



## UTICAJ VRSTE KARBIDA NA TRIBOLOŠKE KARAKTERISTIKE NAVARENIH SLOJEVA

V., LAZIĆ, M., JOVANOVIĆ, D., ADAMOVIĆ,

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

M., MUTAVDŽIĆ, *Preduzeće za puteve "Kragujevac", Tanaska Rajića 16, 34000 Kragujevac*

### INFLUENCE OF THE CARBIDE TYPE ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF THE HARD-FACED LAYERS

#### *S u m m a r y*

*In the paper is first presented the survey of carbide-forming - alloying elements and conditions are listed which individual elements have to fulfill to be the carbide-forming ones. This is primarily valid for elements, which, in the iron-carbon system, can form simple, complex or special carbides, namely phases of interstitial and substitutional type.*

*Also presented is the survey of the carbide types that are formed during the hard-facing of the steel parts with various parts of filler metals. The tribological properties of individual carbide types are pointed out, as well as the influence of the metal substrate in which the carbides are pressed.*

*The investigations on models show that the decisive influence on the output characteristics of the hard-faced layer, besides the applied technology, has the type of the filler metal. Depending on the working conditions of the part, namely the dominant types of wear, the most favorable filler metal is being chosen, i.e., the hard-facing technology. Results of this paper present the adequate selection of the filler metal and the hard-facing technology, on which depends the type of the microstructure and carbide.*

**Key words:** *carbides, surfacing, abrasive wear, hardness, microstructure, filler metal*

#### 1. UVOD

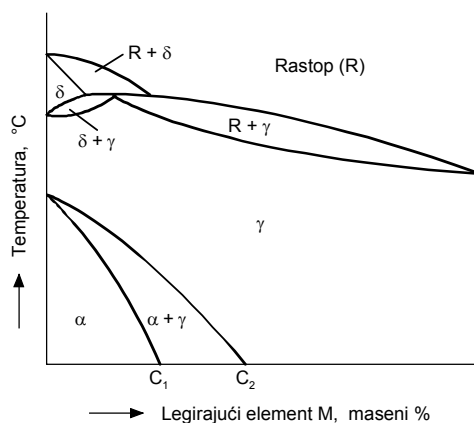
U radu se najpre razmatra uticaj legirajućih elemenata na strukturu čelika, a zatim ukratko daje pregled elemenata koji obrazuju karbide. Posebno se govori o karbidima koji se formiraju pri tvrdom navarivanju čeličnih delova različitim tipovima dodatnih materijala. Ukazuje se na tribološke karakteristike pojedinih vrsta karbida, i na uticaj metalne matrice u koju su karbidi utisnuti. U tom pogledu u literaturi se mogu naći oprečni stavovi o najpovoljnijoj matrici iz triboloških aspekata. Zbog toga smo izveli brojna eksperimentalna navarivanja različitim dodatnim materijalima i na odgo-

varajućim uzorcima ispitivali karakteristike značajne za otpornost na habanje. To su pre svega: tvrdoća i njena raspodela u poprečnom preseku, mikrostruktura osnovnih zona navara, koeficijent trenja i širina zone habanja [6, 7].

#### 2. UTICAJ LEGIRAJUĆIH ELEMENATA U ČELICIMA

Ugljenični čelici ne mogu ispuniti sve konstruktivne zahteve, kojima se često traži ne samo visoki napon tečenja već takodje i dobra žilavost, određena dinamička izdržljivost, granica puzanja ili određene osobine na niskim ili visokim tempe-

raturama. Pored ovih osnovnih mehaničkih osobina moraju ponekad neki delovi imati i posebne osobine, kao korozionu otpornost, termopostojanost i sl., koje se mogu dobiti samo dodavanjem drugih elementa, odnosno legiranjem. Konstrukcioni legirani čelici uvek su skuplji od ugljeničnih i zato ih treba upotrebljavati u poboljšanom stanju kada imaju najveći odnos napona tečenja prema jačini, kao i maksimalnu žilavost, pa se tako najbolje koriste dodatni elementi. Ponekad se, naprotiv ne traže visoke mehaničke osobine, već se npr. zahteva samo dovoljna otpornost protiv korozije. U tom slučaju bi bilo neekonomično



Slika 1 Ravnotežni binarni dijagram sa otvorenom oblašću gama

## 2.1 Uticaj legirajućih elemenata na osnovnu metalnu masu

Svi legirajući elementi utiču u većoj ili manjoj meri na temperaturu prekrizalizacije čelika, a time i na veličinu oblasti gama i alfa faze. Za termičku obradu uglavnom je važan njihov uticaj na oblast gama. U tom smislu legirajući elementi mogu se podeliti na četiri grupe:

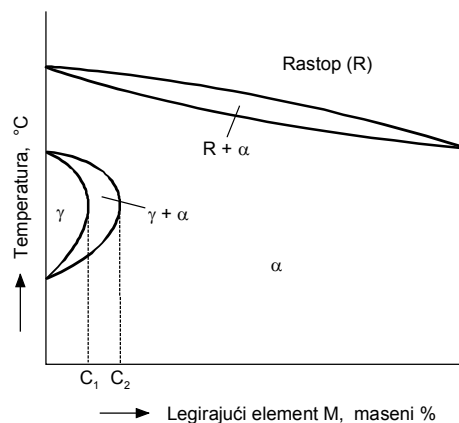
- elementi koji potpuno otvaraju oblast gama,
- elementi koji proširuju oblast gama,
- elementi koji potpuno zatvaraju oblast gama i
- elementi koji sužavaju oblast gama.

### 2.1.a Elementi koji potpuno otvaraju oblast gama

Neki elementi proširuju u binarnom ravnotežnom dijagramu Fe-M<sup>1</sup> oblast faze  $\gamma$ , tako da pri određenoj koncentraciji M, ta se faza zadržava od solidus temperature pa do sobne. Primer takvog binarnog dijagrama (Fe-Mn) dat je na slici 1 ili detaljnije u odgovarajućoj literaturi [1, 2, 3, 4, 5, 12, 13].

