

R. Prokić-Cvetković

ULOGA ZAŠTITNOG GASA PRI ZAVARIVANJU NISKOUGLJENIČNIH NISKOLEGIRANIH ČELIKA

THE ROLE OF SHIELDED GAS IN WELDING OF LOW-CARBON LOW-ALLOYED STEELS

Stručni rad / Professional paper

UDK /UDC: 621.791.754.051:669.14 621.791.754.051:539.55

Rad primljen / Paper received: 14.12.2000.

Adresa autora / Author's address:

Dr Radica Prokić-Cvetković

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 27. marta 80

Ključne reči:

- mešavina zaštitnog gasa
- ekvivalent kiseonika
- acikularni ferit
- žilavost

Izvod

U radu je analizirana uloga zaštitnog gasa pri elektrolučnom zavarivanju niskougljeničnih niskolegiranih čelika. Posebno su razmotreni pojam ekvivalenta kiseonika, koji predstavlja uporedni uticaj sastava mešavina gasova, kao i uslovi za nastanak acikularnog ferita. Prikazani su rezultati ispitivanja žilavosti metala šava u zavisnosti od ekvivalenta kiseonika u zaštitnom gasu.

Key words:

- shielding gas mixture
- oxygen equivalent
- acicular ferrite
- toughness

Abstract

The role of shielded gas in electric arc welding of low-carbon low alloyed steels is analyzed. Special interest is paid to shielding gas oxygen equivalent, which shows a comparative influence of gas mixtures composition, and the conditions of acicular ferrite appearance. Results of weld metal toughness testing as a function of shielding gas oxygen equivalent are presented.

UVOD

Osnovna funkcija zaštitnog gasa kod elektrolučnog zavarivanja je da spreči kontakt rastopljenog metala i okolne atmosfere. Ovo je neophodno jer većina metala, kada je zagrejana iznad tačke topljenja i nalazi se u okruženju vazduha, obrazuje okside i u manjoj meri nitride. Zaštitni gas za pojedine kombinacije osnovnog i dodatnog materijala se po pravilu bira na osnovu iskustva /1/. Zaštitni gasovi koji se obično koriste pri zavarivanju su: Ar ili He (MIG-postupak), CO₂ (MAG-postupak), N₂, H₂, kao i različite mešavine gasova (Ar+O₂, Ar+CO₂, Ar+CO₂+O₂, CO₂+O₂).

Mešavine gasova predstavljaju fizičku mešavinu različitih gasova, a proizvode se od polaznih gasova visoke čistoće. Ove mešavine se teorijski mogu proizvesti u svim odnosima, ukoliko mešanje nije ograničeno fizičkim ili hemijskim osobinama komponenata, kao i propisima sigurnosti. Mešavine se isporučuju ili unapred pripremljene ili se pripremaju kod potrošača u odgovarajućim uređajima za mešanje gasova od dve ili tri komponente, kako nezapaljivih tako i zapaljivih gasova.

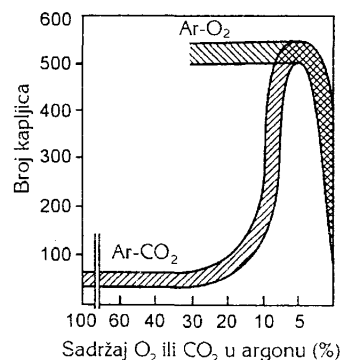
Zaštita gasnom mešavinom ima niz prednosti u odnosu na zaštitu čistim gasom, npr. bolji prenos dodatnog materijala, bolja tečljivost, stabilniji električni luk, bolje uvarivanje, manje razbrizgavanje i veća brzina zavarivanja /2/.

Na izbor zaštitnog gasa utiče veliki broj faktora, od kojih su najvažniji: karakter prenosa dodatnog materijala, dubina uvarivanja, brzina zavarivanja i sklonost ka stvaranju zajeda.

