

# Toplinsko naštrecavanje

---

**Torer, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:402648>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-25**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivan Torer**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Student:

Ivan Torer

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu na podršci tijekom pisanja ovog rada, doc.dr.sc. Ivici Garašiću na pomoći u pisanju eksperimentalnog rada i dr. sc. Tanji Tomić koja mi je također pomogla svojim stručnim savjetima.

Zahvaljujem se Katedri za zavarene konstrukcije na znanju koje su mu podarili kroz dosadašnji studij.

Ivan Torer



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum 25 -02- 2015	Prilog
Klasa: 602-04/15-6 B	
Ur.broj: 15-7703-15-61	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **IVAN TORER**

Mat. br.: 0035181542

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **TOPLINSKO NAŠTRCAVANJE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **THERMAL SPRAYING**

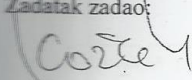
Opis zadatka:

Proučiti razloge i načine provedbe toplinskog naštrcavanja obzirom na primjenu materijala u eksploataciji i izvedbi konstrukcije. Proučiti nekoliko vrsta toplinskog naštrcavanja i napraviti kratak pregled i usporedbu postupaka ovisno o korištenom toplinskom izvoru. Opisati opremu potrebnu za toplinsko naštrcavanje i vrste dodatnog materijala.

U eksperimentalnom dijelu analizirati uzorke načinjene plazma naštrcavanjem, ocijeniti prikladnost tehnologije i utvrditi specifične greške koje su se pojavile. Dati prijedloge za poboljšanje tehnologije plazma naštrcavanja ovisno o vrsti praška i zahtjevima naštrcanog sloja.

Zadatak zadan:  
17. studenog 2014.

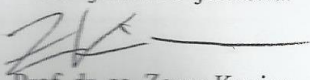
Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:  
1. rok: 26. veljače 2015.  
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Zoran Kunica

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
2. TOPLINSKO NAŠTRCAVANJE.....	2
2.1. Početak toplinskog naštrcavanja.....	4
2.2. Svrha toplinskog naštrcavanja.....	6
2.3. Princip rada postignut toplinskim naštrcavanjem.....	6
2.4. Uporaba toplinskog naštrcavanja.....	8
3. VRSTE TOPLINSKOG NAŠTRCAVANJA.....	11
3.1. Plinsko naštrcavanje.....	12
3.2. Plinsko naštrcavanje praškom.....	12
3.2.1. Princip rada i karakteristike.....	12
3.2.2. Dodatni materijal za naštrcavanje.....	14
3.2.3. Oprema kod plinskog naštrcavanja.....	15
3.3. Elektrolučno naštrcavanje.....	16
3.3.1. Princip rada i karakteritike.....	16
3.4. Plazma naštrcavanje.....	18
3.4.1. Princip rada i karakteristike.....	18
3.5. HVOF (High velocity oxy fuel) naštrcavanje.....	21
3.5.1. Karakteristike HVOF (High velocity oxy fuel).....	21
3.5.2. Prednosti i nedostaci HVOF (High velocity oxy fuel) postupka.....	24
3.5.3. Oprema kod HVOF (High velocity oxy fuel) naštrcavanja.....	24
4. USPOREDBA POSTUPAKA TOPLINSKOG NAŠTRCAVANJA .....	26
5. NAKNADNA OBRADA NAKOG NAŠTRCANOG SLOJA .....	27

---

6. EKSPERIMENTALNI RAD.....	29
6.1. Oprema kod plazma navarivanja.....	29
6.2. Oblikovanje eksperimentalnog rada.....	30
6.3. Analiza mikrostrukture.....	33
6.4. Mjerenje tvrdoće.....	36
6.5. Problemi pri nastanku sloja.....	39
7. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA.....	42

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Patent toplinskog naštrcavanja.....	4
Slika 2. a) Max Schoop u svom istraživačkom laboratoriju	
b) Izgled originalnog patenta za elektrolučno naštrcavanje.....	5
Slika 3. Faze toplinskog naštrcavanja.....	7
Slika 4. Tipičan poprečni presjek toplinski naštrcanog sloja.....	7
Slika 5. Primjena toplinskog naštrcavanja u automobilske industriji.....	9
Slika 6. Primjena toplinskog naštrcavanja u papirnoj industriji.....	9
Slika 7. Primjena toplinskog naštrcavanja u zrakoplovnoj industriji.....	10
Slika 8. Primjena toplinskog naštrcavanja u medicini.....	10
Slika 9. Podjela postupaka toplinskog naštrcavanja i njihove podvarijante.....	11
Slika 10. Shematski prikaz plinskog naštrcavanja praškom.....	13
Slika 11. Plinsko naštrcavanje praškom.....	15
Slika 12. Shematski prikaz elektrolučnog naštrcavanja.....	16
Slika 13. Shema postupka elektrolučnog naštrcavanja pomoću žice.....	17
Slika 14. Pištolj za elektrolučno naštrcavanje na robotskoj ruci.....	17
Slika 15. Shematski prikaz plazma naštrcavanja.....	19
Slika 16. Plazma naštrcavanje.....	20
Slika 17. Shematski prikaz prve generacije HVOF pištolja „Jet Kote™ HVOF“.....	21
Slika 18. Shematski prikaz druge generacije HVOF pištolja „Diamond Jet“.....	22
Slika 19. Shematski prikaz treće generacije HVOF pištolja „JP 5000“.....	22
Slika 20. Shematski prikaz HVOF (High velocity oxy fuel) naštrcavanja.....	23
Slika 21. Shematski prikaz realnog HVOF (High velocity oxy fuel) sustava.....	25
Slika 22. Oprema za plazma navarivanje praškom.....	30
Slika 23. Obradak nakon nanesenog sloja plazma navarivanjem.....	31
Slika 24. Obradak nakon dodatne obrade tokarenja.....	31
Slika 25. Tračna pila pomoću koje su izrezani uzorci.....	33



Slika 26. Uzorak 1 (vanjski dio).....	34
Slika 27. Uzorak 2 (unutarnji dio).....	34
Slika 28. Struktura uzorka 1.....	35
Slika 29. Struktura uzorka 2.....	36

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1.	Prikaz toplinskog naštrcavanja u industrijskoj primjeni.....	8
Tablica 2.	Usporedba različitih procesa toplinskog naštrcavanja.....	26
Tablica 3.	Parametri pri navarivanju unutarnjeg prstena.....	32
Tablica 4.	Parametri pri navarivanju vanjskog prstena.....	32
Tablica 5.	Prikaz mjerenja tvrdoće uzorka 1.....	37
Tablica 6.	Prikaz mjerenja tvrdoće uzorka 2.....	38

**POPIS OZNAKA**

OZNAKA	OPIS	MJERNA JEDINICA
$\sigma_d(T_o)$	sekundarno naprezanje	N/mm
$\alpha_d$	koeficijent toplinskog širenja sloja	K <sup>-1</sup>
$\alpha_s$	koeficijent toplinskog širenja podloge	K <sup>-1</sup>
$T_o$	temperatura podloge	K
$T_d$	temperatura sloja	K
$E_d$	modul elastičnosti sloja	N/mm <sup>2</sup>
$HV$	tvrdoća po Vickersu	---
$F$	sila utiskivanja	N
$A$	površina otiska u obliku četverostrane piramide sa kvadratnom osnovicom	mm <sup>2</sup>
$d$	dijagonala otiska	mm

---

**SAŽETAK**

U uvodnom dijelu rada dana je definicija postupka toplinskog naštrcavanja. Detaljno su opisani značaj u pojedinim granama industrije, načini provedbe toplinskih naštrcavanja i primjena materijala. Opisane su najčešće vrste toplinskog naštrcavanja, te su nakon toga i međusobno uspoređene prema potrebnoj opremi za toplinsko naštrcavanje, zatim prema vrstama dodatnog materijala, te korištenom izvoru topline.

