

SERBIATRIB`07
10th International Conference on Tribology
and
WORKSHOP`07
Sustainable Development in Industry by Apply Tribology Knowledge

**TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA NAVARENIH SLOJEVA
RADNIH DELOVA GRAĐEVINSKIH MAŠINA**

M. Jovanović¹, M. Mutavdžić², V. Lazić¹, N. Ratković¹, R. Čukić¹

¹⁾ *Mašinski fakultet u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac*

²⁾ *Preduzeće za puteve Kragujevac, Tanaska Rajića 16, 34000 Kragujevac*

Rezime

U ovom radu analizira se postupak triboloških ispitivanja navarenih slojeva u cilju utvrđivanja kvaliteta različitih dodatnih materijala. Reč je uglavnom o delovima građevinske mehanizacije, kao što su zubi kašike utovarivača, udarne grede drobilica, lopatice mešalica za asfalt, noževi za ravnanje terena i tsl., koji su izloženi udarnim opterećenjima i rade u složenim uslovima trenja i habanja. Ispitivanja na modelima ukazuju na to da presudan uticaj na izlazne osobine navarenog sloja, pored primenjene tehnologije, ima vrsta dodatnog materijala. U zavisnosti od uslova rada dela, odnosno dominantne vrste habanja, bira se najpovoljniji dodatni materijal odnosno tehnologija navarivanja. Rezultati ovog rada ukazuju na pravilan izbor dodatnog materijala i tehnologije navarivanja, presudni za mikrostrukturu i tvrdoću navarenog sloja, odnosno otpornost na habanje.

Ključne reči: *tribološka ispitivanja, navarivanje, habanje, koeficijent trenja, trag habanja*

1. Uvod

Posle početnog izbora dodatnog materijala, postupka i tehnologije navarivanja, treba izabrati najpovoljniju tehnologiju reparature i odgovarajući dodatni materijal, koji najviše odgovaraju predviđenim uslovima rada svakog konkretnog radnog dela. U tom smislu potrebna su prethodna, modelska i realna ispitivanja. Modelska ispitivanja obuhvataju probna navarivanja različitim dodatnim materijalima na odgovarajućim uzorcima, iz kojih se pripremaju uzorci za metalografska, tribološka i druga ispitivanja. Tribološka ispitivanja u najvećem broju slučajeva omogućavaju pravilan izbor najpovoljnije tehnologije reparature radnih delova građevinskih mašina.

Rezultati ovog rada ukazuju na proceduru izbora najpovoljnije tehnologije reparature i dodatnog materijala, posebno kad deluju složeni mehanizmi habanja različitog intenziteta (naročito abrazivno i udarno).

2. Pregled radnih delova građevinske mehanizacije namenjenih navarivanju

Gotovo svi delovi građevinskih mašina koji su u direktnom kontaktu sa građevinskim materijalom, pored procesa habanja, izloženi su istovremeno i procesima korozije [1, 3, 5, 6, 7, 8, 11, 12]. Složenim procesima habanja različitog intenziteta, a istovremeno i koroziji najviše su izloženi sledeći radni delovi građevinskih mašina: udarne grede rotacionih drobilica, obloge drobilica, zubi kašike utovarivača, spiralni transporter, elevatori, delovi klasifikatora materijala, doboši za usitnjavanje materijala manje tvrdoće, delovi sitare za prosejavanje materijala, lopatice mešalica za asfalt, lopatice mešalica za beton, tela utovarnih kašika, lopatice i obloge sušara stenskih materijala, delovi mešalica i presa za izradu opeke, noževi građevinskih mašina za ravnanje i rasprostiranje zemlje i građevinskog materijala, obloge uređaja za transport i skladištenje asfalta i cementa i dr. [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Za eksperimentalna istraživanja u ovom radu odabrali smo zube kašika utovarivača, lopatice mešalica i udarne grede drobilica.

3. Izbor dodatnog materijala i parametara navarivanja

Dodatni materijali za navarivanje biraju se, zavisno od vrste habanja, načešće na osnovu preporuka proizvođača, ali je potrebno u konkretnim radnim uslovima obaviti proveru njihovih svojstava. Određivanje triboloških

svojstava, mikrostrukture i tvrdoće navara navedenih dodatnih materijala E DUR 600, CrWC 600, ABRADUR 58, E Mn14 i E Mn17Cr13 (tab. 1) i dobijeni rezultati, biće u celosti prikazani prema proceduri sprovedenoj u nekim našim radovima [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Tablica 1. Svojstva analiziranih dodatnih materijala [10]

