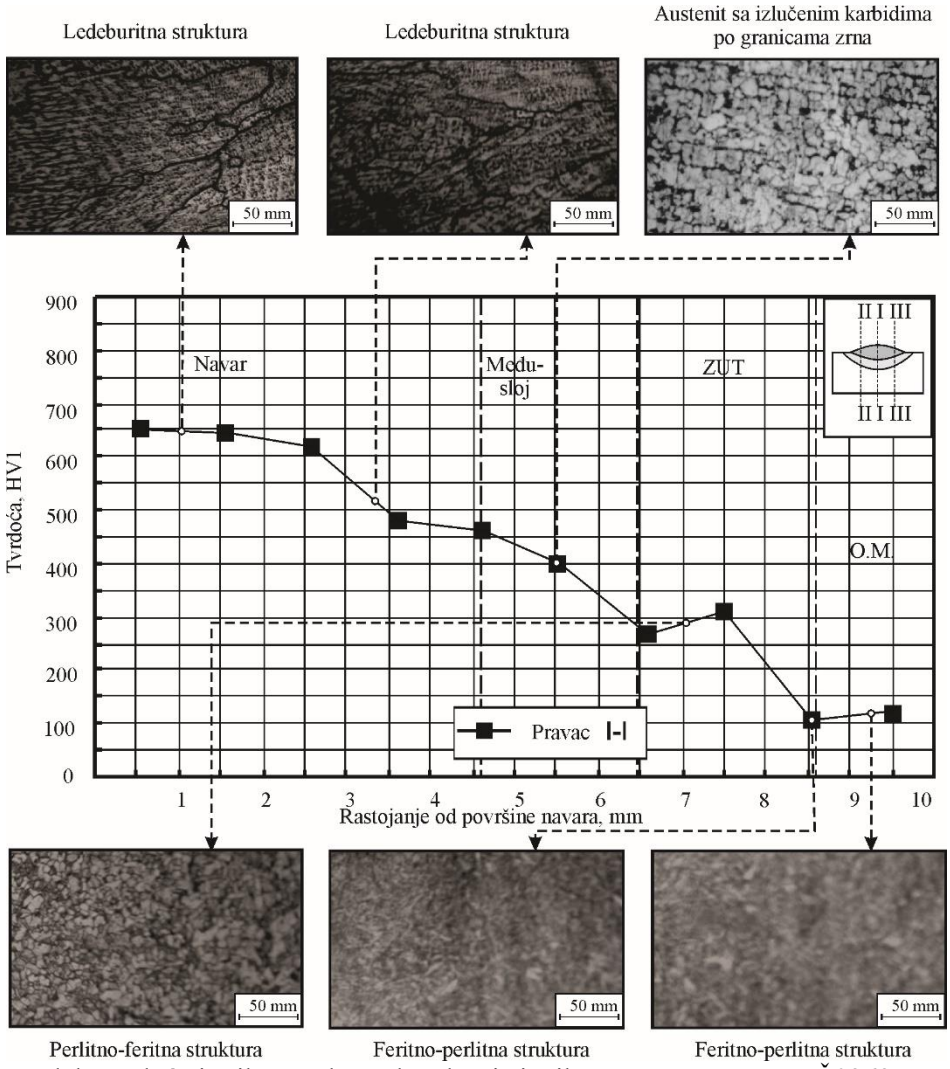
Slika 7. Raspodela tvrdoće i mikrostruktura karakterističnih zona navara: OM – ČL 3134, DM međusloja - INOX B 18/8/6 i DM navara - ABRADUR 58

Navarivanje je izvedeno bez predgrevanja nanošenjem plastičnog međusloja elektrodom INOX B 18/8/6 i dvoslojnog navara elektrodom ABRADUR 58.

U izvornim radovima [1, 2, 8-12] detaljnije se obrađuje ova problematika, a za potrebe ovog rada prikazaće se raspodela tvrdoće i mikrostruktura pojedinih zona navara.

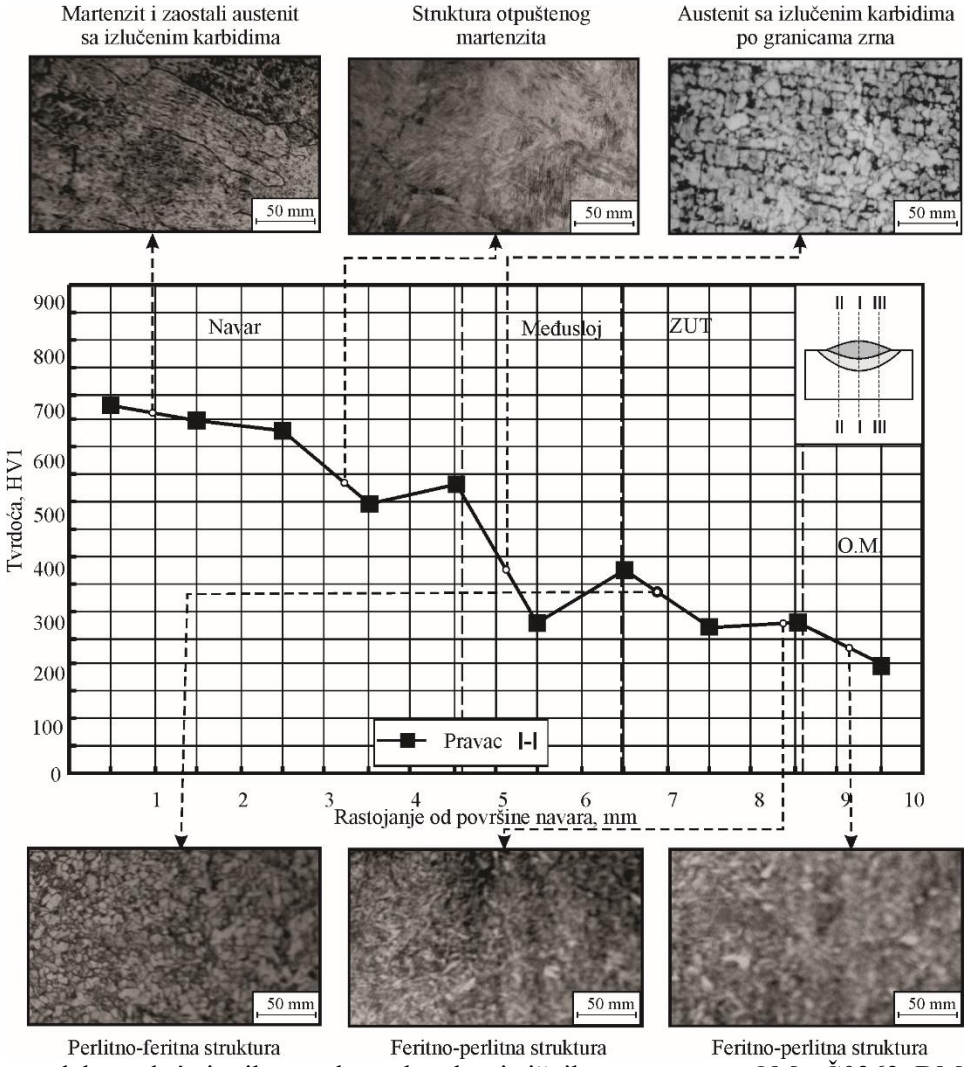
Raspodela trvdoće i mikrostruktura navara u slučaju sa predgrevanjem detaljnije je opisana u radovima [1, 2, 5, 8-13]. Uzgred rečeno, rezultati se bitno ne razlikuju.