<sup>1</sup> M-uopšteno označava legirajući element.

proizvoditi debele limove od skupih visokolegiranih čelika, već je bolje primeniti tzv. platirane limove dobijene zavarivanjem tanjeg lima od nerđajućeg čelika. Slično tome se, pri regeneraciji ili izradi novih delova upotrebljavaju postupci metalizacije ili navarivanja. Dodirne površine oba lima međusobno se spajaju postupkom zavarivanja pritiskom ili eksplozijom, čime se dobija dovoljno kompaktni spoj. Neki bimetalni spojevi na cilindričnim delovima, kao što su dvoslojne cevi i ležišne čaure, izrađuju se postupkom centrifugalnog livenja.



Slika 2 Ravnotežni binarni dijagram sa zatvorenom oblašću gama

Sve do koncentracije elementa M date tačkom C<sub>1</sub>, biće moguća potpuna prekrizalizacija  $\gamma \rightarrow \alpha$ ; pri sadržaju između C<sub>1</sub> i C<sub>2</sub> odvijae se samo delimična prekrizalizacija. Ako se poveća sadržaj legirajućeg elementa iznad C<sub>2</sub>, legure Fe-M imaće i pri sobnoj temperaturi samo fazu gama. Pri zagrevanju (odnosno hladjenju) ne odvijaju se kod ovih legura fazne promene u čvrstom stanju. Dijagram potpuno otvorene  $\gamma$  - oblasti obrazuju sa gvoždjem elementi kristalne rešetke  $\gamma$ , poluprečnika atoma bliskih atomu gvoždja, kao i sličnih elektrohemijskih svojstava i valence. Od tehnički značajnih elemenata spadaju u ovu grupu nikel i mangan [1].

### 2.1.b Elementi koji proširuju oblast gama

Neki hemijski elementi (npr. Cu, N) istina proširuju oblast gama, ali to nije dovoljno da se ta oblast potpuno otvori da bi prekrizalizacija  $\gamma \leftrightarrow \alpha$  bila sasvim potisnuta. Ovi elementi dakle povećavaju stabilnost faze gama, ali je ne povećavaju u toj meri, da bi bila zadržana i pri sobnoj temperaturi.

### 2.1.c Elementi koji potpuno zatvaraju oblast gama

Ako se povećava sadržaj legirajućih elemenata koji podižu temperaturu prekrystalizacije, zatvara se oblast gama kako je shematski prikazano na slici 2.

Pri zagrevanju legura koje imaju nižu koncentraciju legirajućeg elementa M nego što daje tačka  $C_1$ , dolazi do potpune prekrystalizacije  $\alpha \rightarrow \gamma$ , što znači da je ove legure moguće termički obradivati. Legure koncentracije između  $C_1$  i  $C_2$  prekrystalisaće se pri zagrevanju samo delimično. Posle zagrevanja do oblasti  $\alpha + \gamma$  i brzog hladjenja do sobne temperature transformiše se samo faza gama. Pri povećanju sadržaja legirajućeg elementa iznad koncentracije  $C_2$  ostaće zadržana faza  $\alpha$  u celom opsegu temperatura između solidusa i sobne temperature. Legure ne podležu prekrystalizaciji, ni pri hladjenju ni pri zagrevanju, te će na svim temperaturama struktura biti feritna.

### 2.1.d Elementi koji sužavaju oblast gama

To su niobijum, tantal, cirkonijum i cer. Oni se međutim koriste za legiranje čelika samo u posebnim slučajevima (npr. Nb kao stabilizator kod nerđajućih čelika, ili kao dodatak elektrodama za tvrdo navarivanje čelika).

## 3. PREGLED LEGIRAJUĆIH KARBIDOTVORNIH ELEMENATA I NEKIH KARBIDA U ČELICIMA

Sličan uticaj, kao i u binarnim legurama Fe-M, imaju legirajući elementi i u čelicima. Sa porastom sadržaja austenitotvornih elemenata kod čelika opadaće temperatura prekrystalizacije. Sniženje ne utiče samo na veličinu oblasti gama, već takodje i na osobine čelika pošto temperatura transformacije određuje npr. grubost perlitnih lamela, a time i mehaničke osobine. Ako se temperatura prekrystalizacije dovoljno snizi, može biti difuziona promena potpuno potisnuta i austenit će prekrystalisati i pri sporom hladjenju mehanizmom klizanja (tj. bezdifuziono) u martenzit. Pri povećanom sadržaju austenitotvornih elemenata iznad određene granice, zadržava se austenitna struktura i na sobnoj temperaturi. To znači da se odgovarajućom kombinacijom legirajućih elemenata dobijaju čelici koji imaju i pri sobnoj temperaturi austenitnu strukturu, tzv. *austenitni čelici*. Ovi čelici nisu magnetični, imaju nizak napon tečenja i malu tvrdoću, ali visoku istegljivost i žilavost.

Suprotno tome, sa povećanjem količine feritotvornih elemenata (Cr, Mo, Si, ...) oblast gama će se sužavati, tako da može biti zadržan  $\delta$ -ferit i pri sobnoj temperaturi. Odredjene klase čelika

sadrže kako  $\gamma$ -gene (Ni, Mn, Cu) tako i  $\alpha$ -gene elemente (Cr, Mo, Si, Nb, ...), pa su za procenu njihove strukture na sobnoj temperaturi neophodna metalografska i druga ispitivanja. Stoga se legirajući elementi prema uticaju na strukturu čelika dele na dve osnovne grupe: *austenitizatore* (Ni, Mn, Cu, C i N) i *feritizatore* (Cr, Mo, W, Si, V, Ta, Al, Ti i Nb), ili drukčije rečeno  $\gamma$ -gene i  $\alpha$ -gene elemente. Kad je reč o navarivanju, veoma je važno analizirati uticaj karbidotvornih elemenata (Cr, Mo, W, Si, ...) na osobine čelika.