| Uporedne oznake elektroda | | Hemijski sastav, % | | | | | Namena |
|---------------------------|---------------|--------------------|-------|-------|-----|-----|--|
| Fiprom-Jesenice | DIN 8555 | C | Mn | Cr | W | Mo | |
| 1. E DUR 600 | E 6-UM-60 | 0.5 | - | 7.5 | | - | Za nanošenje tvrdih navara od kojih se zahteva vrlo visoka otpornost na habanje pri radu u hladnom i vrućem stanju i dobra žilavost i otpornost na udare i smicanje. Tvrdoća navara 57-62 HRC. |
| 2. CrWC 600 | E 10-UM-60-C | 4.0 | - | 26.0 | 4.0 | - | Za nanošenje izuzetno tvrdih navara sa visokim sadržajem Cr i W karbida koji imaju veliku otpornost na habanje pri obradi stenskih materijala ali nisu dovoljno otporni prema udarima i smicanju. Tvrdoća navara 60 HRC. |
| 3. ABRADUR 58 | E 10-UM-60-GR | 3.6 | - | 32.0 | | - | Navarivanje alata izložnih intenzivnom abrazivnom habanju sa mineralima u hladnom stanju. Tvrdoća navara 57-62 HRC. |
| 4. E Mn14 | E7-UM-200-KP | 1.20 | 12.50 | - | | 0.7 | Za navarivanje manganskih čelika debljine do 10 mm koji se upotrebljavaju za izradu delova na železnici i delova drobilica. Tvrdoća navara pre iskivanja na hladno je oko 225 HB, odnosno posle iskivanja oko 48 HRC. |
| 5. E Mn17Cr13 | - | 0.60 | 16.50 | 13.50 | | - | Za navarivanje batova hidrauličnih presa, delova utovarnih kašika građevinske mehanizacije, delova drobilica, železničkih šina i ukrsnica. Tvrdoća navara pre iskivanja na hladno je oko 225 HB, odnosno posle iskivanja oko 50 HRC. |

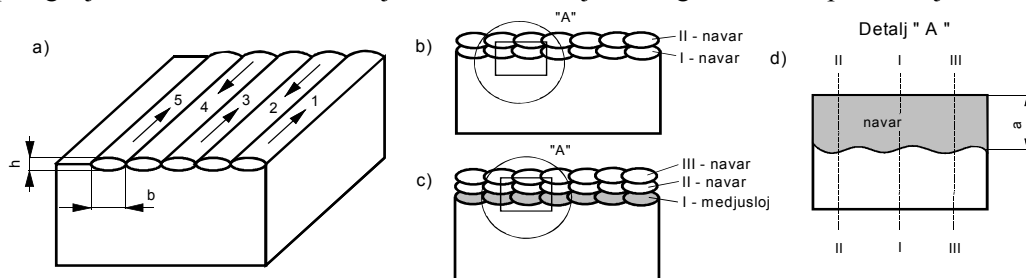
Za izbor tehnoloških parametara navarivanja i rangiranje podobnosti raspoloživih elektroda izveli smo eksperimentalna navarivanja na niskougljeničnom čeliku Č0361, a ne na materijalu od koga su izrađeni stvarni delovi. Za ovu zamenu bilo je više razloga: (1) Č0361 se može navarivati bez predgrevanja, (2) daje iste uslove navarivanja sa različitim dodatnim materijalima i (3) omogućuje se rangiranje različitih dodatnih metala za navarivanje.

Početni rezultati ovih eksperimenata naveli su autore ovog rada na ideju da neke delove građevinskih mašina izrade od mekog čelika, a da radne ivice tih delova ojačaju tvrdim navarivanjem. Sva navarivanja na modelima (probnim uzorcima) izvođena su u laboratorijskim uslovima postupkom REL. Iz rezultata ovih eksperimentalnih ispitivanja proistekli su tehnološki parametri navarivanja za 5 različitih vrsta elektroda datih u tablici 2 [13].

Tablica 2. Tehnološki parametri navarivanja modela REL postupkom

| Debljina O.M. | Oznaka elektrode Fiprom-Jesenice | Prečnik jezgra elektrode d_e , mm | Struja navarivanja I , A | Radni napon U , V | Brzina navarivanja v_z , cm/s | Pogonska energija navarivanja q_l , J/cm |
|----------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------------|--|
| s= 10 do 25 mm | 1. E DUR 600 | 3.25 | 120 | 25 | 0.119 | 20168 |
| | 2. CrWC 600 | 3.25 | 125 | 25 | 0.116 | 21552 |
| | 3. ABRADUR 58 | 3.25 | 130 | 25 | 0.124 | 20968 |
| | 4. E Mn14 | 3.25 | 120 | 25 | ≈ 0.148 | 16216 |
| | 5. E Mn17Cr13 | 3.25 | 130 | 25 | ≈ 0.152 | 17105 |

Način polaganja navara, redosled i broj nanetih slojeva i izgled modela prikazan je na slici 1.