U eksperimentalnom dijelu rada opisuje se plazma navarivanje kao nisko energetska postupak naštrcavanja, tj. brzina čestica je puno manja pa je sloj dodatnog materijala navaren. Analiziraju se načinjeni uzorci, ocjenjuje se prikladnost tehnologije i utvrđuju specifične greške prilikom postupka.

U završnom dijelu rada dani su prijedlozi za poboljšanje tehnologije plazma navarivanja ovisno o vrsti praška i zahtjevima navarenog sloja.

## 1. UVOD

Usporiti i zaustaviti proces trošenja ili korozije moguće je djelovanjem na čimbenike koji su uzrok takvim djelovanjima. Tako je jedan od načina takve zaštite nanošenje zaštitnih slojeva ili prevlaka. Na taj način se podloga štiti od agresivnog djelovanja okoliša i atmosfere.

Svrha toplinskog naštrcavanja je tretiranje osnovnog materijala s ciljem zaštite površine materijala, a time i produžetka životnog vijeka trajanja proizvoda. Važno je imati na umu da se pri tom postupku točno odrede tri parametra: osnovni materijal, prevlaka i postupak prevlačenja, jer jedino takav postupak procesa daje zadovoljavajuće rezultate.

Postupci toplinskih naštrcavanja dijele se prema vrsti dodataka za naštrcavanje, zatim prema načinu odnosno postupku provedbe naštrcavanja i prema vrsti energije koja se tim postupkom prenosi. Danas se najviše koristi naštrcavanje plinskim plamenom (žicom ili prahom), elektrolučno, plazma, visokobrzinsko naštrcavanje. Svaki od navedenih postupaka razlikuje se po naštrcanim slojevima, postupkom kojim su naštrcani, po strukturi, načinu vezanja materijala, mogućnostima naknadne obrade i sl.

Prevlaka ili sloj djeluju izolacijski na konstrukcijski element, ali i kao fizička zaštita što je naročito vidljivo kod katodnih prevlaka ili pak kao elektrokemijska zaštita kod anodnih prevlaka. Uloga tih prevlaka ili naštrcanih slojeva osim zaštite od korozije i povišenja otpornosti na trošenje je i izolacija, električna vodljivost, reparatura nekih strojnih dijelova, itd.

---

## 2. TOPLINSKO NAŠTRCAVANJE

Toplinsko naštrcavanje je postupak prevlačenja sitnim česticama materijala metalnih ili nemetalnih u rastaljenom ili polurastaljenom stanju, prijenos mase i topline.

Prilikom toplinskog naštrcavanja rastaljene ili djelomično rastaljene čestice ne tale materijal podloge kod dodira već samo zagrijavaju površinu obratka. Stoga u ovom postupku ne dolazi do promjene mikrostrukture ili kemijskog sastava podloge koju naštrcavamo.

Toplinsko naštrcavanje ima niz prednosti, a jedna od značajki jest da se svojstva sloja mogu prilagoditi za svaku primjenu posebno. Nadalje toplinskim naštrcavanjem mogu se nanositi različite vrste dodatnog materijala. Uvijek je važno imati na umu cilj toplinskog naštrcavanja, jer ono mora zadovoljiti svojstva: prionljivosti, debljine sloja, hrapavosti, korozivsku postojanost, tvrdoću, kemijski sastav, unutarnja naprezanja i dr.

Kako bi postupak toplinskog naštrcavanja bio što uspješniji važno je obratiti pažnju na neke čimbenike [1]:

1. Materijali podloge – materijali koji se mogu toplinski naštrcavati obično su metali, naročito čelici, aluminijski materijali, nikal i legure nikla i bakra, ali mogu biti i keramika, staklo ili polimeri.
2. Prionljivost – između sloja i podloge mora biti idealna, što znači imati na umu da postoje neka djelovanja kao što su stanje obratka, čistoća površine, stupanj hrapavosti površine obratka, temperatura obratka i dr.
3. Mikrostruktura sloja – svaki naštrcani sloj ima drugačiju mikrostrukturu i kemijski sastav, sve to ovisi o reakcijama plinova iz procesa i plinova atmosfere.

Bitan čimbenik kod toplinskog naštrcavanja je priprema površine obratka. Dobra priprema površine obratka garantira odličnu kvalitetu toplinskog naštrcavanja. Svakako je prva i najvažnija dobra čistoća i hrapavost površine obratka, a zatim temperatura površine obratka.

Tako postoje neke predradnje koje se moraju napraviti prije samog toplinskog naštrcavanja [1]:

- Čišćenje (omogućuje dobru vezu sloja i osnovnog materijala)

Očistiti površinu obratka od ulja, masti, boje, hrđe, kamenca i sl., moguće se koristiti ručnim alatima (strugala, žice, žičane četke, abrazivi ) ili strojno (brusilice, rotirajuće četke,...). Dobro bi bilo nakon mehaničkog čišćenja provesti i odmašćivanje površine kako bi se uklonile sve masnoće (npr. pomoću acetona).

- Hrapavljenje površine (bolje prijanjanje naštrcanog sloja)

Svrha hrapavljenja površine je da bi se postiglo dobro prijanjanje sloja na podlogu. Stupanj hrapavljenja ovisi o materijalu, o primjeni tog materijala koji se toplinski naštrcava i o uvjetima gdje će taj materijal biti. Tako se hrapavljenje može provoditi pjeskarenjem i strojnom obradom poput tokarenja ili glodanja. Treba svakako paziti na ovaj faktor jer ukoliko površina bude preglatka može doći do odvajanja naštrcanog sloja.

- Predgrijavanje (uklanjanje nepotrebne vlage sloja i smanjena naprezanja)

Osnovni materijal potrebno je prije toplinskog naštrcavanja dovesti do određene temperature kako bi se izbjegla vlaga koja se nalazi na površini obratka i smanjilo naprezanje između površine i naštrcanog sloja. To se može postići plinskim plamenikom, u pećima za toplinsku obradu, opremom za plinsko naštrcavanje ili pomoću nekih naprava za grijanje.