KARAKTERISTIKE POJEDINIH MEŠAVINA GASOVA**Mešavina Ar + O₂**

Najčešće se koristi Ar sa dodatkom 1÷2% O₂ ili 3÷5% O₂ i u oba slučaja se mogu dobiti uslovi kao pri zavarivanju u zaštiti čistom argona. Prenos dodatnog materijala može da

bude i krupnokapljicašt, mada pri zavarivanju u zaštiti mešavine gasova po pravilu dolazi do usitnjavanja kapi /3, 4/, što se vidi i sa sl. 1, uz minimalno razbrizgavanje /3/. Čist Ar po pravilu ne daje dovoljno stabilan luk, zbog čega nastaju greške tipa zajeda, poroznosti i nedovoljnog uvarivanja. Dodatak O₂ i/ili CO₂ argonu povećava stabilnost luka, smanjuje podrhtavanje luka i sprečava pojavu zajeda /1/. Dodatak kiseonika argonu smanjuje površinski napon tečnog metala, pri čemu se smanjuje jačina struje pri kojoj se prenos dodatnog materijala menja od kratkospojenog na prenos u mlazu i povećava tečljivost metalne kupke /3/. Ovakve mešavine se koriste za zavarivanje visokolegiranih čelika (Ar+1÷3%O₂) i ugljeničnih i niskolegiranih čelika (Ar+4÷8%O₂) /5/. Takođe je poznato da promena parcijalnog pritiska kiseonika u zaštitnom gasu uslovljava promene u hemijskom sastavu metala šava usled međudejstva gasa i metala tokom zavarivanja. Konačni sastav metala šava, dobijenog zavarivanjem u zaštiti gasa, zavisi od reakcija na istopljenom vrhu elektrodne žice, u metalnim kapima pri prolasku kroz luk, i u metalnoj kupki /1/.



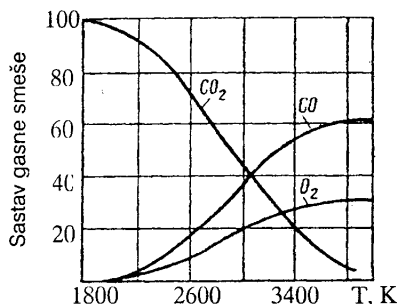
Slika 1. Uticaj sastava gasnih mešavina Ar+O₂ i Ar+CO₂ na broj kapljica pri zavarivanju elektrodom ϕ 1 mm i pri jačini struje 250 A /3/

Mešavina Ar+CO₂ i Ar+CO₂+O₂

Čist CO₂ kao zaštitni gas se upotrebljava za zavarivanje ugljeničnih i niskolegiranih čelika, pri čemu je moguće razbrizgavanje metala. Primena aktivnih gasova zahteva posebnu pažnju zbog oksidacije, jer tada se odigrava sledeća reakcija:

$$2\text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + \text{O}_2 \quad (1)$$

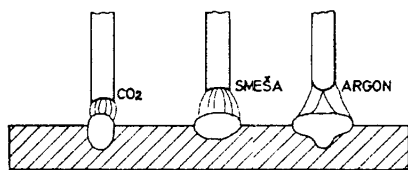
Smer ove reakcije zavisi od temperature. Na temperaturama nižim od 1600°C dominantna je asocijacija (spajanje) gasova, tj. postoji samo CO₂, dok sa porastom temperature dolazi do disocijacije (razlaganja) CO₂ pri čemu se povećava udeo CO i O₂, što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Sastav gasne smeše kod MAG postupka u zavisnosti od temperature /5/

Tako, na primer, na 3800°C ostaje svega 7% CO₂ uz 62% CO i 31% O₂. Kako je temperatura u središnjem delu luka najviša, oksidacija je u tom delu najizraženija, dok je na površini metalne kupke ovaj efekt manje izražen /5/.

Obično se primenjuju mešavine koje sadrže 20÷25% CO₂, ili 50% CO₂, a takođe i 20% CO₂ + 5% O₂ /4/. Pri dodavanju 5% CO₂ smanjuje se površinski napon tečnog metala i prenos dodatnog materijala iz krupnokapličastog prelazi u sitnokapličasti. Pri porastu sadržaja CO₂ u mešavini preko 20% površinski napon tečnog metala se povećava pa je prenos dodatnog materijala krupnokapličasti (sl. 1) /3/. Pri sadržaju CO₂ oko 50% oblik provara liči na onaj dobijen pri zavarivanju u zaštiti čistim CO₂. Zavarivanjem u zaštiti Ar+CO₂ ili Ar+CO₂+O₂ se postiže bolje formiranje šava i manje razbrizgavanje nego pri zavarivanju u zaštiti čistog CO₂, a u poređenju sa zavarivanjem u zaštiti čistog Ar bolje uvarivanje (sl. 3) i manje zračenje luka /3, 4/.