Hrom se u niskougljeničnim čelicima obično nalazi u količinama do 0.3%, u legiranim čelicima 0.7-3.5%, u hromovim čelicima 12-18% i u hrom-niklovim čelicima 9-35%. Povišen sadržaj hroma u ugljeničnim i niskolegiranim čelicima pogoršava njihovu zavarljivost na račun poboljšanja prokaljivosti. Povećava vatrootpornost austenitnih čelika u oksidacionim uslovima ali deluje manje efikasno, nego npr. molibden ili vanadijum. Pri sadržaju hroma iznad 12% čelik je veoma otporan prema koroziji. Daljim povećanjem sadržaja hroma raste jačina i otpornost čelika prema koroziji, ali pri Cr > 20% vidno opada plastičnost. Hrom obrazuje veoma stabilne karbide  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$  i  $Cr_3C_2$ , koji se u čeliku mogu nalaziti u slobodnom stanju ili povezani sa  $Fe_3C$  (vidi sl. 3). Ako čelik sadrži više ugljenika nego što je potrebno za obrazovanje perlita, to nastaju uslovi povoljni za pojavu slobodnih karbida hroma, koji se izdvajaju po granicama zrna, što može izazvati međukristalnu koroziju. Kritična temperatura izdvajanja karbida iznosi 500-800°C. Hrom podiže kritičnu temperaturu  $A_{C1}$ , što dovodi do toga da brzina rastvaranja karbida u austenitu bude znatno manja od brzine rastvaranja  $Fe_3C$  u ugljeničnim čelicima. Zbog toga je pri kaljenju Cr-čelika potrebna viša temperatura i duže vreme progrevanja nego za nelegirane čelike. Legure Fe-Cr-C po očvršćivanju mogu imati sledeće strukture: *podutektoidnu*, *nadeutektoidnu*, *ledeburitnu* i *feritno-karbidnu*. Praktičnu primenu imaju legure svih struktura. Sa porastom sadržaja hroma smanjuje se termička provodnost i povećavaju termički naponi (raste *gradT*) što zahteva predo-strožnost pri zagrevanju čelika, npr. pri preradi na toplo, termičkoj obradi ili zavarivanju.

Hrom se rastvara u cementitu, zamenjujući u njemu atome gvoždja i obrnuto - gvoždje se rastvara u karbidu hroma, zamenjujući atome hroma. Tako se dobija legirani cementit  $(Fe, Cr)_3C$ , odnosno legirani karbid  $(Cr, Fe)_7C_3$ .

Molibden se u konstrukcionim čelicima nalazi u granicama od 0.2-0.5%. Izaziva usitnjavanje zrna i dovodi do povećanja žilavosti (pri visokim

temperaturama) i prokaljivosti. Sa povećanjem sadržaja Mo raste i jačina i napon tečenja, dok izduženje i kontrakcija opadaju pri  $Mo > 2.3\%$ .

*Volfram* daje čeliku sitnozrnastu gradnju na račun obrazovanja teško rastvorljivih karbida. Prokaljivost se povećava relativno malo, a zavarljivost pogoršava zbog porasta krtosti zavarenog spoja, posebno kod čelika sa većim sadržajem ugljenika. Volfram donekle povećava opštu korozionu otpornost kao i otpornost prema međukristalnoj koroziji austenitnih čelika. Doprinosi formiranju nepovoljne  $\sigma$ - faze u hrom-nikl čelicima. U austenitnim čelicima sa sadržajem ugljenika ispod 0.15%, dodatak volframa do 3% ne pogoršava zavarljivost. Legure Fe-W-C po očvršćivanju i hladjenju imaju strukture: *podeutektoidnu, nadeutektoidnu, ledeburitnu i feritnu*. Praktičnu primenu imaju sve strukture i ubrajaju se u čelike. Sa povećanjem sadržaja W, opada termička provodnost, raste težina i električni otpor.

*Silicijum*, koji se supstitucijski rastvara u feritu povećava njegovu jačinu i naročito granicu elastičnosti, i s te tačke gledišta jeste poželjan legirajući sastojak kod čelika za opruge. U visokolegiranim čelicima silicijum sprečava oksidaciju hroma. Većina austenitnih čelika sadrži do 1% Si. U čelicima tipa 18Cr8Ni, silicijum doprinosi obrazovanju ferita i dovodi do ojačanja i povećanja otpornosti prema međukristalnoj koroziji. Silicijum ne podleže segregaciji i otežava segregaciju nekih sastojaka, kao npr. sumpora i fosfora. Legure Fe-Si-C po očvršćivanju imaju sledeće strukture: *feritnu, podeutektoidnu, nadeutektoidnu i ledeburitnu*. Praktičnu primenu nalaze prve tri strukture, a legura četvrte strukture ubraja se u livna gvoždja. Pri većem sadržaju ugljenika i silicijuma ( $C > 0.8\%$  i  $Si > 0.8\%$ ) cementit pod uticajem silicijuma pokazuje povećanu sklonost ka grafitizaciji. Ovo isključuje izradu alatnih čelika sa istovremeno povećanim sadržajem C i Si.

Vanadijum se u specijalnim čelicima nalazi u granicama 0.2-0.85%, a u čelicima za rad na toplo 1-1.5%. On otežava zavarivanje čelika usled povećanja prokaljivosti. Smanjuje osetljivost čelika ka pregrevanju pri navarivanju i uopšte termičkoj obradi, pošto karbidi vanadijuma koče porast zrna.

*Tantal* je element sa velikom sklonošću ka obrazovanju karbida i primenjuje se u austenitnim hrom-nikal čelicima kao stabilizator koji suzbija međukristalnu koroziju. Mora biti uveden u dovoljnoj količini, da veže sav ugljenik i tako spreči obrazovanje karbida hroma, odnosno međukristalnu koroziju što je posebno važno pri

zavarivanju nerđajućih čelika [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 14, 15, 16].

*Aluminijum* pokazuje veću sklonost ka obrazovanju nitrida - smanjujući na taj način osetljivost čelika na proces starenja. Dodatak aluminijuma u količini 0.02-0.2% smanjuje zrna prvobitnog austenita zahvaljujući kočionom delovanju nitrida aluminijuma i  $Al_2O_3$ . U malim količinama aluminijum ne samo što koči porast zrna, već takodje smanjuje sklonost ka zakaljivanju prelazne zone. Dodatak aluminijuma nerđajućim čelicima povećava otpornost na oksidaciju [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 14, 15, 16], ali kad Al predje granicu od 1% čelici postaju teško zavarljivi.