Prilikom toplinskog naštrcavanja dolazi do naprezanja. Prvo nastaje primarno naprezanje, kada se naštrcavanjem rastaljene čestice dodatnog materijala prilikom udara u površinu spljošte i hlade. Rezultat toga je naprezanje u sloju.

Kada se naštrcani sloj i podloga hlade do sobne temperature, tada pod utjecajem koeficijenta toplinskog širenja sloja i koeficijenta toplinskog širenja podloge između sloja i podloge dolazi do tzv. sekundarnog naprezanja.

Izraz pomoću kojeg se dolazi do sekundarnog naprezanja [2]:

$$\sigma_d(T_o) = (\alpha_d - \alpha_s) * (T_d - T_o) * E_d * (T_o) \quad (N/mm) \quad (1)$$

$\alpha_d$  – koeficijent toplinskog širenja sloja ( $K^{-1}$ )

$\alpha_s$  – koeficijent toplinskog širenja podloge ( $K^{-1}$ )

$T_d$  – temperatura sloja (K)

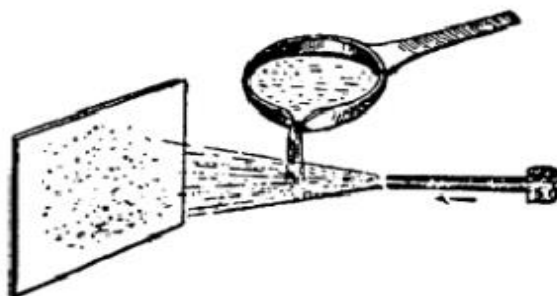
$T_o$  – temperatura podloge (K)

$E_d$  – modul elastičnosti sloja ( $N/mm^2$ )

## 2.1. Početak toplinskog naštrcavanja

Tehnologija toplinskog naštrcavanja prisutna je u svijetu već jedno stoljeće. Tvorac, švicarski inženjer Max Schoop svoj je rad iznio davne 1912. godine u jednom znanstvenom časopisu. Na ideju je došao gledajući svoga sina koji se igrao ispućavanjem malih „projektila“ kroz top (igračku), koji su se pri udaru u metu zalijepili. Tako je već 1910. objavio podatke o toplinskom naštrcavanju. [3]

Ovdje je važno napomenuti da je tada postojao i njemački patent iz 1882. godine, koji je prikazan na slici 1.

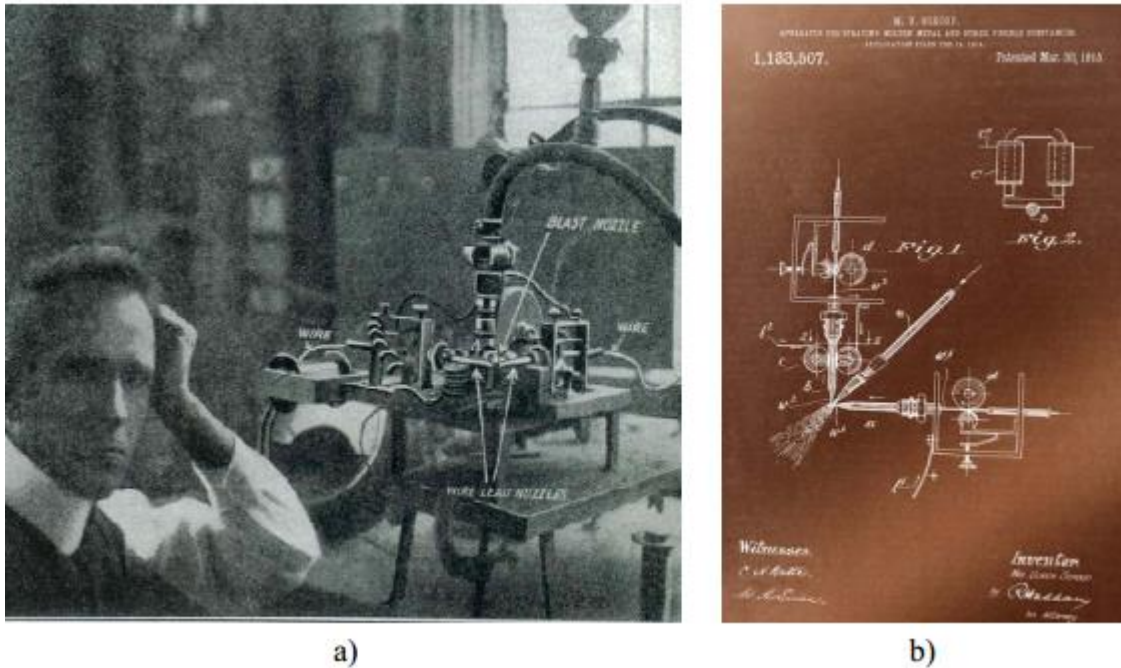


Slika 1 Patent toplinskog naštrcavanja [4]



Max Schoop je prvo razvio postupak plinskog naštrcavanja u obliku praška, a zatim i žice. Idejno je razradio korištenje električnoga luka što je već tada bio početak elektrolučnog naštrcavanja.

Na slici 2 je prikazan originalni patent za elektrolučni postupak naštrcavanja.



**Slika 2 a)** Max Schoop u svom istraživačkom laboratoriju

**b)** Izgled originalnog patenta za elektrolučno naštrcavanje [5]

Sredinom 20-tih godina XX. stoljeća počinje razvoj drugih tehnologija toplinskog naštrcavanja, plazma, a ubrzo, zatim pojava HVOF postupka (High velocity oxy-fuel) detonacijsko naštrcavanje, eksplozija plinovite smjese. [5]

Prve primjene toplinskog naštrcavanja bile su u području zaštite od korozije i trošenja, naročito konstrukcijskih elemenata. Već tada se uočilo da takav postupak sprječava neželjenu koroziju i trošenje. Tako su tim postupkom zaštitili konstrukciju mostova, cestovnu i željezničku infrastrukturu.

## 2.2. Svrha toplinskog naštrcavanja

Toplinsko naštrcavanje najčešće se provodi s ciljem povišenja otpornosti materijala na trošenje i zaštite od korozije, ali i zbog financijskih ušteda (zbog troškova, reparatura i sl.). Neke od ostalih primjena su [6]:

- Povišenje otpornosti na trošenje (trošenja izazvana klizanjem, brazdanjem, mlazom, erozijom);
- Zaštita od korozije;
- Biokompatibilnost (za zglobove, proteze);
- Električna vodljivost i izolacija;
- Toplinska izolacija;
- Reparatura strojnih dijelova;
- Trenutna upotreba (izostavljeno je vrijeme sušenja ili skrućivanja);
- Dobro prianjanje uz podlogu;
- Može služiti kao temelj za naknadni premaz bojom;
- Može se zaštititi veća površina;
- Može se nanositi na mjestu eksploatacije dijelova;
- Kvalitetno naštrcavanje može trajati do 20 godina;
- Otpornost na vanjske uvjete (nisu potrebni idealni uvjeti temperature i vlage, može doći do odstupanja);
- Ekonomski aspekt (procjene govore da se u Europi tako uštedi i do 1 milijarde eura godišnje).