Slika 3. Uticaj vrste zaštitnog gasa na oblik šava /5/

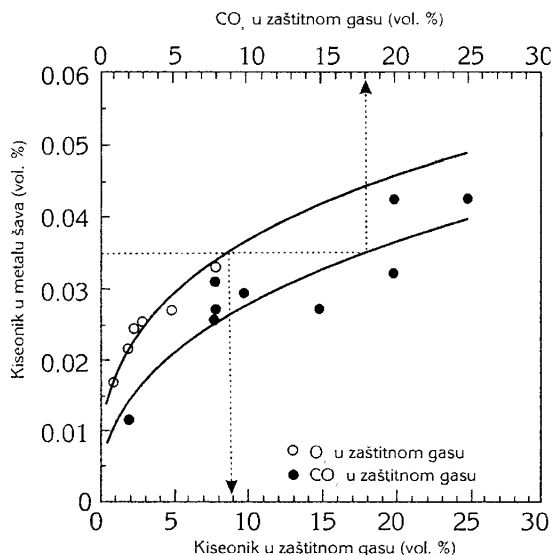
Mešavina CO₂ + O₂

Ovakva mešavina obično sadrži oko 20÷30% O₂. Prenos dodatnog materijala može da bude krupnokapličasti i impulsni sa čestim kratkim spojevima. Dodavanje kiseonika ugljendioksidu neznatno menja karakter procesa, tj. oksidacioni potencijal gasa se povećava, kao i temperatura

tečnog metala. Izgled formiranog šava je bolji nego pri zavarivanju u zaštiti CO₂, ali na površini ima više šljake /4/.

EKVIVALENTNI SADRŽAJ KISEONIKA U ZAŠTITNOM GASU

Povećanjem sadržaja kiseonika i/ili ugljendioksida u mešavini zaštitnog gasa povećava se sadržaj O₂ u metalu šava (sl. 4), koji bitno utiče na strukturne promene u metalu šava, o čemu će još biti reči. Pri tome je za dobijanje istog sadržaja O₂ u metalu šava potrebno dodati više CO₂ nego O₂ u zaštitni gas, kao što pokazuju horizontalne i vertikalne isprekidane linije na sl. 4 /1/.



Slika 4. Sadržaj kiseonika u metalu šava niskolegiranih čelika u funkciji sadržaja kiseonika i ugljendioksida u zaštitnom gasu /1/

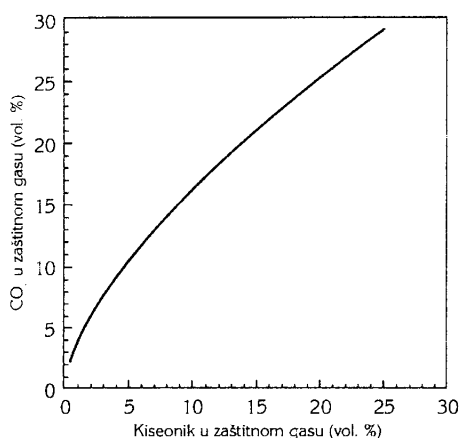
Podaci o odnosu sadržaja O₂ i CO₂ u zaštitnom gasu i sadržaja O₂ u metalu šava su dostupni u literaturi /1, 6, 7, 8/ i na osnovu njih su napravljene kalibracione krive, koje povezuju sadržaj O₂ i CO₂ u zaštitnom gasu sa sadržajem O₂ u metalu šava niskolegiranih čelika. Primer takve krive dat je na sl. 5, koja pokriva širok opseg industrijskih mešavina Ar+O₂ i Ar+CO₂. Kalibraciona kriva na sl. 5 omogućava da se sadržaj CO₂ u zaštitnom gasu izrazi preko ekvivalentnog sadržaja kiseonika u zaštitnom gasu.