Na slici 8 prikazana je raspodela tvrdoće i mikrostruktura karakterističnih zona navara, dobijena obloženom elektrodom prečnika d_e= 3.25 *mm* na Č0363 debljine s= 10 *mm*. Navarivanje je izvedeno nanošenjem prvog plastičnog međusloja elektrodom INOX B 18/8/6 i dvoslojnog navara elektrodom CrWC 600.



Slika 8. Raspodela tvrdoće i mikrostruktura karakterističnih zona navara: OM - Č0363, DM međusloja - INOX B 18/8/6 i DM navara - CrWC 600

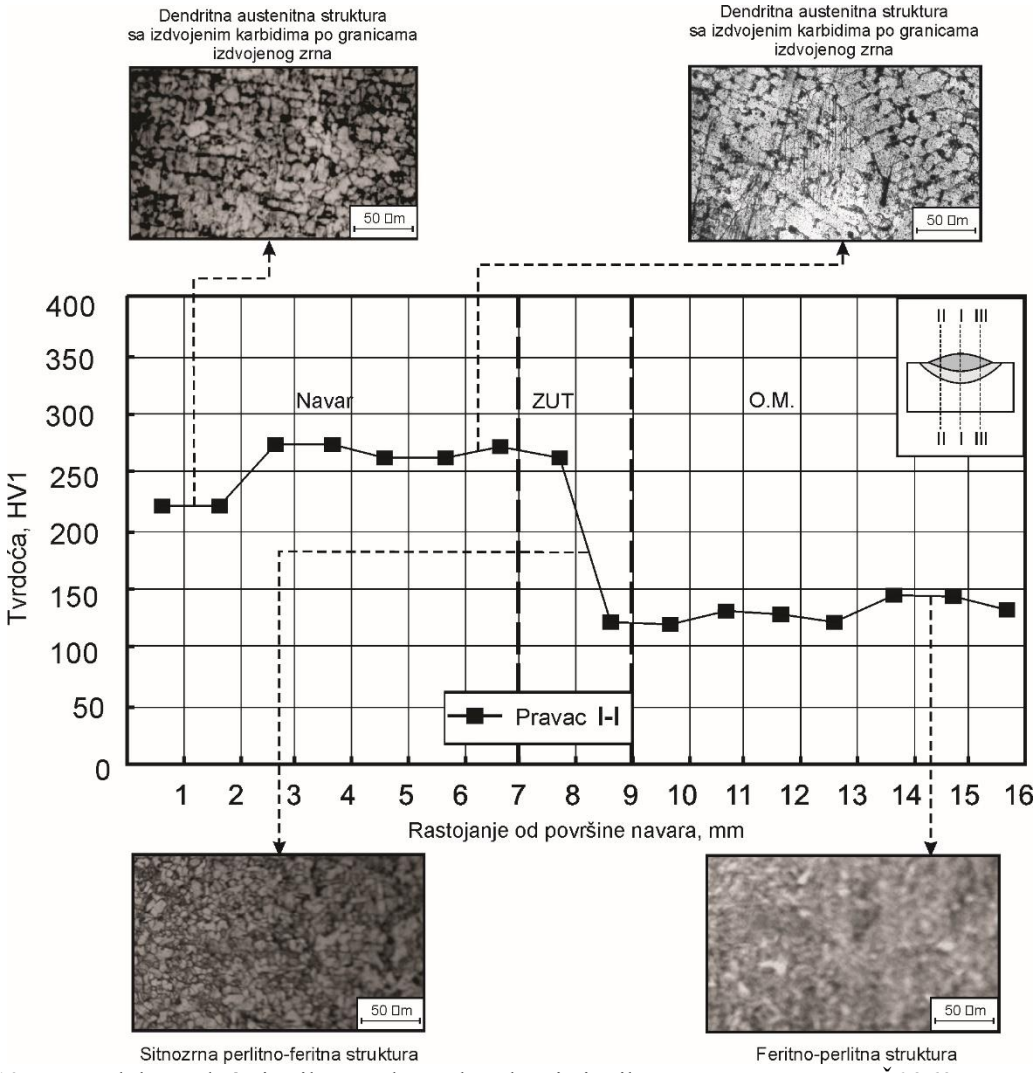
Na slici 9 prikazana je raspodela tvrdoće i mikrostruktura karakterističnih zona navara, izvedena obloženom elektrodom E DUR 600 prečnika d_e= 3.25 *mm* na Č0363 debljine s= 10 *mm*.