Titan je legirajući element najvećeg afiniteta prema ugljeniku, pa se stoga često primenjuje kao stabilizator u čelicima otpornim na elektrohemijsku koroziju jer vezuje ugljenik i sprečava obrazovanje karbida hroma. Ako odnos sadržaja titana prema ugljeniku u čeliku ispunjava standardne zahteve onda će takav čelik biti neosetljiv prema međukristalnoj koroziji. Obrazuje se takodje nitrid titana nerastvorljiv u čvrstom stanju, koji deluje kao centar kristalizacije pri faznim promenama u čvrstom stanju. Titan povećava otpornost zavara prema prslinama na toplo [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 14, 15, 16].

*Niobijum* pokazuje veliku sklonost ka ugljeniku te stoga obrazuje veoma stabilan karbid NbC. Često se primenjuje u mikrolegiranim čelicima u količini do 0.05%. Njegov koristan uticaj na osobine čelika zasniva se pre svega na kočenju procesa segregacije. Takodje, hromni feritni čelici koji sadrže niobijum manje su osetljivi prema prslinama na toplo. Sužava austenitno područje, smanjuje prokaljivost i poboljšava zavarljivost [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 14, 15, 16]. Posebno je pri navarivanju značajna uloga malog dodatka Nb u elektrodama jer se u zavaru obrazuju sitni karbidi NbC otporni na habanje.

*Bor* je element koji obrazuje karbide i veoma povećava prokaljivost čelika ako se doda u malim količinama. Pri većim sadržajima bora prokaljivost čelika opada i nastaje krta grubozrnasta struktura. Obično se dodaje čelicima u malim količinama - oko 0.003%. Prema literaturnim podacima [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 14, 15, 16] bor proširuje područje  $\gamma$  gvoždja. U austenitnim hrom-nikl čelicima mikrododaci bora povećavaju termopostojanost što je povezano sa ojačanjem granica zrna.

#### 4. KARBIDI U METALNOJ OSNOVI I NJIHOV ZNAČAJ

Najveći broj legirajućih elemenata u čeliku i livenom gvoždju hemijski se jedini sa ugljenikom obrazujući intersticijalne faze ili složene strukture uobičajeno zvane karbidima.

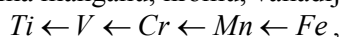
Esperimentalno je utvrđeno da je sklonost ka formiranju karbida u čelicima povezana sa elekt-ronskom konfiguracijom legirajućih eleme-

nata. Oni elementi čiji je podsloj  $d$  manje posednut elektronima nego gvoždje obrazuju specijalne karbide [9]. Što element ima manji broj elektrona u podsloju  $d$ , tim je sklonost ka obrazovanju specijalnih karbida veća i karbid je pri tome stabilniji. U tablici 1 dati su: atomski brojevi, energetska stanja, atomski radijusi važnijih karbidotvornih elemenata, kao i odnosi atomskog radijusa ugljenika i odgovarajućeg elementa [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 14, 15, 16].

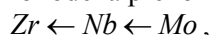
**Tablica 1** Atomski brojevi, energetska stanja i veličine atomskih radijusa u nm važnijih karbidotvornih elemenata, i odnos  $r_C/r_M = 0.071/r_M$

Ti 22 3d24s2 0.147/0.48	V 23 3d34s2 0.132/0.54	Cr 24 3d54s1 0.125/0.57	Mn 25 3d54s2 0.112/0.63	Fe 26 3d64s2 0.124/0.57
Zr 40 4d25s2 0.158/0.45	Nb 41 4d45s1 0.143/0.50	Mo 42 4d55s1 0.136/0.52		
Hf 72 5d26s2 0.157/0.45	Ta 73 5d36s2 0.143/0.50	W 74 5d46s2 0.137/0.52		

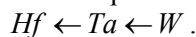
U skladu sa navedenim pravilom redosled obrazovanja karbida ide u pravcu od gvoždja prema manganu, hromu, vanadijumu do titana,



od molibdena preko niobijuma do cirkonijuma,



od volframa preko tantala do hafnijuma,



Legirajući elementi čiji je podsloj  $d$  posednutiji elektronima nego gvoždje, uopšte ne obrazuju karbide u legurama gvoždja, a posebno oni koji imaju potpuno ispunjen podsloj  $d$ , kao npr. bakar i cink.

U slučaju kad se u leguri gvoždja nalazi više karbidotvornih elemenata, onda će se ugljenik uvek vezivati za element veće karbidotvorne sklonosti što znači da u čeliku legiranom sa Cr i V treba očekivati pre svega karbide V, a zatim Cr, dok se karbid gvoždja pri većem sadržaju V i Cr, uopšte ne javlja.

Radijus atoma ugljenika iznosi 0.071 nm, dok radijus atoma svih karbidotvornih elemenata jeste veći od 0.1 nm. Kad je odnos radijusa atoma ugljenika prema radijusu atoma karbidotvornog elementa manji od 0.59 (Zr, Hf, Ti i dr.) onda nastaju *kristalne intermetalne faze* čije su sledeće odlike:

- imaju (zadržavaju) stehiometrijski odnos MC ili  $M_2C$  (gde je M- metal, a C- ugljenik),
- imaju prostu kristalnu rešetku obrazovanu od atoma metala kao i mešovitu rešetku najčešće

površinski centriranu kubnu (karbidi tipa MC) ili heksagonalnu (karbidi tipa MC ili  $M_2C$ ),

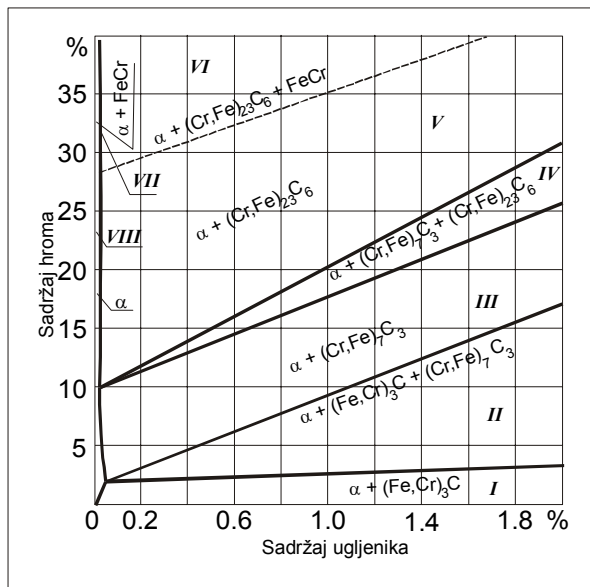
- mogu obrazovati kristalne rešetke neposednute atomima ugljenika, tj. mogu se kristalisati pri nepotpunoj posednutosti svih slobodnih mesta,
- to su veoma stabilna jedinjenja sa izuzetno visokom temperaturom topljenja (2000-3500°C) i gotovo nerastvorljiva u austenitu,
- to su jedinjenja visoke tvrdoće.