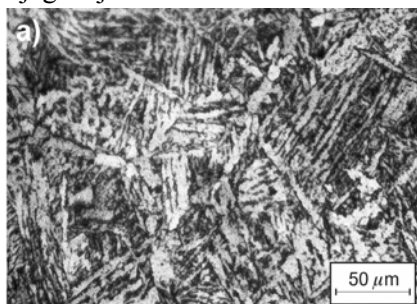


Slika 1. Redosled polaganja navara pri izradi modela: a - 1 sloj, b - 2 sloja, c - 3 sloja, d- metalografski izbrusak (blok)

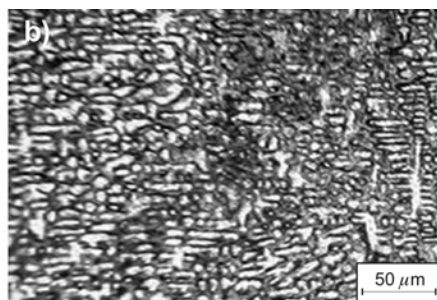
Sa slike se vidi da su neki modeli izrađeni polaganjem međusloja velike plastičnosti, a zatim su dalje navarivani u dva sloja korišćenjem različitih vrsta elektroda. Polaganje navara izvedeno je elektrodom prečnika $d_e = 3.25 \text{ mm}$, pri čemu su navari uglavnom bili jednoprolazni širine $b = 8-10 \text{ mm}$ i visine $h = 3.2-3.5 \text{ mm}$. Pri izvođenju modelskih ispitivanja nije primenjivana ni prethodna niti naknadna termička obrada. Uzorci su posle navarivanja hlađeni na mirnom vazduhu, a zatim je brušenjem odstranjen deo materijala poslednjeg sloja.

4. Metalografska ispitivanja i merenje tvrdoće na modelima

Merenje tvrdoće (pravac I-I, sl. 1d) i ispitivanje novonastalih mikrostruktura u karakterističnim zonama navara izvedeno je na metalografskim izbruscima (šlifovima). Samo neki karakteristični primeri, koji se odnose na raspodelu tvrdoće i mikrostrukturu pojedinih zona navara, prikazani su na slikama 2, 3 i 4, dok su ostali rezultati dati u radovima [1, 3, 5, 6, 7, 8].

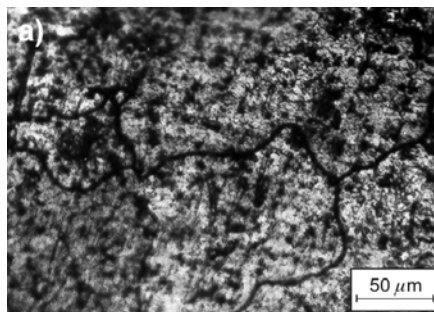


Austenitna struktura sa izlučenim karbidima (pre plastične deformacije)

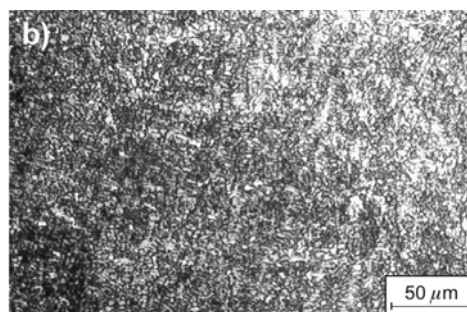


Martenzitno-karbidna struktura (posle plastične deformacije)