Slika 9. Raspodela tvrdoće i mikrostruktura karakterističnih zona navara: OM - Č0363, DM međusloja - INOX B 18/8/6 i DM navara - E DUR 600

Navarivanje je izvedeno nanošenjem prvog plastičnog međusloja elektrodom INOX B 18/8/6 i dvoslojnog navara elektrodom E DUR 600.

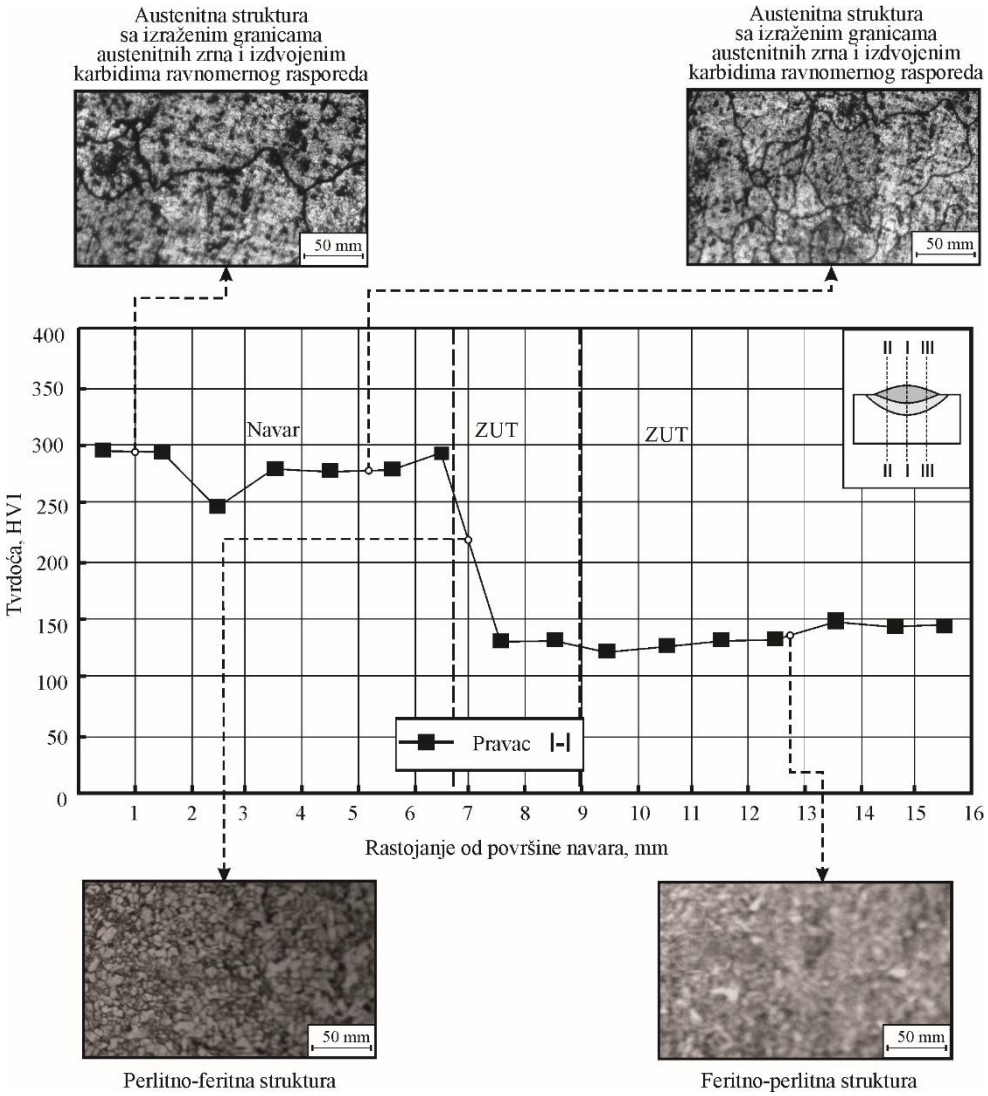
Na slici 10 prikazana je raspodela tvrdoće i mikrostruktura karakterističnih zona navara, dobijena obloženom elektrodom prečnika d_e= 3.25 *mm* na Č0363 debljine s= 10 *mm*. Navarivanje je izvedeno bez predgrevanja nanošenjem dvoslojnog navara elektrodom E Mn 14.



Slika 10. Raspodela tvrdoće i mikrostruktura karakterističnih zona navara: OM - Č0363, ZUT-a i DM navara - E Mn 14

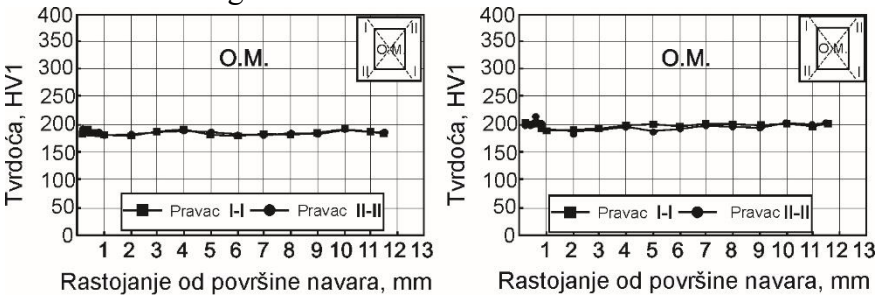
Na slici 11 prikazana je raspodela tvrdoće i mikrostruktura karakterističnih zona navarenog spoja, dobijena obloženom elektrodom prečnika d_e= 3.25 *mm* na Č0363 debljine s= 10 *mm*. Navarivanje je izvedeno bez predgrevanja nanošenjem dvoslojnog navara elektrodom E Mn 17 Cr 13.