Kad je odnos radijusa atoma ugljenika prema radijusu atoma karbidotvornog elementa veći od 0.59 (npr. Mn) karbidi imaju *složenu strukturu*. Većina poznatih karbida kristališe se u tri kristalografska sistema: *kubnom*, *heksagonalnom* i *rombičnom*, pri čemu neki elementi mogu obrazovati dve vrste karbida, a mangan i hrom, čak tri vrste karbida koji imaju različite kristalne rešetke.

Najprostijim karbidima smatraju se oni koji se kristališu u kubnom sistemu primitivne rešetke tipa MC. Takve karbide obrazuju V, Ti, Nb, Ta i Hf. Nešto složeniji karbidi su oni koji se kristališu u heksagonalnom sistemu sa rešetkama tipa MC i  $M_2C$ . Heksagonalne rešetke tipa MC imaju samo molibden i volfram, a tip  $M_2C$ , osim molibdena i volframa, imaju takodje i V, Nb i Ta. Karbid  $\epsilon$ , koji se javlja u kaljenim i niskootpuštenim čelicima, ima takodje heksagonalnu rešetku tipa MC. Rombične rešetke obrazuju karbidi Cr, Mn, Fe, Co, Ni.

Iz aspekta otpornosti na habanje i na visoke temperature, posebno treba objasniti karbide hroma

i njima slične karbide mangana koji se mogu kristalisati po regularnom<sup>2</sup>, heksagonalnom ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$  i  $\text{Mn}_7\text{C}_3$ ), kao i rombičnom ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$  i  $\text{Mn}_3\text{C}$ ) sistemu. Osim karbida hroma  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  svi ostali se javljaju u legurama gvoždja, pri čemu određeni broj atoma Fe može biti zamenjen drugim metalom (legirani cementit).



**Slika 3** Oblasti pojave različitih faza legure Fe-C-Cr na temperaturi 20°C

Na slici 3 date su oblasti egzistencije različitih faza u legurama tipa Fe-C-Cr u zavisnosti od sadržaja Cr i C. Pri malom sadržaju hroma specijalni karbid još se ne obrazuje jer se hrom rastvara u feritu i cementitu, dajući u prvom polju mešavinu ( $\alpha + (\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ ). Pored ove mešavine, u polju II javlja se legirani karbid  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ . U polju III nema legiranog cementita već se pored ferita nalazi samo karbid hroma sa rastvorenim gvoždjem  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ . U polju IV uočava se ferit i dve vrste karbida hroma sa rastvorenim gvoždjem (prvi karbid  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$  i drugi karbid  $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ ). U polju V nalazi se samo ferit i drugi karbid hroma sa rastvorenim gvoždjem  $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ . U polju VI nalazi se osim ferita i drugog karbida hroma sa rastvorenim gvoždjem  $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$  još i intermetalna faza gvoždja sa hromom FeCr.

U polju VII nalazi se samo ferit i intermetalna faza gvoždja sa hromom FeCr, i najzad u polju VIII nalazi se samo ferit. Ostali sistemi tipa Fe-M-C su slični sistemu Fe-Cr-C, ali s obzirom na manji broj faza, oni su nešto jednostavniji.

Kad se u čeliku-dodatnom materijalu nalazi nekoliko karbidotvornih elemenata, to se najpre obrazuju karbidi onih elemenata koji imaju najveći

afinitet prema ugljeniku, npr. u čeliku sa određenim sadržajem ugljenika: najpre karbid W i Mo,  $\text{Fe}_3(\text{W,Mo})_3\text{C}$ , kasnije karbid hroma  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , potom drugi karbid hroma  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  i onda ako bi preostalo još dovoljno ugljenika može nastati legirani cementit.

Iz napred navedenog sledi, da se poznavanjem hemijskog sastava dodatnog i osnovnog materijala (čelika) može približno predvideti kakvi će karbidi biti obrazovani, a oslanjajući se na stabilnost pojedinih karbida, možemo takodje predvideti njihovu rastvorljivost u austenitu, odnosno termopostojanost.

Pošto su specijalni karbidi manje rastvorljivi u austenitu nego cementit (manja brzina difuzije), neophodno je pri austenitizaciji legiranih čelika obezbediti duže zadržavanje na potrebnoj temperaturi. Ponekad je poželjno obrnuto da u strukturi ostane zadržan deo nerastvorenih karbida, jer oni sprečavaju porast austenitnog zrna (npr. kod brzoreznih čelika). Specijalni karbidi, imaju veću tvrdoću nego cementit ili martenzit. Kada su raspoređeni u tvrdoj osnovnoj martenzitnoj masi (matrici) povećavaju otpornost čelika na habanje; što je karbid tvrdji tim će biti veći njegov uticaj. Otpornost na habanje nije samo uslovljena tvrdoćom karbida, već takodje njihovom veličinom, rasporedom i oblikom. Veliki grubi karbidi se iz osnovne metalne mase lako čupaju, naročito ako se nalaze na radnim oštricama alata. Takodje karbidi izlučeni na granicama zrna i raspoređeni linijski u znatnoj meri smanjuju otpornost na habanje.

Vreme držanja na temperaturama otpuštanja kod nekih čelika utiče na tip izlučenih karbida. Pri otpuštanju se ne izlučuje direktno stabilan, ravnotežan karbid, već najpre prelazni tip, koji postupno prelazi u ravnotežni.