Slika 2. Mikrostruktura navara: D.M. E Mn14

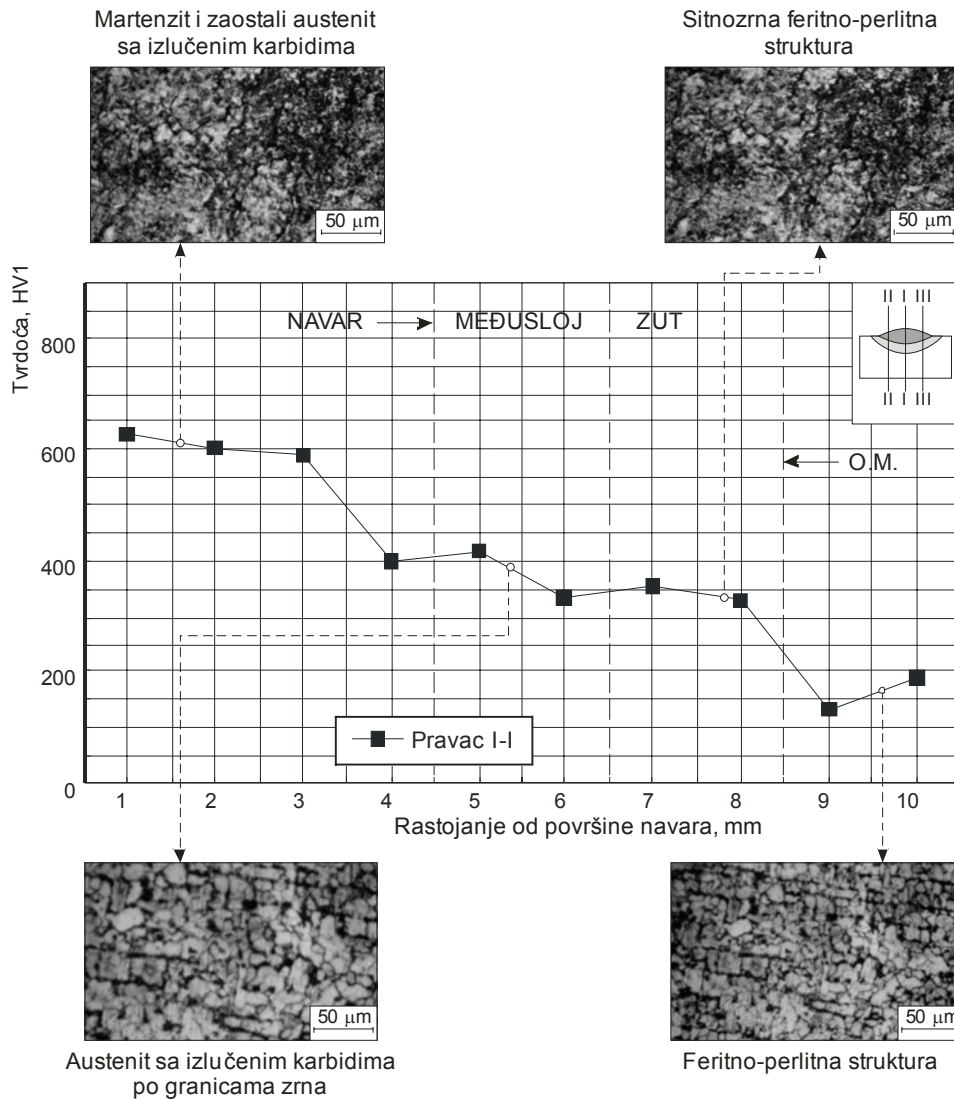


Austenitno-bejnitna struktura sa izlučenim karbidima (pre plastične deformacije)



Sitnozrna martenzitna struktura sa karbidima (posle plastične deformacije)

Slika 3. Mikrostruktura zadnjeg sloja navara: D.M. E Mn17Cr13



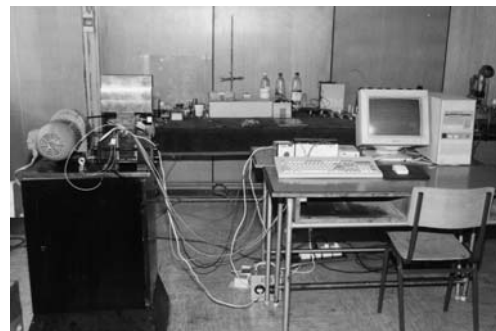
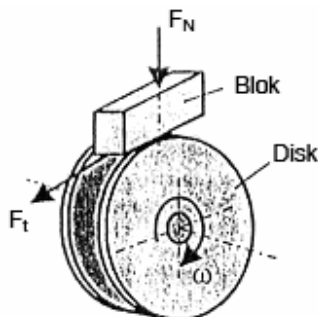
Slika 4. Mikrostruktura pojedinih zona navara: OM-Č0361, međusloj-INOX B 18/8/6 i navar-E DUR 600

5. Tribološka ispitivanja

5.1 Priprema blokova i diskova

Za tribološka ispitivanja neophodno je izraditi tzv. blokove čije dimenzije moraju biti prilagođene tribometru konstruisanom i instaliranom na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu (sl. 5). Potrebno je bilo izraditi pet blokova, koji su pripremljeni sečenjem iz


navara. Posle sečenja blokovi su obrušeni na dimenzije $6.3 \times 15 \times 10$ mm kako bi mogli da se pričvrste na odgovarajući držač na tribometru i dovedu u kontakt sa diskom standardnih dimenzija [1, 3, 5, 6, 7, 8, 9]. Pri samom ispitivanju ostvaruje se linijski kontakt "block on disk". Spoljašnje varijable na nizu uzoraka bile su: sila kontakta, brzina klizanja, kao i sredstvo za podmazivanje.