Ispitivanje tvrdoće i mikrostrukture, pre i posle plastične deformacije na hladno kod manganskih austenitnih čelika, izvedeno je na osnovnim materijalima ČL 3160 i ČL 3460, kao i čistim metalima navara od dodatnih materijala E Mn 14 i E Mn 17 Cr 13 [1].



Slika 11. Raspodela tvrdoće i mikrostruktura karakterističnih zona navara: OM - Č0363, ZUT-a i DM navara - E Mn 17 Cr 13

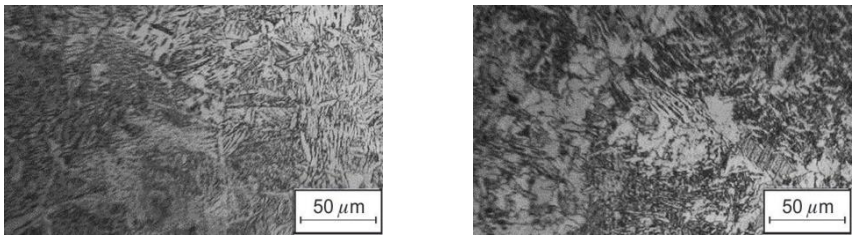
Na slici 12 prikazana je raspodela tvrdoće po preseku uzoraka pre plastične deformacije na hladno kod austenitnih manganskih čeličnih livova ČL 3160 i ČL 3460.



a) b)

Slika 12. Raspodela tvrdoće po preseku osnovnog materijala pre plastične deformacije: a) OM – ČL 3160 i b) OM – ČL 3460

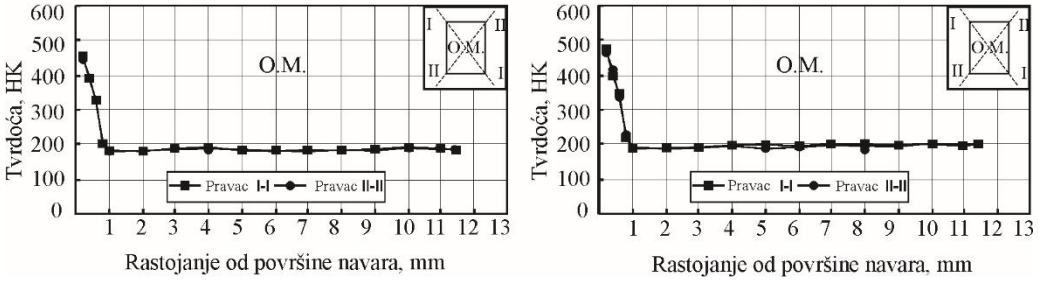
Na slici 13 prikazana je mikrostruktura pre plastične deformacije na hladno čeličnih livova ČL 3160 i ČL 3460.



a) Austenitna struktura b) Austenitna struktura

Slika 13. Mikrostruktura površinskog sloja osnovnog materijala pre plastične deformacije: a) OM - ČL3160; b) OM - ČL3460

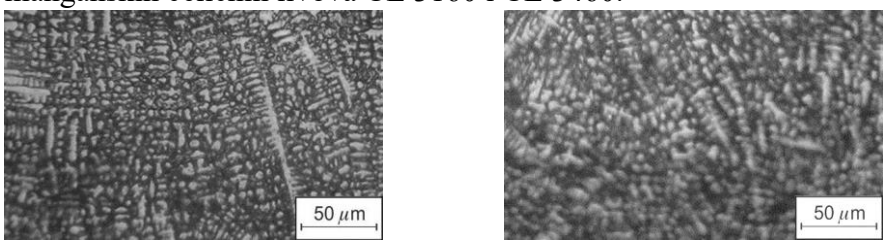
Na slici 14 prikazana je raspodela tvrdoće po preseku uzoraka posle plastične deformacije na hladno kod austenitnih manganskih čeličnih livova ČL 3160 i ČL 3460.



a) b)

Slika 14. Raspodela tvrdoće po preseku osnovnog materijala posle plastične deformacije: a) OM – ČL 3160 i b) OM – ČL 3460

Na slici 15 prikazana je mikrostruktura posle plastične deformacije na hladno kod austenitnih manganskih čeličnih livova ČL 3160 i ČL 3460.



a) Martenzitna struktura b) Martenzitna struktura

Slika 15. Mikrostruktura površinskog sloja osnovnog materijala posle plastične deformacije: a) OM – ČL 3160 i b) OM – ČL 3460

Ovde prikazana skraćena metalografska ispitivanja poslužila su za proveru tvrdoće pojedinih zona navara i očitavanje mikrostrukture, sve u cilju izbora najpovoljnije tehnologije navarivanja koja će se sprovesti na realnim delovima. Treba napomenuti da ovde nije posebno analizirana raspodela tvrdoće i mikrostruktrura navara ostvarenih elektrodama E Mn14 i E Mn17Cr13, jer su rezultati slični OM. Razume se, u uslovima pre i posle hladne deformacije [1, 2, 5-7, 12, 13].

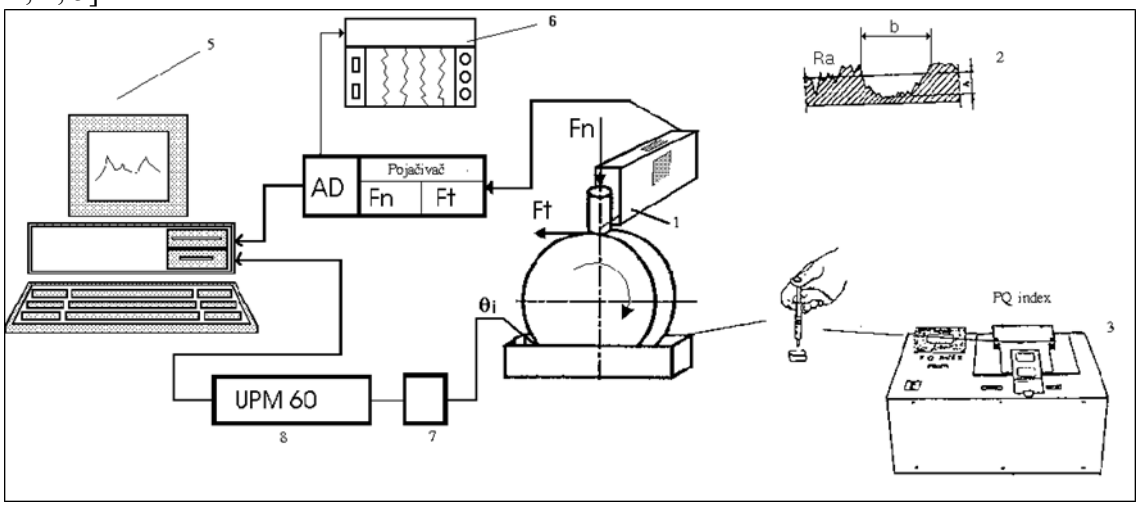
4. TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA OSNOVNOG MATERIJALA I NAVARA