## 2.3. Princip rada postignut toplinskim naštrcavanjem

Naštrcani sloj nastaje zagrijavanjem i taljenjem dodatnog materijala koji se pretvara u velik broj čestica koje se u rastaljenom ili polurastaljenom stanju pod visokim tlakom usmjeravaju prema podlozi i udaraju u nju. Prilikom udara u podlogu se deformiraju i raznim mehanizmima vežu na nju.

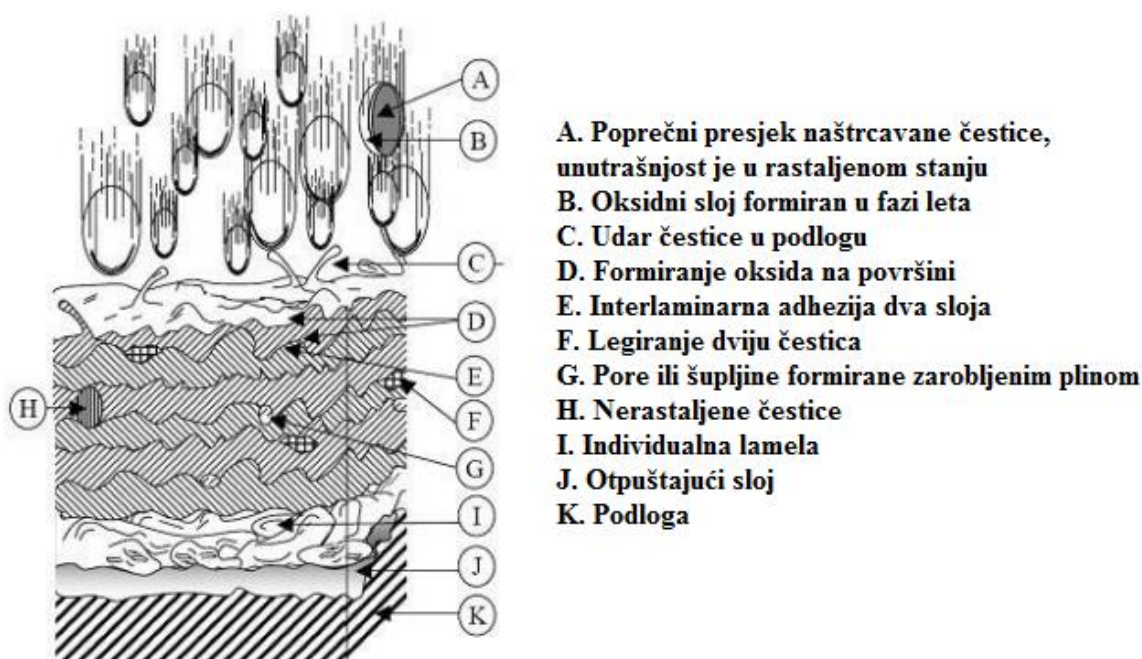
- Neki od tih mehanizama su: 1. fizikalno povezivanje ( mehaničko sidrenje, difuzija )  
2. kemijsko povezivanje ( ionske i kovalentne veze ) [7]

Na slici 3 je pojednostavljeni shematski prikaz nastanka sloja toplinskim naštrcavanjem.



**Slika 3** Faze toplinskog naštrcavanja [8]

Na sljedećoj slici (slika 4) je shematski prikazan poprečni presjek toplinski naštrcanog sloja, tzv. složena lamelarna metastabilna struktura. Ovdje je vidljivo koliko je bitno da su svi parametri koje podešavamo pri procesu toplinskog naštrcavanja usklađeni. Od toga koji plin se koristi kao gorivo i pod kojim tlakom, kolika će biti postignuta temperatura na izlazu te hoće li se dobiti rastaljena ili polurastaljena čestica do toga kako će biti mehanički obrađena i očišćena podloga koja se naštrcava.



**Slika 4** Tipičan poprečni presjek toplinski naštrcanog sloja [8]

## 2.4. Uporaba toplinskog naštrcavanja

Toplinsko naštrcavanje ima široko područje primjene, od industrijskih postrojenja pa sve do medicine. Tablica 1 prikazuje pojedine primjere dijelova koji su podvrgnuti toplinskom naštrcavanju u raznim industrijskim područjima.

Tablica 1 Prikaz toplinskog naštrcavanja u industrijskoj primjeni

INDUSTRIJSKO PODRUČJE	DIJELOVI
Automobilska industrija	vilice viličara, prsten klipa, ventili, sonda, kućište alternatora
Zrakoplovna industrija	komora izgaranja, toplinski štit, kućišta, lopatice, disk ventilatora
Industrija kućanskih aparata	tave za pečenje, radna površina glačala
Strojogradnja	kućište pumpe, osovine, klipovi, pneumatski dijelovi
Kemijska i farmaceutska industrija	cijevi, spremnici, klizači, kuglasti ventili
Medicina	implatanti, proteze
Industrija papira	valjci, preše
Tekstilna industrija	valjci, vodilice
Industrija stakla	površine alata koje se štite od toplinskog, abrazivnog i korozijskog djelovanja
Elektronička industrija	naštrcavanje kontaktnih pločica izolacijskim prevlakama na bazi keramike
Brodogradnja	zaštita raznih pogonskih agregata

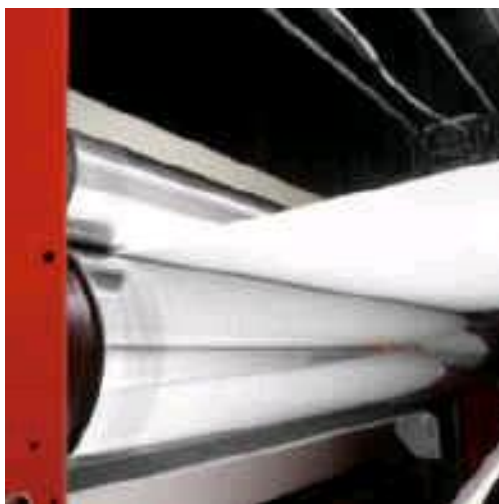
Na slikama 5, 6, 7 i 8 prikazani su primjeri od primjene toplinskog naštrecavanja u raznim industrijama, automobilskoj, papirnoj, zrakoplovnoj i u medicini.

Slika 5 prikazuje turbopuhalo koje se koristi za prednabijanje benzinskih i dizel motora, ovdje se toplinskim naštrecavanjem naštrecava osovina zbog toga što se turbina vrti vrlo visokim brzinama ( iznad 20000 okr./min ) pri čemu je vrlo izražen mehanizam trošenja materijala.



**Slika 5** Primjena toplinskog naštrecavanja u automobilskoj industriji [9]

Slika 6 prikazuje valjke koji se koriste u papirnoj industriji, ovdje se toplinskim naštrecavanjem naštrecavaju valjci iz razloga što je izrada tih valjaka jako skupa te se nanosi sloj materijala koji je otporan na habanje kako bi se smanjili troškovi popravka.