Slika 5. Tribometar TPD – 93 i ostala merna oprema za izvođenje triboloških testova

Pre svakog ispitivanja, kontaktne površine diskova brušene su kako bi se uklonili tragovi habanja i mogla da izmeri njihova hrapavost i uporedi sa hrapavošću kontaktnih površina ispitivanih blokova. U tablici 3 prikazana je **Tablica 3. Tehnologija pripreme uzoraka za tribološka ispitivanja (blokova i diskova)**

tehnologija pripreme uzoraka-blokova za proveru triboloških svojstava navara i osnovnih materijala. Kao sredstvo za podmazivanje spregnutog para disk-blok korišćeno je motorno ulje GLX 2 SAE 15 W-40 [1].

| Broj uzorka | Materijal navara | Broj navarenih slojeva | Mikrostruktura navara | Izgled blokova i diskova |
|-------------|--|------------------------|--|---|
| 1. | Međusloj-INOX B 18/8/6 Navar- E DUR 600 | 3* | Martenzitno-karbidna |  |
| 2. | Međusloj-INOX B 18/8/6 Navar- CrWC 600 | 3* | Martenzitno-karbidna | |
| 3. | Međusloj-INOX B 18/8/6 Navar- ABRADUR 58 | 3* | Martenzitno-karbidna | |
| 4. | E Mn14 | 2 | Martenzitno-austenitna | |
| 5. | E Mn17Cr13 | 2 | Martenzit i karbidi u austenitnoj osnovi | |

*) Materijal podloge je Č0361 - Prvi sloj je plastični međusloj od D.M. - INOX B 18/8/6, a drugi i treći sloj su od D.M. - ABRADUR 58, E DUR 600 i CrWC 600 [10].

5.2 Raspodela tvrdoće i mikrostrukture blokova i diskova

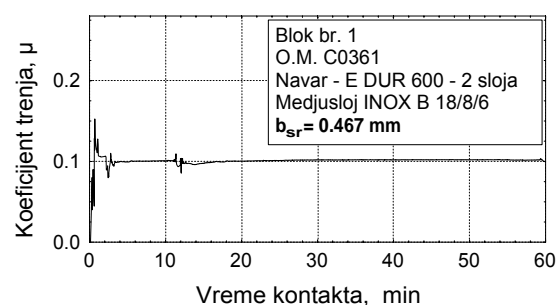
Na pripremljenim blokovima isečenim iz navara tvrdoća je merena u tri pravca, na više mesta i različitim udaljenjima od kontaktne površine. Izmerena tvrdoća navara od E DUR 600 bila je oko 600 HV1, CrWC 600 oko 660 HV1, ABRADUR 58 oko 551-742 HV1. Posle hladnog iskivanja navara od E Mn14 dobijena je tvrdoća od 520 HK i dubina transformisane zone oko 0.60 mm. U istim uslovima ispitivanja, navar od E Mn17Cr13, imao je maksimalnu tvrdoću 560 HK i dubinu transformisanog austenita u martenzit 1.20 mm. Na svakom od pripremljenih uzoraka, pored merenja tvrdoće ocenjivana je i mikrostruktura pojedinih zona navara. U tablici 3 date su samo mikrostrukture zone navara koja je u kontaktu sa diskom.

5.3 Rezultati triboloških ispitivanja navara i osnovnog materijala

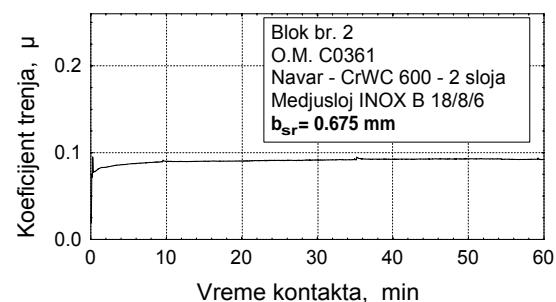
Cilj ovih triboloških istraživanja je određivanje otpornosti na habanje osnovnih i dodatnih materijala da bi se procenila pogodnost primene raspoloživih elektroda za reparaturno i proizvodno navarivanje udarnih greda, zuba kašika utovarivača, lopatica mešalica za proizvodnju asfalta, noževa za podizanje asfalta, kao i drugih delova građevinskih mašina koji su istovremeno izloženi procesima habanja i korozije.

