

**CEMENTACIJA POD NISKIM PRITISKOM (LPC) I NITRIRANJE POD  
NISKIM PRITISKOM (LPN) MLAZNICA ZA UBRIZGAVANJE GORIVA  
IZRADJENIH OD ALATNOG ČELIKA  
(PREVOD)**

Maciej Korecki, SECO/WARWICK

Piotr Kula, Lodz University of Technology

Emilia Wolowiec, Lodz University of Technology

Michal Bazel, SECO/WARWICK

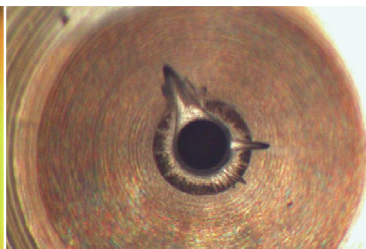
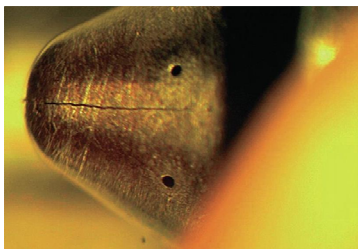
Michal Sut, SECO/WARWICK

Izlaganje prikazuje najnovija dostignuća u termičkoj obradi mlaznica za ubrizgavanje goriva izradjenih od alatnog čelika za topli rad koje se koriste u dizel motorima. Primenjeni su razni postupci poboljšanja osobina površine pomoću postupaka cementacije i nitiranja u vakuumu, naročito pogodnih u slučaju radnih komada složene geometrije i teško pristupačnih površina poput slepih rupa. Razmatrane su promene raznih parametara postupaka i temperaturnih sekvenci kao i njihov uticaj na mikrostrukturu površine, tvrdoću i ujednačenost slojeva. Pronadjena je kompleksna tehnologija koja uključuje termohemijske procese dopunjene sa kaljenjem gasom pod visokim pritiskom (HPGQ), dubokim hladjenjem i popuštanjem. Sve faze procesa su izvedene u jednokomornoj vakuumskoj peći opremljenoj potrebnim uređajima za LPC, LPN i HPGQ postupke.



## 1. UVOD

Mlaznice za ubrizgavanje goriva (sl. 1) su ključni element dizel motora koji utiče na njegove performanse, uključiv i potrošnju goriva kao i pouzdanost u radu. Šta više, one igraju glavnu ulogu i u emisiji štetnih supstanci. Tokom svog cikličnog rada one podnose razna opterećenja, rade na povišenoj temperaturi i pod visokim pritiskom (1500-3000 bar) podnoseći intenzivno strujanje



tečnosti (preko 100 m/s) [1]. Usled toga mlaznice su sklone pojavi ubrzanog habanja i drugim kvarovima (sl. 2) [2]. Konstrukcija mlaznica za

ubrizgavanje goriva mora osigurati, odgovarajuću čvrstoću, kao i otpornost prema udarcima, zamoru i abraziji u protočnom kanalu.

Mlaznice se prave od srednje i visoko legiranih čelika uz dodatno otvrdnjavanje površine. Tipično, zatezna čvrstoća jezgra se kreće od 1000-1500 MPa za čelike tipa 20MnCr5, 17CrNiMo6, EN39B, 18CrNi8, a povećana tvrdoća površine (preko 60 HRC) se postiže kaljenjem posle koga sledi cementacija.

Odgovarajuća termička obrada je izvedena u vakuumskoj peći koja ima mogućnost cementacije LPC i kaljenja gasom pod visokim pritiskom HPGQ od 15 bar i više. Vakuumska cementacija omogućuje dobijanje ujednačenog sloja u kanalima mlaznice koji su uski i složenog oblika pa stoga nepristupačni za klasičnu atmosferu za naugljeničenje. S druge strane, kaljenje gasom eliminiše potrebu za čišćenjem posle kaljenja u ulju, koje nikako nije jednostavno. U pojedinim slučajevima, kao rešenje za povećanje tvrdoće površine, primenjeno je nitriranje umesto cementacije.