**Slika 6** Primjena toplinskog naštrecavanja u papirnoj industriji [9]

Slika 7 prikazuje avionsku turbinu koja se također vrti strašno velikim brzinama te je izložena raznim atmosferskim uvjetima, takvi dijelovi su izrazito skupi te se preventivno toplinski naštrcavaju kako bi zaštitili dio od mehaničkog i atmosferskog trošenja te produžili rok trajanja.



**Slika 7** Primjena toplinskog naštrcavanja u zrakoplovnoj industriji [9]

Slika 8 prikazuje malo drugačiji dio koji se isto tako toplinski naštrcava, radi se o grani medicine, odnosno prikazan je umjetni kuk. Ovdje je prevlaka titanijev nitrid (TiN) koji zbog svog svojstva neotrovnosti štiti umjetni kuk, ista prevlaka također se koristi i na kirurškim instrumentima.



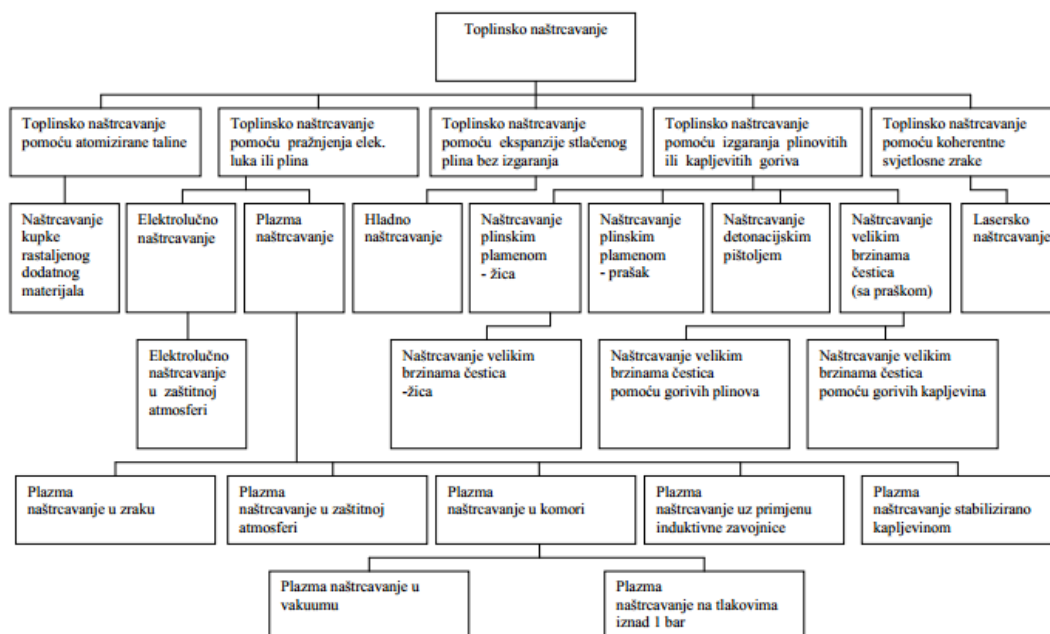
**Slika 8** Primjena toplinskog naštrcavanja u medicini [9]

### 3. VRSTE TOPLINSKOG NAŠTRCAVANJA

Danas se govori o četiri velike skupina, a razlikuju se po izvoru energije, te toplinskoj i kinetičkoj energiji naštrcanih čestica.

1. Plinsko naštrcavanje
2. Elektrolučno naštrcavanje
3. Plazma naštrcavanje
4. HVOF (High velocity oxy fuel) naštrcavanje

Tehnologija naštrcavanja može se podijeliti na pet glavnih skupina postupaka koji se razlikuju po izvoru energije i pri tome postignutoj toplinskoj i kinetičkoj energiji naštrcanih čestica. Podjela postupaka toplinskog naštrcavanja prikazana je na slici 9.



Slika 9 Podjela postupaka toplinskog naštrcavanja i njihove podvarijante [9]

### 3.1. Plinsko naštrecavanje

Plinsko naštrecavanje se može podijeliti na dvije velike skupine, to su plinsko naštrecavanje praškom i plinsko naštrecavanje žicom.

Druga podjela je prema načinu izvođenja plinskog naštrecavanja. Ovdje imamo tri skupine, to su naštrecavanje bez naknadne toplinske obrade, naštrecavanje s neposrednom toplinskom obradom i naštrecavanje s naknadnom toplinskom obradom.

### 3.2. Plinsko naštrecavanje praškom

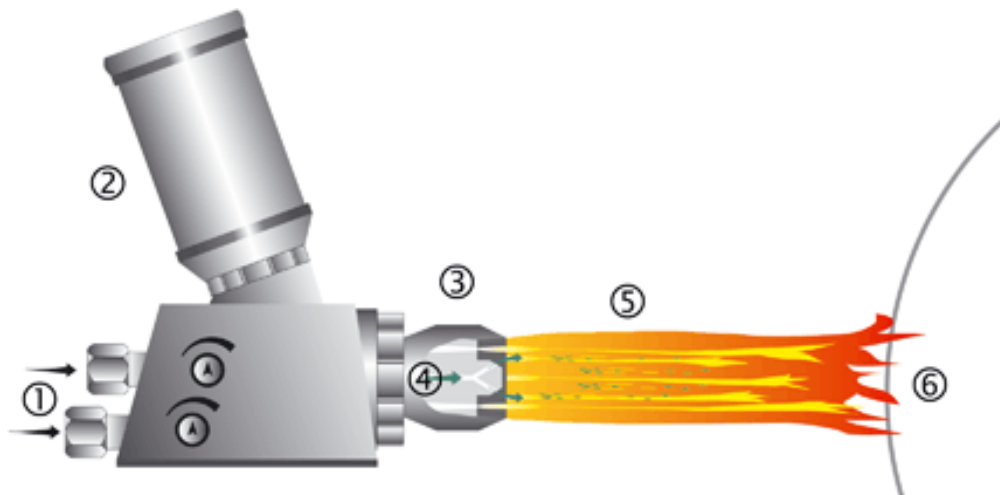
Plinsko naštrecavanje ili plameno naštrecavanje praškom je prvi postupak toplinskog naštrecavanja, prva primjena je razvijena početkom dvadesetog stoljeća. Ono je temelj svih novijih postupaka naštrecavanja, ovim postupkom mogu se nanositi gotovo sve vrste materijala, od metala, polimera, metalnih kompozita pa sve do oksidnih keramika.

#### 3.2.1. Princip rada i karakteristike

Kod plinskog naštrecavanja dodatni materijal (prah) tali se u plinskom plamenu, stlačeni zrak ubrzava rastaljene čestice dodatnog materijala i one u obliku plamenog luka slojevito zaštićuju materijal.