Tribometar TPD-93, razvijen je u Centru za revitalizaciju industrijskih tehničkih sistema na Fakultetu inženjerskih nauka u Kragujevcu. Konstruisan je za ispitivanje triboloških svojstava različitih materijala. Omogućava ostvarivanje kontakata spregnutih parova u tački, po liniji i po površini. Omogućava ispitivanja sa sredstvom za podmazivanje ili bez njega. Detaljnije videti u literaturi [1, 2, 4, 9-11].

Tribometar je opremljen odgovarajućom merno-regulacionom i računarskom opremom

radi boljeg registrovanja izlaznih podataka, dok su univerzalni alatni mikroskop UIM-21 i uređaj za merenje hrapavosti TALYSURF 6 pomoćna i neophodna sredstva za ispitivanje [1, 2, 4, 5, 10, 11].

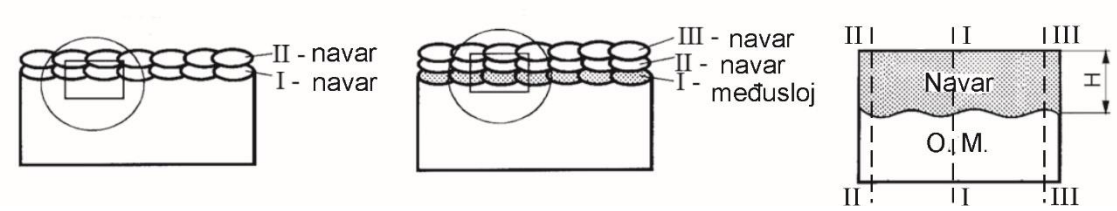
Na slici 16. dat je shematski prikaz merne i računarske opreme za tribološka ispitivanja [1, 2, 4, 5].



Slika 16. Shematski prikaz merne i računarske opreme za tribološka isitivanja

Da bi se izveli tribološki testovi neophodno je bilo pripremiti uzorke/blokove iz OM i DM. Cilj je bio provera koeficijenata trenja (utrošak energije) i širina tragova habanja (otpornost na habanje), pri istim ulaznim parametrima i podmazujućem sredstvu.

Blokovi su pripremani sečenjem iz navarenih modela na isti način i pri istim uslovima kao što su pripremani metalografski uzorci (izbrusci) koji su korišćeni za metalografska ispitivanja. Sečenje materijala za izradu blokova je izvedeno uz intenzivno hlađenje da ne bi došlo do promene mikrostrukture, a zatim su brušeni na odgovarajuće dimenzije, takođe uz intenzivno hlađenje. Na isti način su izrađeni blokovi od osnovnih materijala. Svi blokovi su obrušeni na dimenzije 6.3×15×10 *mm*. Način pripreme blokova isecanjem iz fizičkih modela izrađenih nanošenjem dvoslojnih i troslojnih navara prikazan je na slici 17a,b, a skica jednog gotovog bloka sa pravcima merenja tvrdoće je data na slici 17c.



a) b) c)

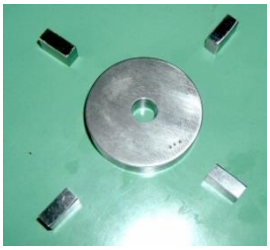
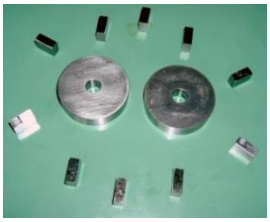
Slika 17. Način pripreme blokova za tribološka ispitivanja: a) sečenje bloka iz dvoslojnog navara, b) sečenje bloka iz troslojnog navara i c) izgled bloka

Diskovi za tribološka ispitivanja su izrađeni od Č5430 u poboljšanom stanju, a potom fino obrušeni. Pripremljeno je tri diska istih dimenzija prečnika D= 50 *mm* i debljine s= 10 *mm*. Tvrdoća diskova, posle termičke obrade, merena je po njihovom obimu i to po deset merenja za svaki disk. Vrednosti izmerene tvrdoće kod sva tri diska su bile u opsegu 50-55 HRC. Ova tri diska poslužila su za ispitivanja svih materijala navara i osnovnih materijala. Posle svakog ispitivanja izvedeno je brušenje uz intenzivno hlađenje kontaktnih površina, sa istom brusnom pločom, kako bi se zadržala ista hrapavost kontaktnih površina, a ispitivanje za sve materijale izvelo u istim uslovima.

Izgled pripremljenih blokova i diskova za tribološka ispitivanja prikazan je u tablici 10,

kao i blokova od punjenih žica koji ovom prilikom neće biti detaljnije razmatrani [1].