U nekim slučajevima mlaznice su izradjene od izdržljivijih čelika, kao na pr. od alatnih čelika za topli rad. U takvom slučaju čvrstoća značajno narasta (preko 2000 MPa), iako površina ipak i dalje zahteva dodatno poboljšanje.

Ovo izlaganje prikazuje ceo kompleks primenjenih postupaka i ostvarenih rezultata termičke i termohemijske obrade u vakuumskoj peći mlaznica za ubrizgavanje goriva izradjenih od alatnog čelika za topli rad. Tehnološki postupci koji

su primenjeni uključuju vakuumsku cementaciju i nitiranje (LPC i LPN), kaljenje gasom pod visokim pritiskom (HPGQ), duboko hladjenje i popuštanje.

## 2. PREDMET I CILJEVI ISTRAŽIVANJA I ISPITIVANJA

Predmet istraživanja su mlaznice za ubrizgavanje goriva izradjene od čelika X37CrMoV5-1 (1.2343, H11) čiji je oblik prikazan na slici 3.

Svrha istraživanja je da se na površinama, a naročito na unutrašnjim površinama, dobije ravnomeran, otvrdnut površinski sloj, a da se pri tome očuva poželjna tvrdoća jezgra radnog komada. Željeni površinski slojevi su ostvareni pomoću cementacije i nitiranja.



## 3. OPREMA ZA ISTRAŽIVANJE

Za istraživanje je korišćena jednodomna vakuumska peć firme SECO/WARWICK, model 15.0VPT-4035/36IQ CN (sl. 4) sa radnom zapreminom komore veličine 600x600x900 mm, opremljena sa potrebnim uređajima za vakuumsku cementaciju (LPC) i nitiranje (LPN) i sistemom za kaljenje u struji gasa pod visokim pritiskom (HPGQ)

Cementacija je izvedena u gasnoj mešavini acetilena ( $C_2H_2$ ), etilena ( $C_2H_4$ ) i vodonika ( $H_2$ ), dok je nitiranje izvedeno u atmosferi amonijaka ( $NH_3$ ).



Šarža težine 250 kg je sastavljena od balstnih šipki duž kojih su bile raspoređene mlaznice za ubrizgavanje na kojima su vršena ispitivanja. Takva šarža odslikava tipične uslove u kojima se odvija industrijska termička obrada mlaznica.

#### 4. POSTUPAK CEMENTACIJE (LPC)

Vakuumskom cementacijom su izvedene četiri serije termičke obrade. Cementaciji je prethodilo prednitriranje tehnologijom/postupkom PreNitLPC® [3] u cilju smanjenja rasta zrna austenita na visokim temperaturama. Kompletan proces se sastoji iz sekvenci prednitriranja, vakuumske cementacije (korištena je FineCarb® [4] tehnologija) na ranim temperaturama, čemu je svaki put, za svaku seriju ponovo, sledilo (direktno) kaljenje azotom pod pritiskom od 5 bar duboko hladjenje na  $-75^{\circ}\text{C}$  / 2 h i popuštanje 2 h na temperaturi od  $200^{\circ}\text{C}$ .

Cementacija je vršena na 4 različite temperature: 860, 920, 950 i  $1020^{\circ}\text{C}$ , i u svim slučajevima je ciljana površinska koncentracija ugljenika na nivou od 0,60 % i planirana dubina cementiranog sloja od 0,4 mm.

Ukupno vreme za primarno naugljeničenja (C) i difuziju (D) je bilo kako sledi:

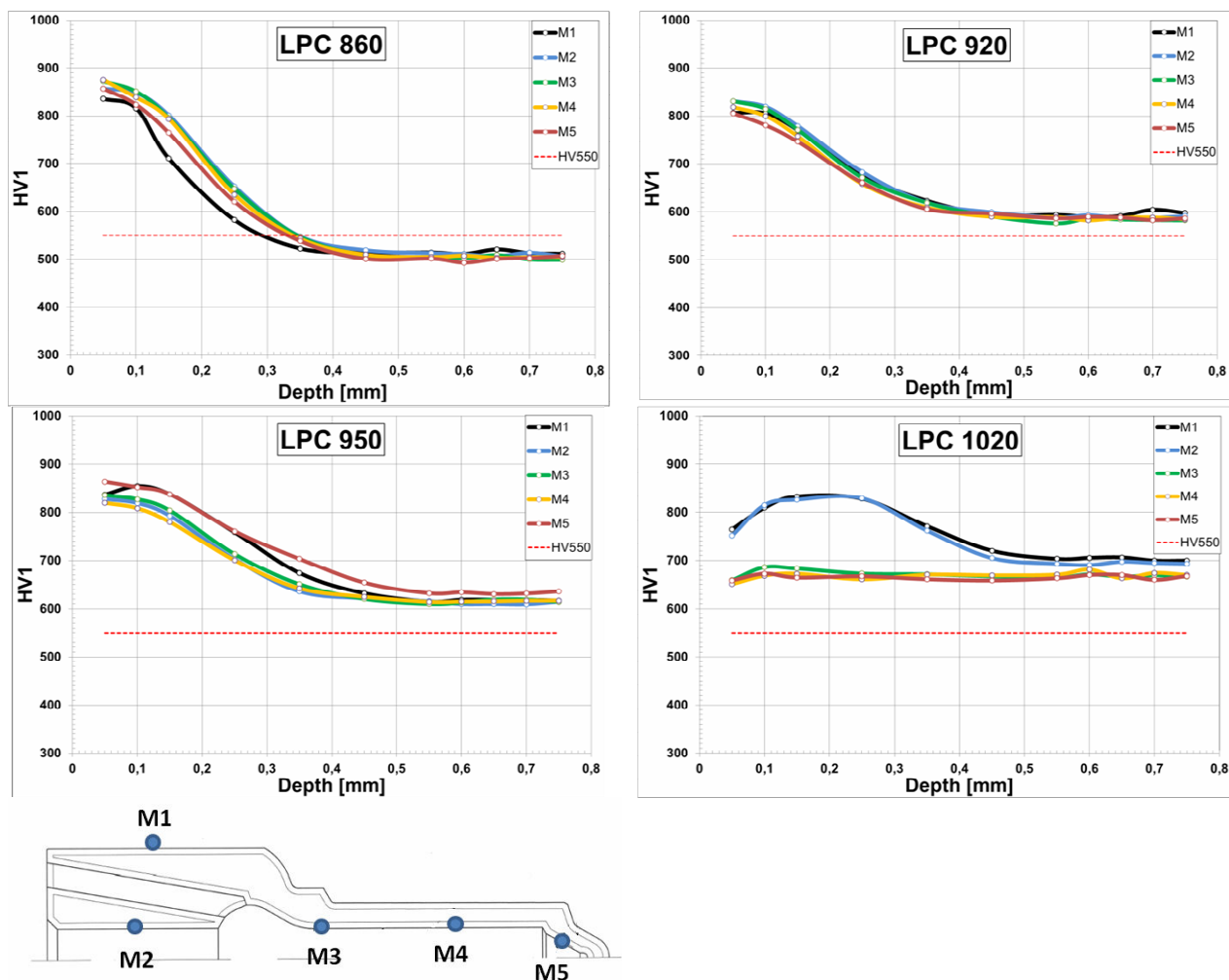
- LPC 860      C = 10 min,    D = 70 min
- LPC 920      C = 4 min,      D = 40 min
- LPC 950      C = 4 min,      D = 20 min
- LPC 1020     C = 2 min,      D = 6 min

Slika 5. prikazuje uzdužni presek mlaznice nakon LPC cementacije na temperaturi od  $920^{\circ}\text{C}$ . Ujednačenost cementiranog sloja je postignuta kako na spoljnoj površini tako i u kanalu mlaznice, što je karakteristično za vakuumsku cementaciju. Ravnomernost cementiranog sloja u pojedinačnim procesima termičke obrade je prikazana na slici 6. kao kriva tvrdoće merene u mernim tačkama 1 do 5.