Nakon izgaranja smjese tih plinova kao produkt javlja se CO<sub>2</sub>, toplina i vodena para. Ponekad vodena para može izazvati problem radi toga što utječe na kvalitetu sloja, no tada je važno nekim drugim procesima izbjeći taj problem, npr. zagrijavanjem površine obratka. Cijeli proces je vrlo složen, postoji puno parametara koji mogu utjecati na kvalitetu i svojstva naštrecanog sloja. Stoga je potrebno iskustvo ali i naputci proizvođača koji proizvode dodatni materijal. Kako bi se izbjegli problemi prilikom plinskog naštrecavanja mora se prilagoditi udaljenost pištolja od podloge, odrediti brzina gibanja pištolja u odnosu na obradak, odrediti posmaci pištolja u odnosu na obradak, odrediti tlak stlačenog zraka, protok dodatnog materijala i sl. Na slici 10 je shematski prikaz plinskog naštrecavanja.





**Slika 10** Shematski prikaz plinskog naštrcavanja praškom [8]

(1.acetilen i kisik; 2.spremnik dodatnog materijala (prašak); 3.sapnica; 4.aromatizirajući plin i prašak; 5.plinski plamen i čestice praška; 6.podloga, radni komad)

Važno je prilikom odabira plinskog naštrcavanja koristiti gorivi plin, dok su dodatni utjecajni čimbenici vrsta materijala podloge i dodatnog materijala. Svaka podloga ima određena temperaturna tališta.

Stoga postoje neka polazišta koja su bitna za izbor plinova kod naštrcavanja [5]:

1. Toplina izgaranja;
  - Razlikuje se toplina primarnog i sekundarnog dijela plamena (količina izgaranja gorivog plina u kisiku).
2. Temperatura izgaranja;
  - Najveći iznos temperature izgaranja je na vrhu primarnog dijela plinskog plamena (od 2 do 3 mm udaljenosti).
3. Pravilan omjer količine kisika potrebnog za izgaranje;
  - Vrsta plamena: neutralan, oksidirajući ili reducirajući;
  - Najviša temperatura izgaranja ostvaruje se s acetilenom, temperatura koja se postiže iznosi oko 3160 °C, acetilen daje i najkoncentriraniji izvor topline;
  - Propan daje niže temperature, oko 2810 °C, ali i manje brzine plinskog plamena, 3,3 m/s (kod acetilena 7,4 m/s).

### 3.2.2. Dodatni materijal za naštrcavanje

Naštrcani sloj nastaje taljenjem dobavljenog dodatnog materijala u izvoru topline, brzinom ubrzavanja. Sloj koji nastaje produkt je međusobne povezanosti čestica i plinskog plamena s česticama i podlogom gdje dolazi do naštrcavanja. Stoga je neobično važan pravilan odabir, kvaliteta dodatnog materijala. Postoji preko 350 vrsta dodatnog materijala.

Najčešće pogreške koje dolaze ako nije zadovoljena kvaliteta dodatnog materijala:

1. Raspon promjera čestica praška je preširok;
2. Kemijski sastav nije ujednačen;
3. Deformacija čestica nakon sudara.

Važno je prilikom karakterizacije praška odrediti:

- Veličinu čestice;
- Kemijski i fazni sastav;
- Unutarnju i vanjsku morfologiju;
- Visokotemperaturno ponašanje;
- Gustoću i aerodinamička svojstva.

Dodaci za toplinsko naštrcavanje neovisno o postupku su prah ili žica. Mogu se koristiti svi materijali koji imaju tekuću rastaljenu fazu u normalnim uvjetima tlaka. Materijali bez tekuće rastaljene faze mogu se obrađivati u kombinacijama s drugim materijalima s rastaljenom tekućom fazom koji stvaraju matricu. Ovisno o kemijskom sastavu prahovi za naštrcavanje mogu se podijeliti po skupinama:

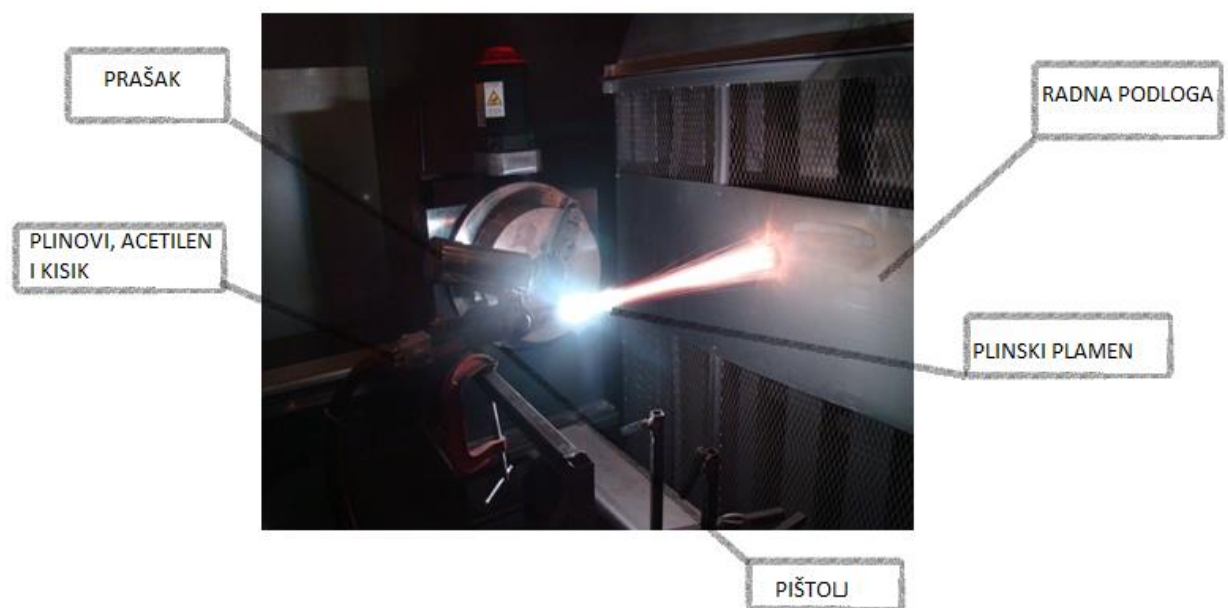
- Čisti metali (Cr, W, Ni, Cu, Al, Mo);
- Legure (NiCr, NiAl, CuAl, čelici, CoCrW);
- Metalni karbidi (WC, TiC, Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr, WC-Co, WC-CoCr);
- Samotekuće legure;
- Oksidi (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>);
- Organski materijali .

Mogu se koristiti i mješavine, tj. spojevi prahova od gore navedenih komponenti. Najčešći žičani dodaci za naštrcavanje su masivne žice (od nelegiranih, niskolegiranih ili visokolegiranih čelika, aluminijskih legura, bakra, bakrenih legura, nikla, niklenih legura, cinka, cinkovih legura i molidbena) i punjene žice. Potrebno je prilikom odabira materijala za naštrcavanje uvijek promatrati povezanost postupka naštrcavanja, vrstu osnovnog materijala i geometriju obratka.