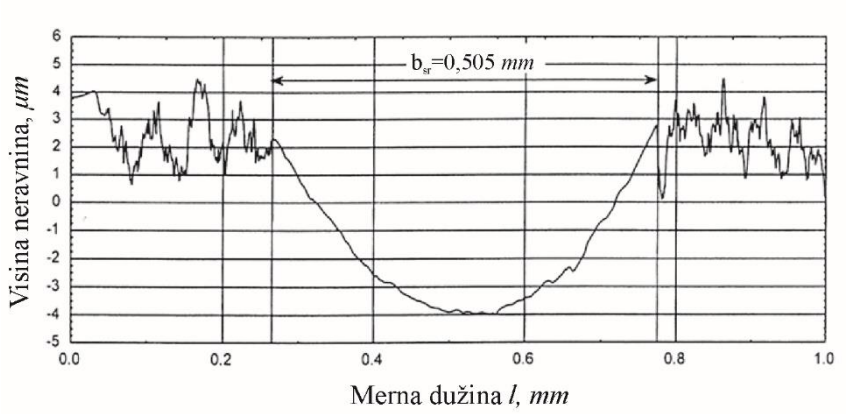
Tablica 10. Vrste blokova i diskovi za tribološka ispitivanja

Broj uzorka	Materijal podloge	Materijal navara	Broj navarenih slojeva	Visina navara, *mm*	Izgled blokova i diskova
Blok 1	ČL 3134	INOX B 18/8/6 ABRADUR 58	3*	8.2-9.5	
Blok 2.	ČL 3134	ABRADUR 58	2	6.2-6.5	
Blok 3	ČL 3134	-	-	-	
Blok 4	Č0363	INOX B 18/8/6 CrWC 600	3*	4.5-6.0	
Blok 5	Č0363	INOX B 18/8/6 E DUR 600	3*	4.2-6.6	
Blok 6	Č0363	E Mn 14	2	6.0-8.2	
Blok 7	Č0363	E Mn17Cr13	2	6.2-7.0	
Blok 8	Č0363	FILTUB 12 B FILTUB DUR 16	3*	6.5-7.2	
Blok 9	Č0363	FILTUB DUR 16	2	4.8-6.2	
Blok 10	Č4732	-	-	-	
Blok 11	Č4830	-	-	-	
Blok 12	ČL 4150	-	-	-	
Blok 13	ČL 3460	-	-	-	
Blok 14	Č0363	-	-	-	
Blok 15	Č0645	-	-	-	
Blok 16	Č2330	-	-	-	
Disk-3 kom	Č5430	-	-	-	

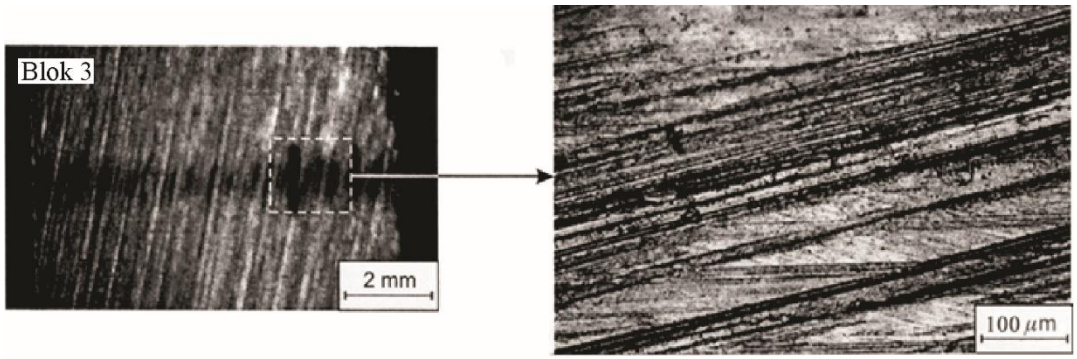
Odabrani i usvojeni ulazni parametri ovog složenog i obimnog tribološkog testa su: normalna sila F_N= 300 *N*, brzina klizanja v_{kl}= 1 *m*/s i vreme ispitivanja t= 60 min. Ulazni parametri ovih triboloških ispitivanja nisu varirani, da bi se dobili rezultati pri istim uslovima ispitivanja za sve ispitivane materijale, radi njihovog jednostavnijeg poređenja. Kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje pri ovom tribološkom testu korišćeno je motorno ulje SAE 15W-40.

Od izlaznih parametara za vreme tribološkog testa, mereni su i praćeni: sila trenja (F_T), koeficijent trenja (μ) i parametri mikrogeometrije. Od parametara mikrogeometrije praćena je promena hrapavosti kontaktnih površina i trag habanja, odnosno širina i dubina traga habanja.

Na slici 18 [1, 2] prikazan je pojas habanja bloka br. 3, koji se u literaturi ponekad naziva i kraterom habanja, dok je na slici 19 prikazan fizički izgled stvarnog oštećenja.

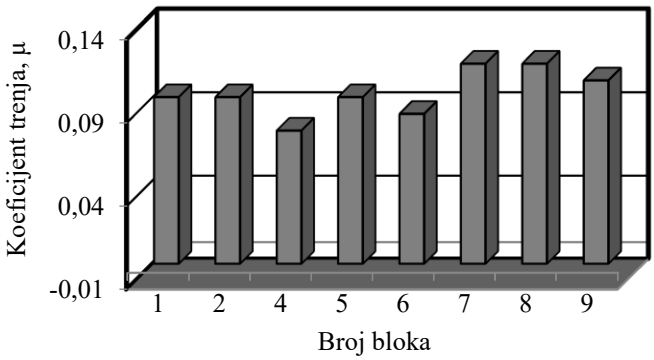


Slika 18. Hrapavost kontaktne površine bloka br. 3 pre triboloških ispitivanja



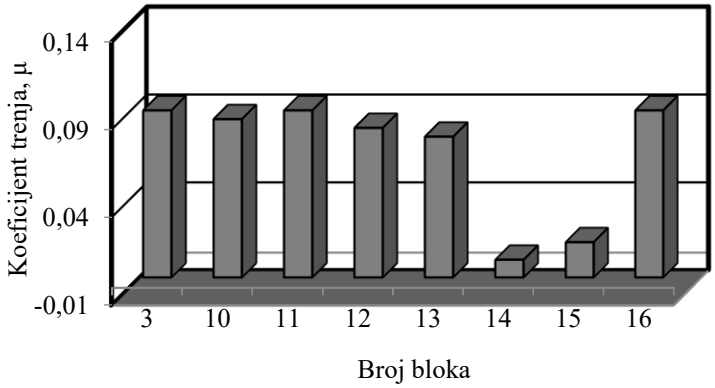
Slika 19. Makroskopski i mikroskopski izgled tragova habanja kod navara

Izmerene srednje vrednosti koeficijenta trenja za vreme triboloških ispitivanja, kod blokova izrađenih od različitih vrsta dodatnih materijala za navarivanje, histogramski su prikazane na slici 20 (prema tablici 10).