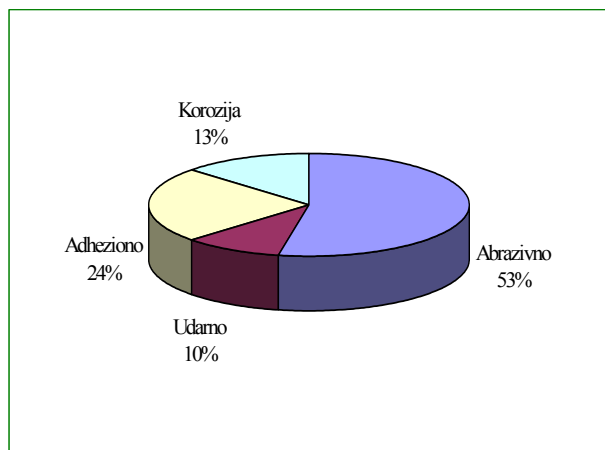
Neki elementi (osim Ni, Co, Fe, Mn i Cr, a u određenim slučajevima W i Mo) obrazuju faze intersticijskog tipa. Predstavnik te faze je karbid vanadijuma. Elementarna rešetka karbida vanadijuma VC ne mora biti potpuno ispunjena atomima ugljenika već u nekoj rešetki vanadijuma mogu postojati i praznine (vakancije).

Posebno značajan, iz aspekta izuzetno velike otpornosti na abrazivno habanje je *volfram-karbid*. Za potrebe navarivanja isporučuje se u obliku žica punog preseka ili čeličnih cevi punjenih karbidima. Tvrdoća ovog karbida se kreće od 2400-2700 HV (95 HRA), dok je metalna osnova navara tvrdoće 45-65 HRC, što ukazuje na izuzetno visok otpor na pritisak ali i na veoma nisku plastičnost. Uočeno je da se zrna karbida volframa oksidišu na temperaturi iznad 538°C [6, 17, 18] (tzv. žuti oksid), te se

<sup>2</sup> Pod *regularnom* rešetkom podrazumeva se kubna rešetka.

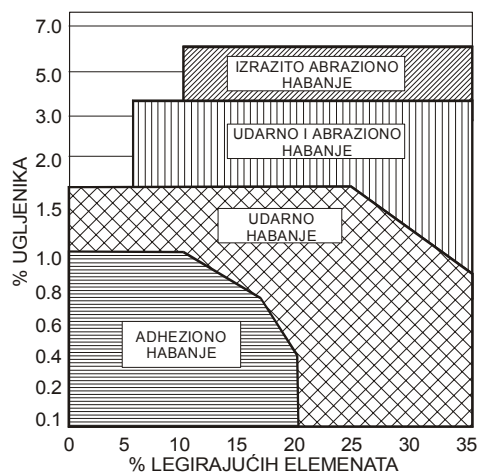
ovi navari ne preporučuju za rad u uslovima korozijske. Metal navara je veoma osetljiv na poprečne prsline.

Medju slabije karbidotvorne elemente spada *mangan* koji ne obrazuje sa ugljenikom u čeliku



a) Različite vrste habanja

poseban karbid, već se delimično rastvara u cementitu, gde zamenjuje deo atoma gvozdja  $(Fe,Mn)_3C$ .



b) Legure za navarivanje

**Slika 4** Izbor mikrostruktura za razne vrste habanja

## 5. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Cilj ovih istraživanja je da se na konkretnim primerima pokaže kako se postupa pri izboru dodatnog materijala za navarivanje, zavisno od vrste habanja, koje je dovelo do trajnog oštećenja mašinskih delova. Takođe, veliki proizvođači dodatnih materijala razvili su "mape" za olakšanje izbora legura za navarivanje u zavisnosti od vrste dominantnog vida habanja delova, te sadržaja ugljenika i legirajućih elemenata u elektrodama [20].

Budući da se najveći broj industrijskih delova povlači iz eksploatacije iz razloga habanja (53% abrazivno, 24% adheziono, 10% udar i ostale vrste) i korozijske (13%) (sl. 4a), to se često daju i odgovarajući dijagrami koji pokazuju granične sadržaje ugljenika i legirajućih elemenata u

legurama za navarivanje, u funkciji najčešćih vidova habanja (sl. 4b) [6].

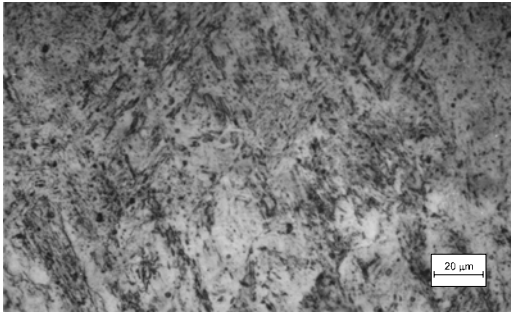
Rezultati prikazani u ovom radu odnose se na dodatne materijale date u tab. 2. Reč je o materijalima namenjenim za tvrdo navarivanje površina delova izloženih izrazitom abrazivnom habanju pri kontaktu dva ili više čvrstih tela. Navarivanje je izvodjeno sa različitim brojem slojeva, uz primenu medjusloja u slučaju nanošenja debljih navara ili bez medjusloja u slučaju nanošenja jednog do dva sloja. Za očekivane tribološke radne uslove odgovaraju samo one elektrode koje pored povećanog sadržaja ugljenika imaju i dovoljnu količinu karbidotvornih elemenata, što ih čini otpornim na habanje u datim uslovima.

U tom cilju za eksperimente navarivanja odabrali smo tri vrste elektroda proizvođača Elvaco-Bijeljina i Fiprom-Jesenice.

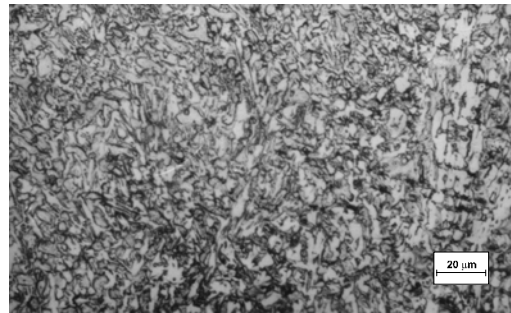
**Tablica 2** Elektrode primenjivane pri eksperimentalnim istraživanjima [19]

Red. br.	Oznaka elektrode Proizvođač / Standard	Vrsta habanja	Radna temperatura	Namena – navarivanje i reparatura
1.	MULTIZEN 55 – Elvaco Bijeljina E10-65 zt - DIN 8555/83	Metal-metal	$T > 500^{\circ}$	Reznih ivica alata, valjaka i dr.
2.	EL E 650 R - Elvaco Bijeljina E2 – 60 – DIN 8555/83	Metal-mineral	Sobna	Alata za obradu zemlje
3.	E Mn17Cr10Nb3 - Fiprom Jesenice E300 k umhilit – DIN 8555	Metal-metal	$T \approx 500^{\circ}C$	Delova izloženih izrazitoj abraziji i udarima