### 3.2.3. Oprema kod plinskog naštrcavanja

Kod reparatura i malih serija proizvoda koriste se plinski pištolj koji ima integrirani spremnik praška koji se u spremnik dobavlja gravitacijski. Na mjestu ulaza u dobavni kanal djeluje podtlak uslijed strujanja dobavnog plina. Nedostatak ove konstrukcije pištolja jest velika osjetljivost na nagle promjene smjera i kuta naštrcavanja. Posljedica svega je veće rasipanje čestica po poprečnom presjeku plinskog plamena. Kvalitetniji je postupak kod robotiziranog plinskog naštrcavanja jer se giba radni komad, a ne pištolj. [5]

Na slici 11 je prikazano plinsko naštrcavanje prahom u industrijskom postrojenju sa označenim svim bitnim dijelovima koji su potrebni za proces.



**Slika 11** Plinsko naštrcavanje prahom [10]

### 3.3. Elektrolučno naštrcavanje

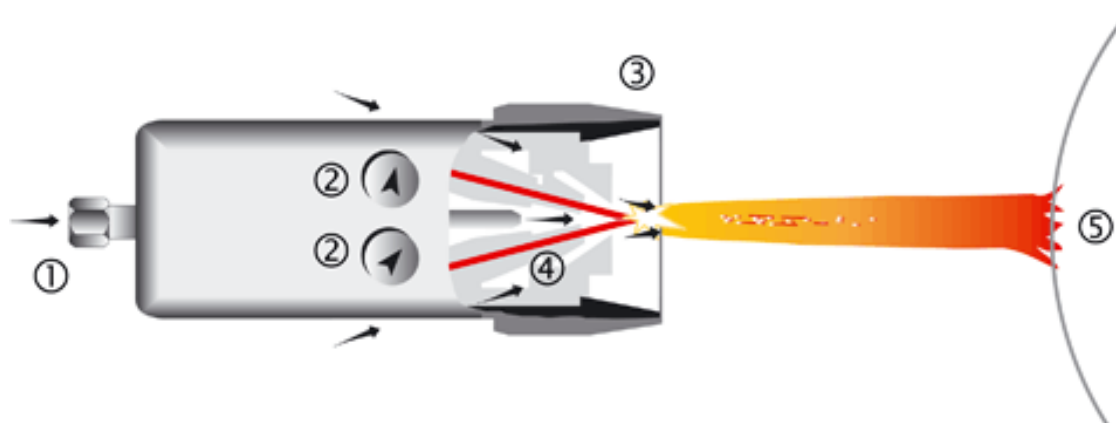
Elektrolučno naštrcavanje je jeftin postupak toplinskog naštrcavanja, slojevi dobiveni elektrolučnim naštrcavanjem su gusti i imaju jako dobra svojstva vezanja na površinu. Postupak je zbog niskih troškova rada te visoke stope prskanja i učinkovitosti primjenjiv za naštrcavanje obradaka velikih dimenzija. Kao i kod drugih procesa i ovdje je svrha naštrcavanja otpornost na koroziju, trošenje, visoke temperature i sl., može se koristiti i u dekorativne svrhe. Moguće je naštrcavati širok spektar metala, legura i kompozita. Koristi se pri mostogradnji i gradnji drugih komponenata infrastrukture te u zrakoplovstvu. Većina velikih proizvođača motora zrakoplova koriste elektrolučno naštrcavanje za popravke mnogih komponenti na motorima zrakoplova. [12]

#### 3.3.1. Princip rada i karakteristike

Kod ove vrste naštrcavanja električni je luk izvor energije. Prilikom ovog naštrcavanja između dviju žica za naštrcavanje koje su spojene s izvorom istosmjernje struje uspostavlja se električni luk. Zatim taj luk rastaljuje krajeve žica i tako rastaljeni tekući materijal se atomiziranim plinom ubrzava u smjeru površine radnog dijela. Stabilan proces naštrcavanja održava se kontinuiranim dovodjenjem obiju žica.

Maksimalna temperatura koja se postiže je iznad  $4000^{\circ}\text{C}$ , a brzina koju poprima rastaljena čestica je iznad  $150\text{ m/s}$ . Kombinacija visoke temperature luka i brzina čestica daju električnom luku koji raspršuje premaz vrhunsku vezu s podlogom i niže razine poroznosti.

Na slici 12 je shematski prikazan proces elektrolučnog naštrcavanja.

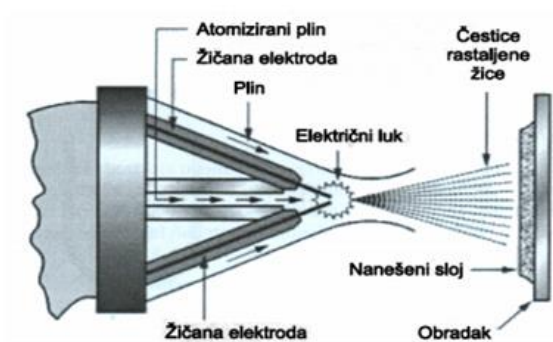


**Slika 12** Shematski prikaz elektrolučnog naštrcavanja [8]

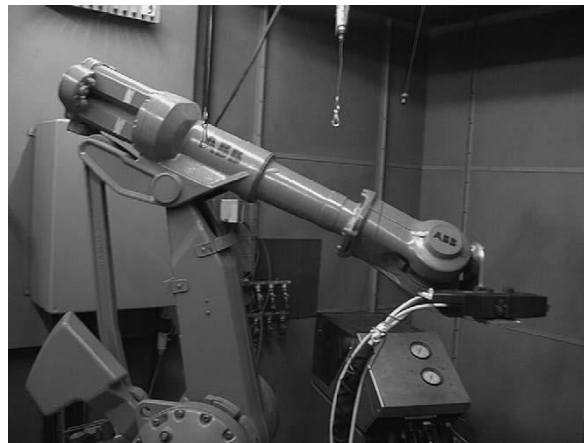
(1.aromatizirajući plin; 2.regulatori brzine dovođenja dodatnog materijala; 3.glava pištolja; 4.dodatni materijal električki vodljiv, u obliku žice; 5.podloga, radni komad)

Elektrolučnim naštrcavanjem ostvaruje se sloj slojevite strukture. Visokoproduktivnim postupkom omogućuje se naštrcavanje električki vodljivim materijalima. Radi uporabe dušika, argona, mješavine dušika i kisika kao atomizirajućeg plina moguće je u velikoj mjeri spriječiti oksidaciju. Proces je sam po sebi vrlo ekonomičan, a uz to je rukovanje samim procesom vrlo jednostavno. U novije vrijeme poboljšana je kvaliteta opreme i proširen raspon za toplinsko naštrcavanje premaza, to sve je potaklo i automatizaciju koju vidimo na slici 14.

Na slici 13 je malo detaljnije prikazan postupak elektrolučnog naštrcavanja pomoću žice.