Pre ovih triboloških ispitivanja izmerena je hrapavost kontaktnih površina tri diska i pet

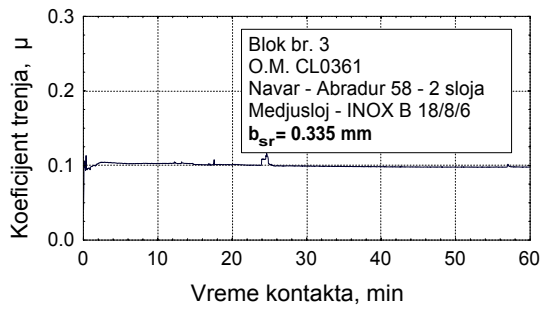
blokova kako bi se odredilo srednje aritmetičko odstupanje hrapavosti R_a . Posle ispitivanja obavljeno je merenje i snimanje širine traga habanja i profila hrapavosti koji sadrži trag habanja. Otpornost na habanje ispitivanih materijala određivana je na osnovu širine traga habanja b_{sr} i koeficijenta trenja μ . Prvo je ispitivan koeficijent trenja na svim blokovima (sl. 6, 7, 8, 9 i 10), odnosno praćena je njegova promena za vreme kontakta od 60 min [1].



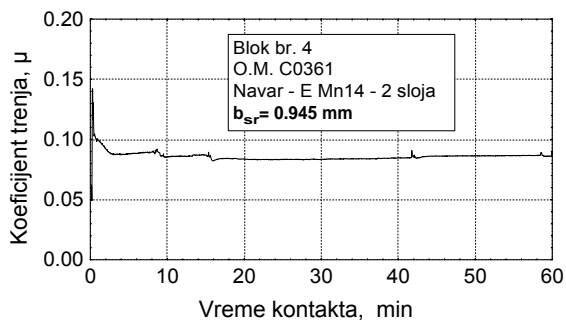
Slika 6. Promena koeficijenta trenja u toku kontakta od 60 min (Navar - E DUR 600)



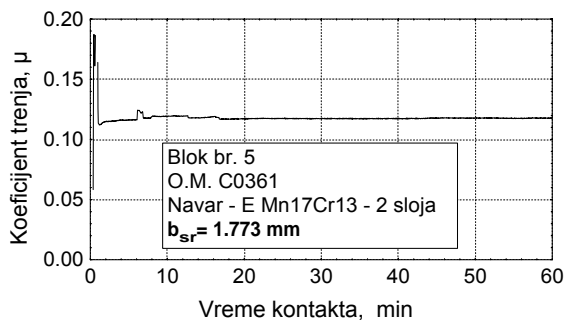
Slika 7. Promena koeficijenta trenja u toku kontakta od 60 min (Navar - CrWC 600)



Slika 8. Promena koeficijenta trenja u toku kontakta od 60 min (Navar - ABRADUR 58)

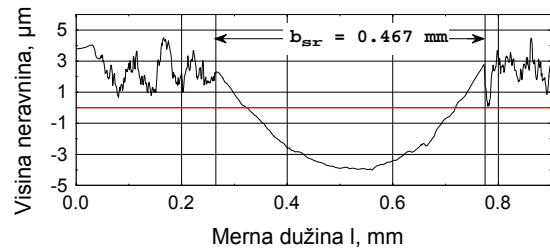


Slika 9. Promena koeficijenta trenja u toku kontakta od 60 min (Navar - E Mn 14)

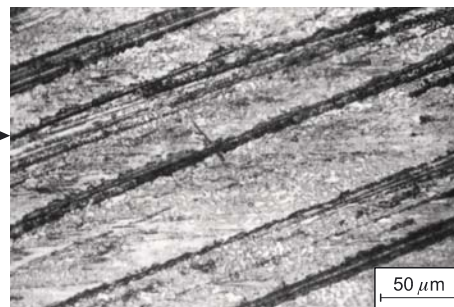
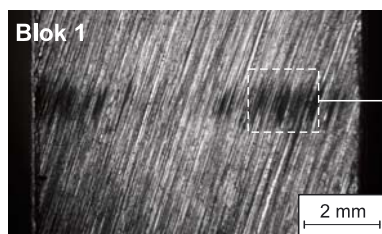


Slika 10. Promena koeficijenta trenja u toku kontakta od 60 min (Navar - E Mn17Cr13)

Na kraju ispitivanja izmerene su topografije kontaktnih površina ispitivanih uzoraka i određeni odgovarajući tragovi habanja. Merenjem širine profila traga habanja došlo se do srednjih vrednosti širine traga habanja koji predstavlja jedan od parametara za ocenu otpornosti na habanje ispitivanih materijala. Srednja vrednost širine traga habanja kod bloka 1 (navar-E DUR 600) je $b_{sr} = 0.467 \text{ mm}$, bloka 2 (navar-CrWC 600) je $b_{sr} = 0.675 \text{ mm}$, bloka 3 (navar-ABRADUR 58) je $b_{sr} = 0.335 \text{ mm}$, bloka 4 (navar-E Mn14) je $b_{sr} = 0.945 \text{ mm}$ i bloka 5 (navar-E Mn17Cr13) je $b_{sr} = 1.773 \text{ mm}$. Na slici 11 prikazan je izgled kratera habanja bloka br. 1, a na slici 12 dat je makroskopski i mikroskopski izgled oštećenih površina [1].