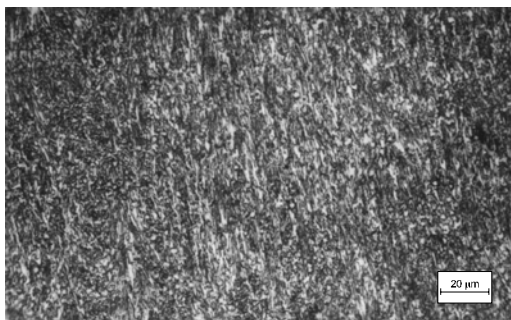
Medjusloj - HV1 = 453  
medjufazna struktura



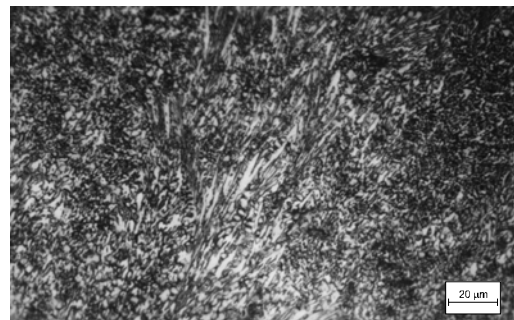
I sloj - HV1 = 660  
karbidi u martenzitnoj osnovi



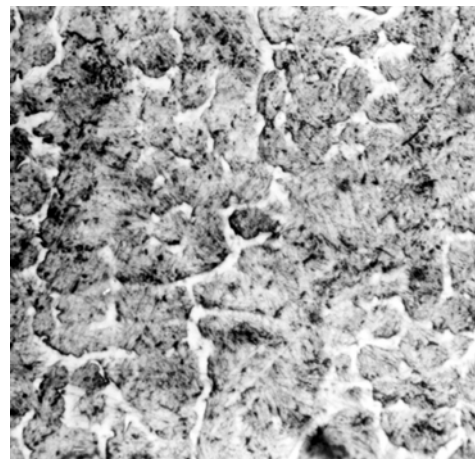
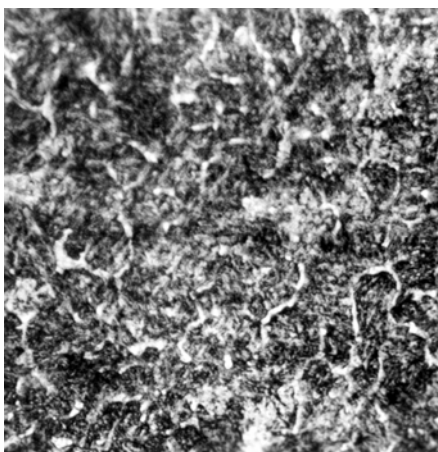
II sloj - HV1 = 742  
martenzitna struktura sa  
sitnim zrnima karbida



III sloj - HV1 = 772  
karbidi u martenzitnoj osnovi



**Slika 5** Mikrostruktura tvrdog navara izvedenog sa medjuslojem; (O.M. Č1220 – C= 0.12-0.18%, Si= 0.15-0.35%, Mn= 0.30-0.60%; D.M.- Medjusloj PIVA 29/9 R – C= 0.15%, Mn= 1.2%, Cr= 29%, Ni= 9%; D.M. – Navar MULTIZEN 55 – C= 5.5%, Cr= 22%, Nb= 8%, W= 7.0-8.0%, V=1.0%) [6]



**Slika 6** Mikrostruktura navara - martenzit sa izlučenim karbidima po granicama zrna (500×)

### 5.1 Elektroda E10-65 zt - DIN 8555/83 (Elvaco - Bijeljina MULTIZEN 55)

Elektroda je namenjena za navarivanje i reparaturu mašinskih delova izloženih izrazitom erozivnom i abrazivnom habanju na visokim temperaturama. Navari zadržavaju dobru otpornost na udarno opterećenje. Metal čistog navara sastoji se

od Cr, Nb, Mo i W karbida (55%), te zadržava visoku tvrdoću i na temperaturama preko 600°C. Kod višeslojnog navarivanja optimalni rezultati se postižu sa dva navarena sloja. Za deblje (višeslojne) navare potrebno je nanositi medjuslojeve hrom-nikl (29/9) ili hrom-nikl-manganskom elektrodom (18/8/6). Elektroda MULTIZEN 55 nalazi veliku primenu u ciglarskoj, prehrambenoj, ce-



mentnoj, građevinarskoj i rudarskoj industriji. Koeficijent iskorišćenja je oko 190%. Hemijski sastav ove elektrode je: C = 5.5%, Cr = 22%, Nb = 8.0%, Mo = 8.0%, W = 7.0-8.0%, V = 1.0%, ostalo Fe [19].

Legura za navarivanje ovog tipa, sa većim sadržajem ugljenika i karbidotvornih elemenata, nije preporučljivo nanositi u debljinama većim od nekoliko milimetara jer bi navari prskali i ljuštili se, naročito u uslovima udarnih opterećenja i termičkog zamora. Primer mikrostruktura višeslojnog navara, izvedenog dodatnim materijalom ovog tipa, dat je na slici 5.

### 5.2 Elektroda E2 – 60 – DIN 8555/83 (Elvaco- Bijeljina EL E 650 R)

Reč je o visokolegiranoj rutilnoj elektrodi (legura Cr-Mo). Naneti navari imaju veliku otpornost na habanje, a podnose i osrednje udare tokom eksploatacije. Navari se mogu mehanički obradivati samo brušenjem. Posebno je pogodna za navarivanje delova koji su izloženi trenju metala sa mineralima. Koristi se za navarivanje noževa na kašikama buldožera, zubaca na kašikama bagera, lopatica na bagerima, elemenata konvejera



*Slika 7 Mikrostruktura navara - austenit sa izlučenim karbidima hroma i niobijuma (200×)*

Do sada nema jedinstvenog stava o najpovoljnijem tipu strukture sa gledišta otpornosti protiv abrazivnog habanja. Neki autori smatraju za najpogodniju upravo austenitno-karbidnu strukturu, dok drugi martenzitno-karbidnu [6, 7, 10, 11]. Ovi različiti stavovi proizilaze iz raznorodnosti abrazivnog habanja i široke skale stvarnih radnih uslova.