Prema tome, ekvivalentni sadržaj kiseonika u mešavini Ar+CO₂ ukazuje na odgovarajući uticaj O₂ u mešavini. Korišćenje ekvivalenta kiseonika zaštitnog gasa takođe omogućava neposredno poređenje rezultata dobijenih različitim mešavinama. Ekvivalent kiseonika može da se odredi regresionom analizom korišćenjem stvarnih sadržaja O₂ u metalu šava i sastava zaštitnog gasa, empirijskim izrazom oblika /1/:

$$\text{Ekv. O}_2 \text{ zašt. gas} = -0,088 + 0,148 \cdot [\text{CO}_2]^{1,524} + [\text{O}_2] \quad (2)$$

gde su [CO₂] i [O₂] zapreminski udeli zaštitnih gasova u mešavini.

Sa sl. 4. i 5. se jasno vidi da relacija O₂-CO₂ nije linearna /1/, kako navode neki autori /6/, a novija istraživanja ukazuju na opravdanost uvođenja ekvivalenta kiseonika kao parametra koji određuje oksidacioni potencijal zaštitnog gasa /1/.



Slika 5. Kalibraciona kriva za O₂ i CO₂ u zaštitnom gasu koji daju sličan sadržaj O₂ u metalu šava /1/

Sadržaj ugljenika u metalu šava se menja vrlo malo sa povećanjem ekvivalenta kiseonika, jer drugi elementi lakše reaguju sa kiseonikom pa sprečavaju intenzivniju reakciju ugljenika. U slučaju dodavanja CO₂ zaštitnom gasu, gubitak ili povećanje sadržaja C u metalu šava zavisi od intenziteta raspada CO₂, što se može izraziti kao količnik parcijalnih pritisaka P_{CO_2}/P_{CO} . Ako je ovaj količnik veliki, tj. ako je parcijalni pritisak CO₂ veći od parcijalnog pritiska CO, onda postoji sila koja će ukloniti C iz metala šava. U suprotnom, u metalu šava će se javiti višak C.

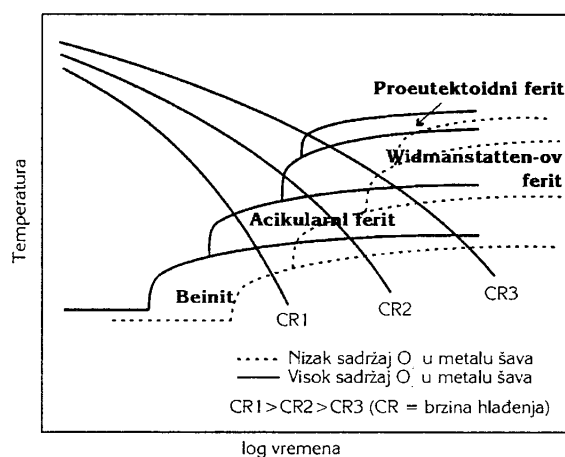
UTICAJ KISEONIKA U METALU ŠAVA NA TRANSFORMACIJE FERITA

Uticaj kiseonika na mikrostrukturu metala šava je analiziralo više autora /1,9/. Pri zavarivanju topljivom elektrodom u zaštiti inertnog gasa, dodatak kiseonika i/ili ugljendioksida zaštitnom gasu značajno povećava mogućnost apsorpcije kiseonika u metal šava. Međutim, samo deo kiseonika iz atmosfere luka će obrazovati okside sa legirajućim elementima u metalnoj kupki, jer će veći deo kiseonika da ode u okolinu. Oksidi će da isplivaju na površinu metalne kupke i preći u trosku ili će ostati zarobljeni kao uključci u metalu šava. Ovi uključci su važni za određivanje konačne mikrostrukture metala šava kao moguće mesto nastanka acikularnog ferita ili drugih produkata razlaganja austenita.

Ito i saradnici su pokazali da se sa porastom koncentracije kiseonika u metalu šava (a time i povećanjem sadržaja uključaka) mikrostruktura koja sadrži beinit zamenjuje acikularnim feritom /10/. Kasnije je pokazano da mala količina kiseonika pomera krivu početka transformacije ka dužim vremenima, ali se pri većoj količini kiseonika dešava suprotno, kao što se vidi na sl. 6, gde su date krive kontinualnog hlađenja metala šava konstrukcijskih čelika (tačka početka austenitnog razlaganja se menja sa promenom sadržaja kiseonika u metalu šava) /1/. Kada je u metalu šava prisutna manja količina kiseonika, što implicira i manji broj uključaka, odnos dužina/širina iglica AF se povećava, što prouzrokuje pad žilavosti /11/.