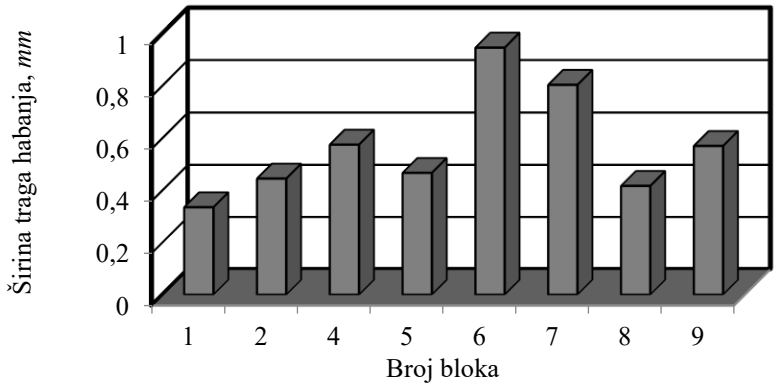
Slika 20. Histogramski prikaz srednjih vrednosti koeficijenta trenja kod navara

Na slici 21 dat je histogramski prikaz srednjih vrednosti koeficijenata trenja izmerenih kod blokova ispitivanih različitih osnovnih materijala.



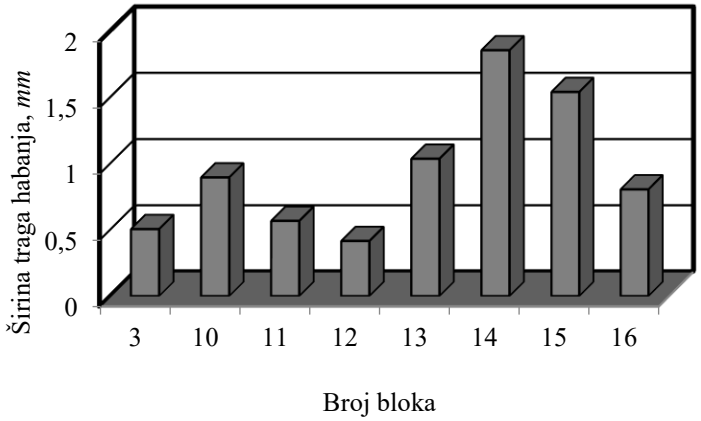
Slika 21. Histogramski prikaz srednjih vrednosti koeficijenta trenja kod osnovnih materijala

Na slici 22 dat je histogramski prikaz srednje širine tragova habanja kod blokova pripremljenih iz navara.



Slika 22. Histogramski prikaz srednjih vrednosti izmerenih širina tragova habanja kod blokova pripremljenih iz navara

Na slici 23 dat je grafički prikaz srednje širine tragova habanja kod blokova izrađenih od osnovnih materijala.

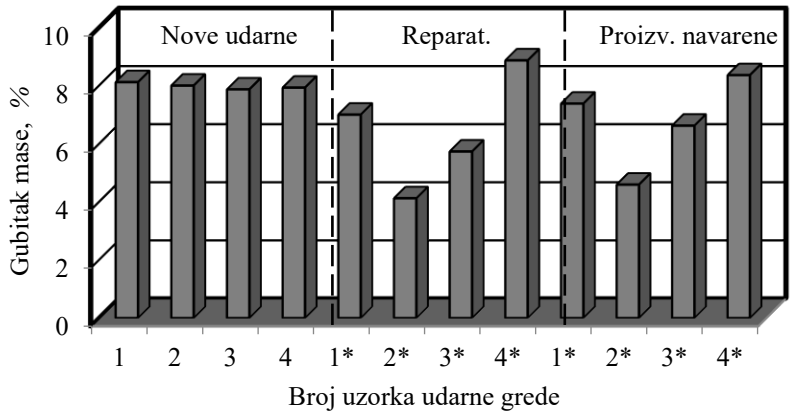


Slika 23**.** Grafički prikaz srednjih vrednosti izmerenih širina tragova habanja kod osnovnih materijala

5. REALNA ISPITIVANJA UDARNIH GREDA

Posle izvedenih eksperimentalnih ispitivanja pristupilo se navarivanju udarnih greda. Opredelili smo se za četiri dodatna materijala: 1 - E Mn14, 2 - E Mn17Cr13, 3 - E DUR 600 i 4 - ABRADUR 58. Grede su montirane na drobilicu i u toku rada praćen je stepen njihovog oštećenja, odnosno merena masa. Pri pohabanosti jedne strane oko 10%, grede su okretane i radu je podvrgavana druga strana. Posle habanja obe strane, grede su skidane. Merena je njihova masa i analizirana vrsta pohabanosti. Navedeni postupak se po sličnom principu primenjivao za nove, oštećene i proizvodno navarene grede. Suprotno rezultatima dobijenim na tribometru, dodatni manganski materijali su pokazali znatno veću otpornost na habanje od elektroda za tvrdo navarivanje. Ovo je značajan rezultat ovih ispitivanja.

Na slici 24 histogramski su prikazani procentualni gubici mase ispitivanih uzoraka udarnih greda, kako nenavarenih novih, tako i proizvodno ili reparaturno navarenih, posle 60 sati rada.