## 6. ZAKLJUČAK

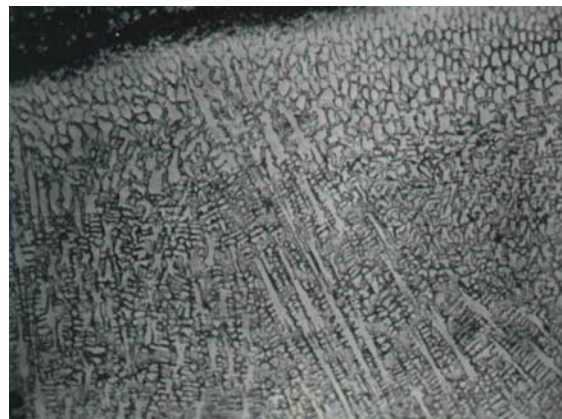
Ispitivanja na modelima ukazuju na to da presudan uticaj na izlazne osobine navarenog sloja, pored primenjene tehnologije, ima vrsta dodatnog materijala. U zavisnosti od uslova rada dela,

izloženih intenzivnom habanju, mašina u procesnoj industriji i dr. Hemijski sastav ove elektrode je: C = 0.7%, Mn = 1.5%, Si = 1.39%, Cr = 6.0%, Mo = 2.0 %, ostalo Fe.

Prema našim istraživanjima ova elektroda je pokazala visoku otpornost na abrazivno habanje. Vek ovako navarenih delova višestruko nadmašuje vek novih nenavarenih delova [7]. Mikrostruktura jednoslojnog navara data je na slici 6.

### 5. 3 Elektroda E300 k umhilit – DIN 8555 (Fiprom – Jesenice E Mn 17Cr10Nb3)

Reč je o debeloobloženoj visokoproduktivnoj bazičnoj elektrodi za navarivanje tvrdih i veoma žilavih austenitnih navara (C = 1.2%, Mn = 17.5%, Cr = 9.5%, Nb = 2.8% ), koji su veoma otporni na habanje usled udara i visokog pritiska. Iskivanjem navara na hladno, ili udarima navarene površine o radni medijum tvrdoća navara raste, a otpornost na habanje se povećava. Drugim rečima, lokalno udarno opterećenje dovodi do transformacije austenita u martenzit i povećanja tvrdoće u pripovršinskim slojevima [6, 7, 15]. U austenitnoj strukturi-matrici navara uočavaju se fino dispergovani karbidi hroma i niobijuma (sl. 7).



odnosno dominantne vrste habanja bira se najpovoljniji dodatni materijal odnosno tehnologija navarivanja. Ovde prikazani rezultati, koji se odnose na tvrdoću i mikrostrukturu, posredno ukazuju na otpornost na habanje nekih mašinskih delova u eksploatacionim uslovima To ukazuje na značaj pravilnog izbora dodatnog materijala i tehnologije navarivanja, posebno, kod delova izloženih izrazitom abrazivnom habanju.

## 7. LITERATURA

1. **Jovanović, M., Adamović, D., Lazić, V., Ratković, N.:** Mašinski materijali, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2003.
2. **Flinn, K., R., Trojan, K., P.:** Engineering Materials and Their Applications, 4-th edition, John Wiley & Sons, New York, Copyright © 1995.
3. **Smith, W., F.:** Principles of Materials Science and Engineering, 3-th edition, McGraw-Hill, International edition, Copyright © 1996.
4. **Djordjević, V.:** Mašinski materijali - prvi deo, Mašinski fakultet, Beograd, 1999.
5. **Wesolowski, K.:** Metaloznawstwo i obrobka cieplna z cwiczeniami, Wroclawskie Zaklady Graficzne, Wroclaw, 1977.
6. **Lazić, V.:** *Optimizacija procesa navarivanja sa aspekta triboloških karakteristika navara i zaostalih napona*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2001.
7. **Lazić, V., i dr.:** *Procena otpornosti na habanje navarenih slojeva izvedenih manganskom elektrodom*, Tribologija u industriji, Mašinski fakultet u Kragujevcu i Jugoslovensko društvo za tribologiju, Br. 3&4, Kragujevac, 2002.
8. **Prowans, S.:** Materialoznawstwo, Wydanie drugie, Warszawa-Poznan 1980.
9. **Ivanović, D., Vučić, V.:** Atomska i nuklearna fizika (fizika III), Naučna knjiga, Beograd, 1970.
10. **Blašković, P., Balla, J., Dzimko, M.:** Tribologija, Vydavatelstvo, ALFA, Bratislava, 1990.
11. **Ivković, B., Rac, A.:** Tribologija, Jugoslovensko društvo za tribologiju, Kragujevac, 1995.
12. **Božić, B.:** Fizička metalurgija, Naučna knjiga, Beograd, 1964.
13. **Božić, B.:** Hemijska metalurgija gvoždja i čelika, Naučna knjiga, Beograd, 1967.
14. **Hetmanczyk, M., Woznica, H.:** Metaloznawstwo, © Copyright by Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, 1979.
15. **Schumann, H.:** Metallographie, prevod na srpski: N. Vidojević i dr., Zavod za izdavanje udžbenika SRS, Beograd, 1965.
16. **Vidojević, N.:** Termička obrada metala, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1973
17. **Jovanović, M., Adamović, D., Lazić, V.:** Tehnologija zavarivanja-priručnik, samostalno autorsko izdanje, Kragujevac, 1996., (prvo izdanje).
18. **Dzubinski, J., Klimpel, A.:** Napawanie i natryskiwanie cieplne, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa, 1985.
19. **Katalozi:** Verkaufsgesellschaft M.B.H., Vosen-dorf., FEP-Plužine, Elvaco-Bijeljina, Železarna Jesenice - Fiprom, Bohler-Kapfenberg, Messer Griesheim-Frakfurt am Main, Esab- Goteborg, Lincoln Electric-SAD, ....
20. **Dumović, M.:** Izbor i primena legura za tvrdo navarivanje, *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 42(3), 1997., Beograd, str. 233-236.