Metali šava koji sadrži male količine kiseonika, ispod 250 ppm (kao što je slučaj pri TIG zavarivanju i zavarivanju u zaštiti gasa sa malim ekvivalentom kiseonika), imaju krive

početka feritne transformacije pomerene unapred po vremenskoj skali. Ovaj uticaj je sličan uticaju elemenata koji ojačavaju čelik i koji pomažu obrazovanju ferita sa sekundarnim fazama u obliku beinita. Za istu brzinu hlađenja, sa porastom količine kiseonika u zaštitnom gasu, nastaje oksidacija ojačavajućih elemenata, pa se početak feritne transformacije pomera ka kraćim vremenima, što pogoduje obrazovanju dominirajuće strukture acikularnog ferita u metalu šava (sadržaj kiseonika od 250 ppm do 450 ppm). Sa daljim porastom sadržaja kiseonika u zaštitnom gasu, u mikrostrukturi metala šava počinje da dominira Vidmanštetenov ferit, odnosno ferit sa sekundarnom fazom. Oblik KH dijagrama takođe ukazuje na malu osetljivost količine proeutektoidnog ferita, koji se izdvaja po granicama zrna, na promene u sastavu zaštitnog gasa /1, 12/.



Slika 6. Šematski KH dijagram koji ilustruje efekt sadržaja kiseonika u metalu šava i brzine hlađenja /1/

PRIMER UTICAJA ZAŠTITNOG GASA

Zavarivan je čelik mikrolegiran Ti, Nb i V u zaštitnoj atmosferi 5 različitih mešavina gasova, /13/, čiji su hemijski sastavi i ekvivalent kiseonika u mešavini zaštitnog gasa dati u tab. 1. Kao dodatni materijal pri zavarivanju korišćena je elektrodna žica VAC 60 Ni, ϕ 1,2 mm. Uneta količina toplote pri zavarivanju je bila približno 7 kJ/cm.

Tabela 1. Hemijski sastav mešavina gasova i ekvivalent kiseonika

Redni broj mešavine	Sadržaj komponentata u mešavini (zapr. %)			Ekvivalent kiseonika* u mešavini zaštitnog gasa
	CO ₂	O ₂	Ar	
1	5,24	-	ostatak	1,76
2	5,00	0,91	ostatak	2,54
3	4,70	2,30	ostatak	3,78
4	10,30	-	ostatak	5,09
5	14,80	-	ostatak	8,90

* Ekvivalent kiseonika u zaštitnom gasu izračunat prema jedn. 2.

Gasovi su isporučeni od strane Tehnogasa u vidu pripremljenih mešavina u bocama od 10 l, pod pritiskom 150 bar, osim mešavine pod brojem 2, koja je isporučena u boci od 40 l.

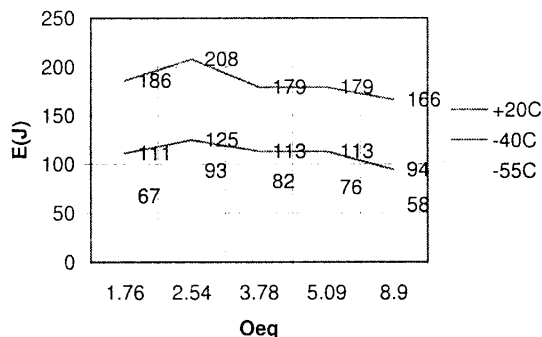
Iz tab. 1. se vidi da su mešavine gasova pripremljene na bazi argona, sa dodatkom određene količine aktivnih gasova. Ugljendioksid se u različitim količinama nalazi u svim mešavinama, a mešavinama 2 i 3 je dodat i kiseonik.

Na osnovu vizuelnog praćenja procesa zavarivanja mogu da se navedu sledeće karakteristike ponašanja mešavina gasova pri zavarivanju /13/:

1. 5,24%CO₂+Ar - Luk relativno stabilan, vrlo malo podrhtava. Izgled šava relativno gladak. Razbrizgavanje, odnosno stvaranje bobica, minimalno.
2. 5,0%CO₂+0,91%O₂+Ar - Stabilnost luka je veća nego u prethodnom slučaju. Izgled šava gladak; dobro razlivanje dodatnog materijala. Nema razbrizgavanja.
3. 4,70%CO₂+2,30%O₂+Ar - Najstabilniji luk. Izgled šava gladak; dobro razlivanje dodatnog materijala. Nema razbrizgavanja.
4. 10,30%CO₂+Ar - Luk vrlo malo podrhtava. Izgled šava relativno gladak; malo razbrizgavanje.
5. 14,80%CO₂+Ar - Luk je nestabilniji nego u prethodnim slučajevima. Relativno gladak šav i veće razbrizgavanje.