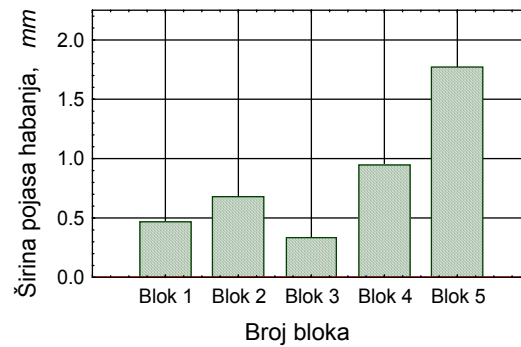
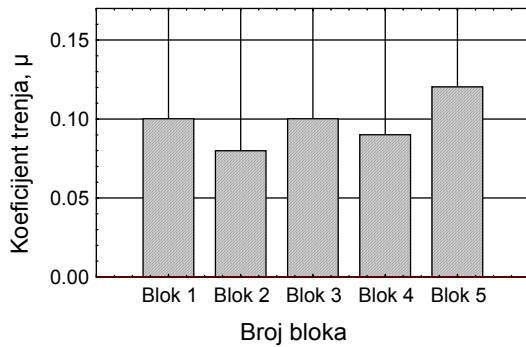
Slika 11. Izgled kratera habanja bloka br. 1 (posle kontakta od 60 min)



Slika 12. Pohabanost bloka br. 1 (makro - $5\times$ i mikro - $200\times$ izgled)

Na slici 13 dat je zbirni histogramski prikaz promene srednjih vrednosti širine traga habanja

(b_{sr}) i koeficijenta trenja (μ) posle izvedenih triboloških ispitivanja.



1- E DUR 600, 2- CrWC 600, 3- ABRADUR 58, 4- E Mn14, 5- E Mn17Cr13

Slika 13. Srednje vrednosti koeficijenta trenja (a) i širine traga habanja (b) posle kontakta od 60 min [1]

6. Analiza rezultata

Upoređivanjem dobijenih rezultata triboloških ispitivanja sa rezultatima ispitivanja sprovedenih u realnim radnim uslovima, ustanovljena je velika podudarnost dobijenih rezultata, pogotovu u slučaju dodatnih materijala E DUR 600, CrWC 600 i ABRADUR 58 [1, 3, 5, 6, 7, 8]. Međutim, u slučaju navara izvedenih sa elektrodama E Mn14 i E Mn17Cr13 ustanovljene su velike razlike između modelskih-triboloških i realnih ispitivanja [1, 3, 5, 6, 7, 8, 9]. Razlog je tome što kod visokomanganskih navara, sile koje deluju na kontaktu blok-disk ne mogu izazvati lokalnu transformaciju austenita u martenzit u pripovršinskim slojevima. Stoga proizilazi naš zaključak da standardni tribološki model provere otpornosti na habanje ne daje pravu sliku kod manganskih čelika.

Na osnovu širine tragova habanja, moglo bi se proceniti da najveću otpornost na habanje imaju navari izvedeni pomoću ABRADUR 58 i E DUR 600 (sl. 12b). Međutim, stvarna otpornost na pojedine vrste habanja može se u ovom slučaju pouzdanije utvrditi samo posle ispitivanja u realnim radnim uslovima. Tek posle analize tih rezultata može se usvojiti celokupna tehnologija proizvodnog ili reparaturnog navarivanja. Drugim rečima, rezultati tribološkog testa ne mogu se prihvatiti bez dodatnih ispitivanja.

7. Zaključak

Modelska ispitivanja ukazuju na to da presudan uticaj na izlazne osobine navarenog sloja, pored primenjene tehnologije, ima vrsta dodatnog materijala. U zavisnosti od uslova rada dela, odnosno dominantne vrste habanja, bira se najpovoljniji dodatni materijal odnosno tehnologija navarivanja. Ovde prikazani rezultati, koji

se odnose na tvrdoću, mikrostrukturu, širinu traga habanja i koeficijent trenja, posredno ukazuju na otpornost na habanje nekih mašinskih delova u eksploatacionim uslovima. To ukazuje na značaj pravilnog izbora dodatnog materijala i tehnologije navarivanja, ali i na mogućnost pogrešnog izbora ako se ne sprovedu i obavezna dodatna realna ispitivanja.