Obradom na temperaturi od  $860^{\circ}\text{C}$  postignut je ujednačen sloj i na spoljnoj i na unutrašnjoj površini mlaznice. Površinska tvrdoća je iznosila oko 860 HV (na 0,05 mm) a

tvrdoća jezgra 500 HV, uz predefinisanu dubinu sloja od 0,35 mm za diferencijalnu tvrdoću jezgra od +50 HV.

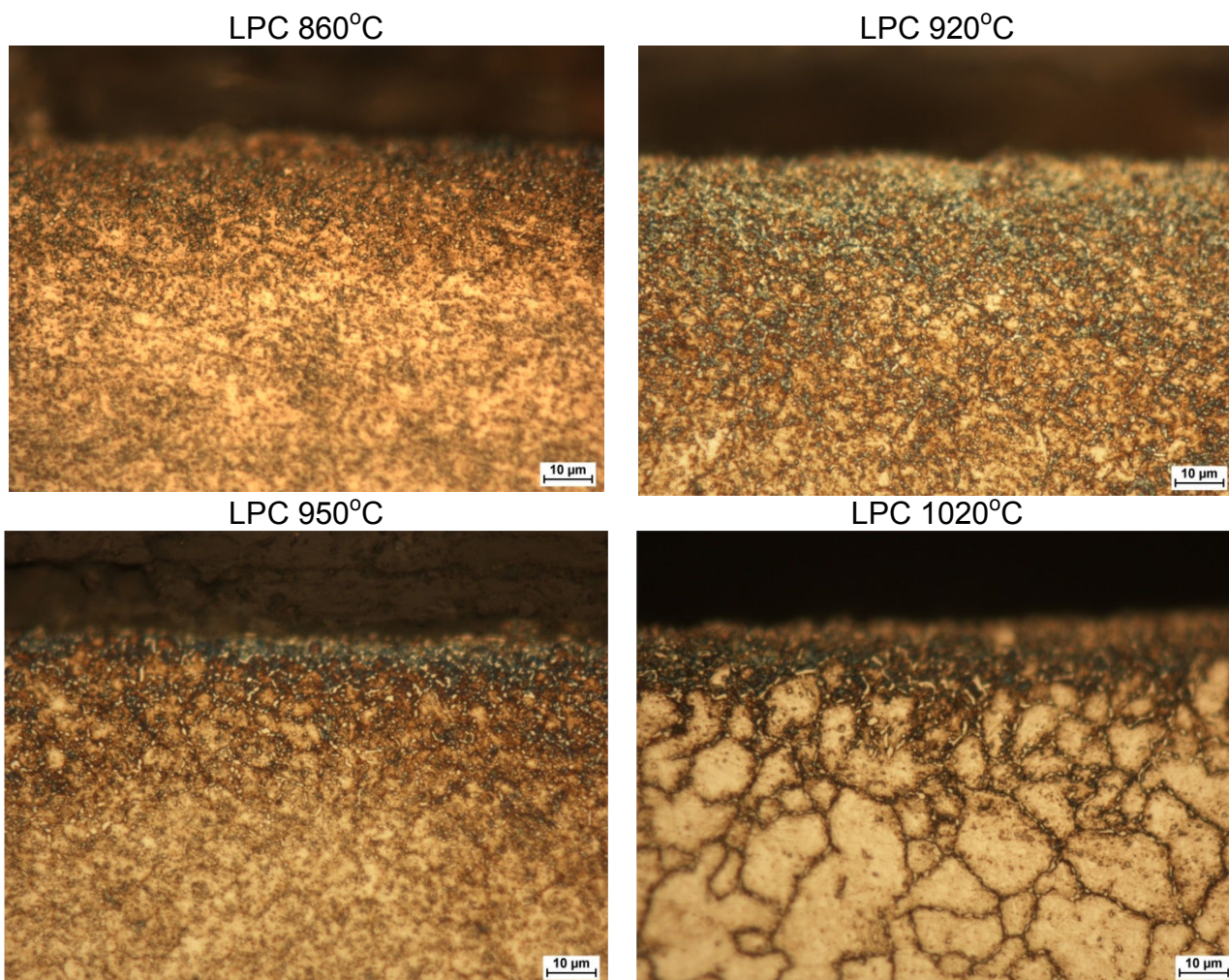


Slika 6. Kriva tvrdoće posle LPC procesa merene u mernim tačkama M1 do M5

LPC obrada na temperaturi od 920 °C (LPC 920) je rezultirala ujednačenim otvrdnutim slojem tvrdoće 820 HV i dubine od 0,30 mm do tvrdoće jezgra od 590 HV.