Najveća stabilnost luka je pri mešavini br. 3, pri čemu je i razlivanje dodatnog materijala najbolje. Pri ovoj mešavini je i izgled šava najbolji, a razbrizgavanja gotovo da nije bilo.

Pored uočenog uticaja zaštitnih gasova na stabilnost luka i izgled šava, bitno je naglasiti da vrsta zaštitnog gasa utiče i na žilavost metala šava. Stoga je razmatran uticaj ekvivalentnog sadržaja kiseonika na žilavost metala šava na +20°C, -40°C i -55°C, kao što je prikazano na sl. 7 /13/.



Slika 7. Zavisnost žilavosti metala šava mikrolegiranog čelika od ekvivalenta kiseonika

Kao što se sa sl. 7. vidi, žilavost metala šava se menja u zavisnosti od ekvivalentnog sadržaja kiseonika u zaštitnom gasu. Sa povećanjem ekvivalenta kiseonika žilavost prvo ras-

te, a zatim opada, što je u direktnoj vezi sa mikrostrukturom metala šava /13/. Najbolju žilavost metala šava na svim temperaturama ima zavareni spoj izveden u zaštitnoj atmosferi mešavine br. 2, čiji je ekvivalent kiseonika 2,54.

ZAKLJUČCI

Na osnovu literaturnih podataka, teorijskih postavki i eksperimentalnih istraživanja ponašanja određenih mešavina gasova pri zavarivanju i njihovog uticaja na svojstva metala šava, mogu da se izvedu sledeći zaključci:

- Ekvivalentni sadržaj kiseonika zaštitnog gasa je značajan parametar, koji adekvatno opisuje ponašanje gasnih mešavina i pruža mogućnost poređenja njihovog uticaja na osobine metala šava zavarenih spojeva.
- Dodavanje kiseonika mešavini argona i ugljendioksida utiče na povećanje stabilnosti električnog luka i smanjenje razbrizgavanja dodatnog materijala.
- Gasne mešavine treba koristiti kao već unapred pripremljene kod proizvođača gasova ili ako je moguće koristiti vrlo precizne uređaje za mešanje odgovarajućih komponenta iz posebnih boca. Kako je pokazano da različite mešavine gasova iako se ne razlikuju mnogo između sebe po ekvivalentnom sadržaju kiseonika, dosta utiču na žilavost metala šava, neophodno je da sastav mešavine gasova bude strogo kontrolisan.

Literatura

1. M.I. Onsoen, S. Lui and D.L. Olson, *Welding Journal* (1996) 216.
2. *Welding Handbook*, 7th Edition (1984).
3. N.N. Potapova, *Svaročnye Materialy Dlya Dugovoj Svarki*, Tom 1, "Mašinstroenie" Moskva (1989).
4. A.G. Potapevskij, *Svarka v Zashchitnih Gazah Plavyashchimcy Elektroda*, "Mašinstroenie" Moskva (1974).
5. A. Sedmak i ostali, *Mašinski materijali*, II deo, Mašinski fakultet, Beograd (2000).
6. N. Stanbacka, K.A. Persson, *Welding Journal* (1989) 41-47.
7. T. Kuwana, Y. Sato, *IW Doc. IX-1593-90*.
8. T. Kuwana, Y. Sato, *IW Doc. IX-1636-91*.
9. S. Lui, D.L. Olson, *Welding Journal* (1986) 139-149.
10. H.K.D.H. Badeshija, *Bainite in Steels*, The Institute of Materials, London (1992).
11. R.A. Farrar, Z. Zhang, *MST*, Vol. 11 (1995) 759-764.
12. R.C. Cochrane, *IW Doc. IX-1248-82*.
13. R. Prokić-Cvetković, *Doktorska disertacija*, Mašinski fakultet, Beograd (2000).