*Napomena: 1 - DM - E Mn14; 2 - DM - E Mn17Cr13; 3 - DM-E DUR 600; 4 - DM-ABRADUR 58

Slika 24. Histogramski prikaz otpornosti na habanje realno ispitivanih udarnih greda

6. ZAKLJUČCI

Cilj ovog rada jeste da ukaže stručnoj i naučnoj javnosti da je reparaturno navarivanje gotovo uvek tehno-ekonomski isplativo i opravdano ako se ovom poslu priđe kao odgovornom tehničko-tehnološkom zadatku, a ne silom izazvanim problemom. Pokušali smo da prikažemo samo deo rezultata ovog složenog eksperimenta. Ograničili smo se na izbor najpovoljnije tehnologije zavarivanja samo na osnovu metalografskih i triboloških ispitivanja. To ponekad nije dovoljno za pravilan izbor tehnologije reparaturnog zavarivanja oštećenih udarnih greda.

Na osnovu metalografskih i triboloških ispitivanja utvrđena je polazna tehnologija navarivanja, koja je zatim "preneta" na realne delove. Detaljnom analizom strukture i tvrdoće pojedinih zona navara, kao i dopunskim trubološkim testovima, može se steći dosta pouzdana slika o ponašanju delova i u realnim uslovima. Ipak, ovde se pokazalo da tribološki test ne daje pouzdane rezultate kad su u pitanju čelični livovi austenitne strukture. Na osnovu dobijenih rezultata tribološkog testa mogla bi se steći slika da su elektrode tipa ABRADUR 58, E DUR 600 i CrWC 600 mnogo pogodnije od E Mn14 i E Mn17Cr13, što nije pouzdano kad je u pitanju udarno abrazivno habanje. Lokalna transformacija austenita u martenzit nije moguća na tribometru zbog uslova kontakta. Ovde je reč o klizanju, a ne o udarno pritisnom opterećenju koje se inače odvija u realnom radnom procesu i omogućuje transformaciju austenita u martenzit u pripovršinskim kontaktnim slojevima [1, 2, 5].

Iako predmet ovog rada nije bila analiza tehno-ekonomske opravdanosti navarivanja udarnih greda, usput treba spomenuti da je jedna udarna greda analizirane drobilice mase oko 300 *kg* i cene oko 2500 eura, dok je kompletna reparatura četiri oštećene udarne grede manja od 2500 eura. Kriterijum zamene jedne strane udarnih greda je oko 10% pohabanosti radne površine, a radni vek oko 75 radnih sati. Navarivanjem oštećene površine ne ostvaruje se bitno produženje radnog veka, ali se skraćuje vreme nabavke i prave velike uštede u skupom materijalu [1, 13].

~~7.~~ LITERATURA

1. M. Mutavdžić, Modeliranje reparaturnog i proizvodnog navarivanja radnih delova građevinske mehanizacije, doktorska disertacija, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, 2015.
2. V. Lazić, D. Arsić, Regeneracija površina, Monografija, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, ISBN 978-86-6335-088-51, 2021.
3. SIJ Jesenice, katalog dodatnih materijala, Slovenija.
4. D. Arsić, V. Lazić, S. Mitrović, D. Džunić, S. Aleksandrović, M. Đorđević, B. Nedeljković, Tribological behavior of four types of filler metals for hard facing under dry conditions, Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 68, No. 6, pp. 729-736, Doi 10.1108/ILT-10-2015-0156, 2016
5. V. Lazić, M. Mutavdžić, R. Nikolić, S. Aleksandrović, D. Milosavljević, Teorijsko-eksperimentalna procena radnog veka navarenih slojeva izvedenih austenitnim manganskim elektrodama, XIV Naučno-stručna konferencija o železnici - ŽELKON, Niš, 7. i 8. oktobar 2010, 317-320.
6. V. Lazic, A. Sedmak, D. Milosavljevic, I. Nikolic, S. Aleksandrovic, R. Nikolic, M. Mutavdzic, Theoretical and experimental estimation of the working life of machine parts hard faced with austenite-manganese electrodes, Materiali in tehnologije/Materials and technology 46 (2012) 5, 547–554.
7. M. Mutavdžić, V. Lazić, M. Jovanović, D. Josifović, B. Krstić: Izbor optimalne tehnologije reparaturnog navarivanja udarnih greda rotacionih drobilica, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, (2/2007), str. 55-67.
8. V. Lazić, M. Jovanović, D. Milosavljević, M. Mutavdžić, R. Čukić: Choosing of the most suitable technology of hard facing of mixer blades used in asphalt bases, Tribology in Industry, Journal of Serbian Tribology Society, 1&2/2008., pp. 3-10.
9. M. Mutavdžić, R. Čukić, M. Jovanović, D. Milosavljević, V. Lazić: Model investigations of the filler materials for regeneration of the damaged parts of the construction mechanisation, Tribology in Industry, Journal of Serbian Tribology Society, 3&4/2008., pp. 3-9.
10. V. Lazić, D. Milosavljević, S. Aleksandrović, G. Bogdanović, B. Nedeljković: Carbide type influence on tribological properties of the hard faced steel layer – part I – theoretical considerations, Tribology in Industry, Vol. 32, No. 2, 2010., pp. 11-20.
11. V. Lazić, D. Milosavljević, S. Aleksandrović, G. Bogdanović, B. Nedeljković: Carbide type influence on tribological properties of the hard faced steel layer – part II – experimental results, Tribology in Industry, Vol. 32, No. 3, 2010, pp. 3-12.
12. E. A. Aleshina, O. V. Sizova, E. A. Kolubaev, S. V. Konovalov, and V. E. Gromov, Formation of Structural–Phase Statesof the Surface of Hadfield Steel, Siberian State Industrial University, Russia, 2007.
13. R. Čukić, Tehno-ekonomska analiza proizvodnog i reparaturnog zavarivanja i navarivanja različitih delova tehničkih sistema, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, 2010.