8. Literatura

- [1] Mutavdžić, M.: *Reparaturno navarivanje delova mašina i uređaja građevinske mehanizacije*, završna verzija magistarske teze, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2007.
- [2] Lazić, V., Jovanović, M., Adamović, D., Ratković, N.: *Selection of the optimum technology of the forging dies reparation from the aspect of tribological characteristics*, TRIBOLOGIA – TEORIA I PRAKTIKA, ISSN 0208-7774, ROK XXXVI, NR 2/2005 (200), pp. 11-31.
- [3] Jovanović, M., Lazić, V., Mutavdžić, M., Adamović, D.: *Izbor optimalne tehnologije reparatione zuba utovarne kašike, Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, Originalni naučni rad, godina L, Vol. 50, No. 1-66, 2005., str. 11-20.
- [4] Lazić, V., Jovanović, M., Ratković, N., Adamović, D., Vulović, R.: *Procena otpornosti na habanje navarenih slojeva izvedenih manganskom elektrodom*, Tribologija u industriji, Originalni naučni rad, god. XXII, br. 3&4, 2002., str. 10-17.
- [5] Mutavdžić, M., Jovanović, M., Lazić, V., Nedić, B., Rakić S.: *Modelska ispitivanja dodatnih materijala namenjenih regeneraciji oštećenih delova železničke opreme*, XII Naučno-stručna Konferencija o Železnici sa međunarodnim učešćem - ŽELKON '06, Niš, Zbornik radova, str. 321-324.

[6] Mutavdžić, M., Lazić, V., Jovanović, M., Josifović, D., Krstić, B.: *Izbor optimalne tehnologije reparaturnog navarivanja udarnih greda rotacionih drobilica*, "Zavarivanje 2006", 26-29.04.2006., Zlatibor, (rad prihvaćen u celini, prezentiran na skupu-18 stranica i objavljen na CD-u).

[7] Lazić, V., Mutavdžić, M., Jovanović, M., Adamović, D., Nedić, B.: *Proizvodno navarivanje lopatica mešalica asfaltnih baza*, "Zavarivanje 2006", 26-29.04.2006., Zlatibor, (rad prihvaćen u celini, prezentiran na skupu-17 stranica i objavljen na CD-u).

[8] Jovanović, M., Mutavdžić, M., Lazić, V., Nedić, B., Adamović, D.: *Reparaturno navarivanje noževa rotacionog uređaja za ravnanje terena*, Zavarivanje 2006., 26-29.04.2006., Zlatibor., (rad prihvaćen u celini, prezentiran na skupu-13 stranica i objavljen na CD-u).

[9] Lazić, V.: *Optimizacija procesa navarivanja sa aspekta triboloških karakteristika navara i zaostalih napona*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2001.

[10] Katalozi: Verkaufsgesellschaft M.B.H., Vosendorf., FEP-Plužine, Elvaco-Bijeljina, Železarna Jesenice-Fiprom, Bohler-Kapfenberg, Messer Griesheim-Frakfurt am Main, Esab-Goteborg, Lincoln Electric-SAD,

[11] Blašković, P., Balla, J., Dzimko, M.: *Tribologija*, Vydavatelstvo, ALFA, Bratislava, 1990.

[12] Ivković, B., Rac, A.: *Tribologija*, Jugoslovensko društvo za tribologiju, Kragujevac, 1995.

[13] Jovanović, M., Adamović, D., Lazić, V.: *Tehnologija zavarivanja-priručnik*, samo-stalno autorsko izdanje, Kragujevac, 1996., (prvo izdanje).

TRIBOLOGICAL INVESTIGATIONS OF THE HARD-FACED LAYERS OF THE WORKING PARTS OF THE CIVIL ENGINEERING MACHINERY

Abstract

In this paper is analyzed the procedure for tribological investigations of the hard-faced layers in order to establish the quality of various filler metals. The matter of speaking are mainly the parts of civil engineering mechanization, like the teething of the conveyer scoop, milling machines' impact beams, asphalt mixer blades, knives for ground leveling, etc., which are exposed to impact loads and operate in the conditions of extensive friction and wear. Investigations performed on models point to the fact that the decisive influence on the hard-faced layer output properties, besides the applied technology, has the type of the filler metal. Depending on the working conditions, namely the dominant type of wear, the most favorable filler metal is being chosen, i.e., the hard-facing technology. Results of this work show that the proper selection of the filler metal and the hard-facing technology are decisive in regards with the microstructure and hard-faced layer hardness, i.e., its wear resistance.

Key words: tribological investigations, hard-facing, wear, friction coefficient, wear trace