Takođe je i cementacija na 950 °C (LPC 950) rezultirala odgovarajuće ujednačenim cementiranim slojem sa parametrima: dubina 0,35 mm, površinska tvrdoća od 850 HV i tvrdoća jezgra od 620 HV.

Samo process LPC 1020 nije dao dobre rezultate. Cementirani sloj se formirao samo na spoljnoj površini mlaznice dok se na unutrašnjoj nije pojavio. Maksimalna tvrdoća je bila 850 HV na površini i 680 HV u jezgu. Kriva tvrdoće spoljašnjeg sloja pokazuje pad tvrdoće odmah od površine, što ukazuje na neodgovarajuću mikrostrukturu.

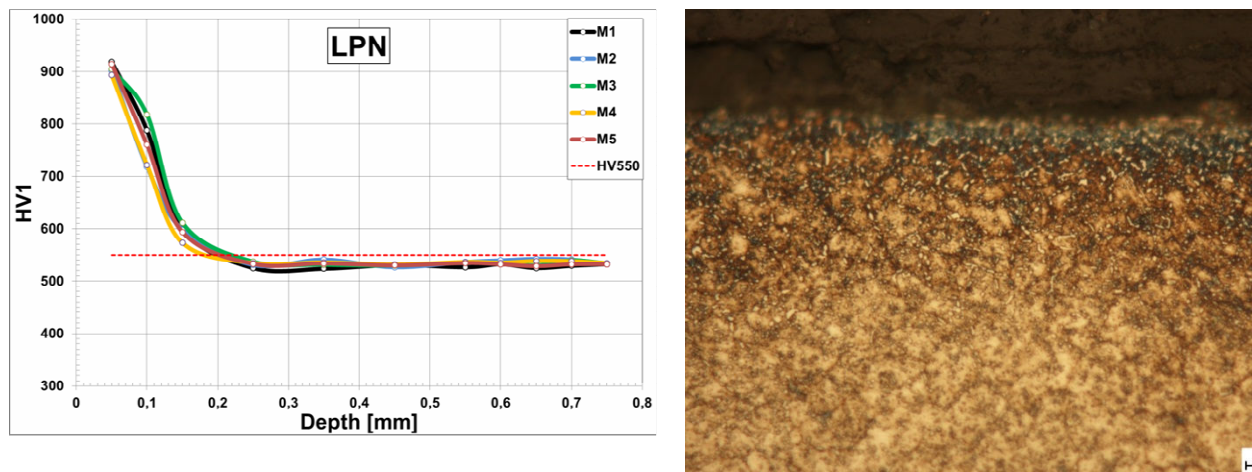


**Fig. 7 . Mikrostruktura površinskog sloja posle LPC na raznim temperaturama**

Slika 7. Uporedno prikazuje mikrostrukture otvrdnutih slojeva nakon pojedinih procesa. Karakteristična je pojava globularnih karbida u martenzitnoj matrici. Njihova veličina i broj raste paralelno sa temperaturom procesa. Na visokim temperaturama oni imaju tendenciju stvaranja vidljivo umrežene strukture po granicama zrna austenita, kakva je i ona nastala posle procesa LPC 1020.

## 5. POSTUPAK NITRIRANJA (LPN)

Nitrirani sloj je nastao kao rezultat kompleksnog procesa sastavljenog od sledećih faza: austenitizacija na 1030 °C, kaljenje u azotu pod pritiskom od 5 bar, popuštanje na 580 °C / 2 h i vakuumsko nitriranje na temperaturi od 560 °C / 4 h.



Slika 8. Kriva tvrdoće i mikrostruktura nitriranog sloja nakon LPN postupka

Rezultat ovog procesa je prikazan na slici 8. kao kriva tvrdoće merene u odabranim mernim tačkama na unutrašnjoj i spoljašnjoj površini mlaznice (M1 do M5). Nitriranjem je dobijen veoma uniformni sloj sa površinskom tvrdoćom koja na dubini od 0,05 mm prelazi 900 HV i koji dostiže debljinu od blizu 0,2 mm uz tvrdoću jezgra od 530 HV.

## 6. REZIME

U izvedenim procesima su postignuti sledeći rezultati:

Proces	Tvrdoća površine	Tvrdoća jezgra	Dubina sloja	Ujednačenost sloja
	[HV/HRC]	[HV/HRC]	[mm]	
LPC 860	850/66	500/49	0,35	Dobra
LPC 920	820/65	590/55	0,30	Vrlo dobra
LPC 950	850/66	620/56	0,35	Dobra
LPC 1020	850/66	680/59	0 - 0,40	Nedovoljna
LPN	>900/67	530/51	0,18	Vrlo dobra

## 7. ZAKLJUČAK

Procesi vakuumske cementacije i nitiranja omogućuju postizanje ravnomerno otvrdnutih površinskih slojeva na teško pristupačnim površinama mlaznica za ubrizgavanje goriva izradjenih od alatnog čelika za topli rad X37CrMoV5-1.

U slučaju vakuumske cementacije tvrdoća površine prelazi 800 HV uz temperature popuštanja od 200 °C (tvrdoća se smanjuje ako ova temperature raste). Tvrdoća jezgra zavisi od temperature kaljenja i raste paralelno sa temperaturom; u ovim probama od 49 do 59 HRC, i zavisi takodje i od temperature popuštanja.

Cementacija na 1020 °C nije dala željenu ujednačenost površinskog sloja i mikrostrukturu (mreža izlučenih karbida) usled suviše velikog intenziteta procesa obrade (nekontrolabilno) i tendencije da se u čeliku na višim temperaturama stvaraju karbidi. LPN proces na tim temperaturama bi morao biti usavršen.

Postignuti su obećavajući rezultati u procesu vakuumskog nitiranja: ujednačenost površinskog sloja i najviša tvrdoća površine koja prelazi 900 HV kao i stabilnost parametara otvrdnutog sloja na višim temperaturama koje prelaze 500 °C.

U svetlu ove studije se može ustvrditi da je tehnologija otvrdnjavanja površine mlaznica za ubrizgavanje izradjenih od alatnog čelika postupcima vakuumske cementacije i nitiranja razvijena, ispitana i spremna za industrijsku implementaciju.

Dalja istraživanja će se fokusirati na usavršavanju LPC cementacije na visokim temperaturama i na upotrebu hibridnih postupaka cementacije i nitiranja.

## 8. LITERATURA

1. P. J. Blau, N. Yang, *“Materials for high pressure fuel injection systems”*, US Dept. of Energy, poster presentation May 10, 2011
2. [http://www.dieselpowermag.com/tech/1211dp\\_why\\_diesel\\_fuel\\_injectors\\_fail/viewall.html](http://www.dieselpowermag.com/tech/1211dp_why_diesel_fuel_injectors_fail/viewall.html)
3. Kula, P.; Pietrasik, R.; Dybowski, K.; Korecki, M.; Olejnik, J. *Prenit LPC - the modern technology for automotive, New Challenges*. In: *Heat Treatment and Surface Engineering, Dubrownik-Cavtat, Croatia, 2009, 165-170.*
4. Kula, P.; Korecki, M.; Pietrasik, R.; Wołowiec, E.; Dybowski, K.; Kołodziejczyk, Ł.; Atraszkiewicz, R.; Krasowski, M. *FineCarb® - the flexible system for low pressure carburizing. New options and performance*, The Japan Society for Heat Treatment 2009, *49* (1), 133-136.