**Slika 13** Shema postupka elektrolučnog naštrcavanja pomoću žice [6]



**Slika 14** Pištolj za elektrolučno naštrcavanje na robotskoj ruci [12]

### 3.4. Plazma naštrcavanje

U prošlom stoljeću je počela prva primjena plazma naštrcavanja, tada se počeo koristiti plazma pištolj stabiliziran vodom (koriste vodu, etanol ili metanol), tako da plazma strujanjem hladi sapnice pištolja. Veliku inovaciju plazma pištolja načinio je J. Reinecke kada je patentirao plazma pištolj koji je stabiliziran plinom. Tada se koristila istosmjerna struja i na taj način se nanosio sloj metala. No, trebalo je proći još niz godina da se plazma upotrijebi u industriji, a to su prve uvele tvrtke „UNION CARBIDE“ i „GIANINI CORPORATION“. [3]

#### 3.4.1. Princip rada i značajke

Danas je plazma naštrcavanje jedan od čestih postupaka toplinskog naštrcavanja, pri čemu se koristi plazma pištolj s induktivnim pobuđivanjem plazme uz pomoć radio frekvencije. Takva vrsta plazma naštrcavanja koristi se kada se naštrcavanje provodi za izradu dodatnog materijala u obliku praška. Ukoliko se izrađuju slojevi gdje su materijali skloni oksidaciji, tada se primjenjuje plazma naštrcavanje u prostoru sniženog tlaka, tzv. VPS (Vacuum Plasma Spraying). Taj postupak je potrebno provoditi u komori radi sniženog apsolutnog tlaka, ukoliko se želi sniziti tlak zadržavanja vakuuma tada se ubacuje inertni plin, npr. argon. Sve to je utjecalo na razvoj novijih postupaka plazma naštrcavanja kao što su HPPS (High Power Plasma Spraying) i UWPS (Underwater Plasma Spraying). [3]

Plazma dobivena neprijelaznim lukom može osim za zavarivanje služiti za toplinsko naštrcavanje materijala u svrhu zaštite toga materijala od korozije i trošenja.

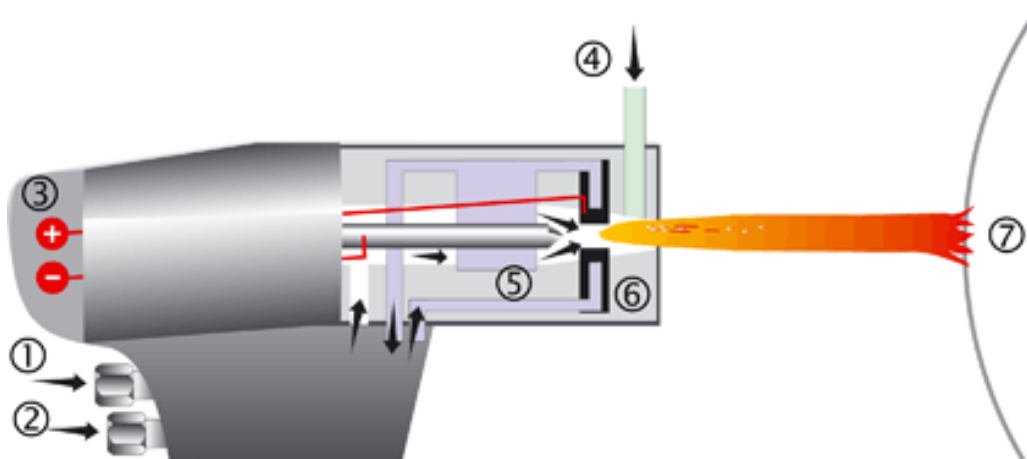
Temperatura u plazmi je veća od plinskog ili elektrodučnog naštrcavanja što omogućuje nanošenje slojeva teško taljivih materijala.

Visokotemperaturna plazma trenutno tali materijal i baca ga prema površini. Upravo radi te visoke radne temperature mehanička i metalurška svojstva naštrcanog sloja bolja su od plinskog ili elektrodučnog naštrcavanja.

Plazma se dobiva pomoću električnog luka, koji izlazi iz posebno konstruiranih sapnica, kroz koji struje plazmeni plinovi. Plinovi koji se koriste su argon, helij, dušik, vodik ili njihove smjese. Prilikom prolaska kroz električni luk dolazi do disocijacije i ionizacije plinova. Zbog te pojave atmosfera u električnom luku je vrlo aktivna i postižu se vrlo visoke temperature plinova ( $> 15000^{\circ}\text{C}$ ) pa se molekularni plinovi raspadaju u atome, a djelomično i u ione.

Postupkom plazma naštrcavanja nanose se prevlake debljine od 10  $\mu\text{m}$  do nekoliko mm na čelike, željezne ljevove, aluminijske, bakrene, titanove i niklene legure. Površinski slojevi nanošeni plazma naštrcavanjem razlikuju se od drugih postupaka toplinskog naštrcavanja po strukturi, mehanizmu prianjanja na osnovni materijal i po mogućnostima naknadne obrade.

Na slici 15 je shematski prikazan način rada plazma naštrcavanjem.



**Slika 15** Shematski prikaz plazma naštrcavanja [8]

(1.inertni plin; 2.rashladne tekućine; 3.istosmjerna struja; 4.dodatni materijal u prahu; 5.katoda (volframova elektroda); 6.anoda (sapnica od legure bakra); 7.podloga, radni komad)

Od svih postupaka toplinskog naštrcavanja velika je zastupljenost nanošenja pomoću plazma naštrcavanja. Najviše se koristi u zrakoplovnoj i kemijskoj industriji, zatim tekstilnoj i grafičkoj.

Plin za plazmu se zagrijava pomoću volframove elektrode, koristi se čista ili legirana 2% torij/ cerij/ cirkonij-volfram elektroda koja je uvučena i zaštićena unutar bakrene sapnice, a najčešće se spaja na negativni pol struje. Volframove elektrode su cilindričnog oblika, dok im je vrh zašiljen u konus. Promjer volframove elektrode iznosi od 1 do 4 mm ovisno o jakosti struje koju koristimo.

Dodatni materijal se u obliku praha tali pomoću plazmenog mlaza u plazmeni pištolj i usmjerava se na površinu materijala za naštrcavanje (mlaz može biti i van plazmenog pištolja). Mlaz postiže veliku brzinu radi ekspanzije i električnog pražnjenja, dok se toplinska energija prilikom rekombinacije prenosi na čestice dodatnog materijala.

Električni luk se održava između elektrode koja djeluje kao katoda i vodom hlađene sapnice koja djeluje kao anoda.

Proces se može izvoditi u normalnoj atmosferi, u atmosferi zaštitnog plina, u inertnoj atmosferi, u vakuumu.

Na slici 16 je prikazano toplinsko naštrcavanje plazma postupkom u nekom radnom pogonu, označeni su dijelovi bitni za ovaj postupak.



**Slika 16** Plazma naštrcavanje [13]



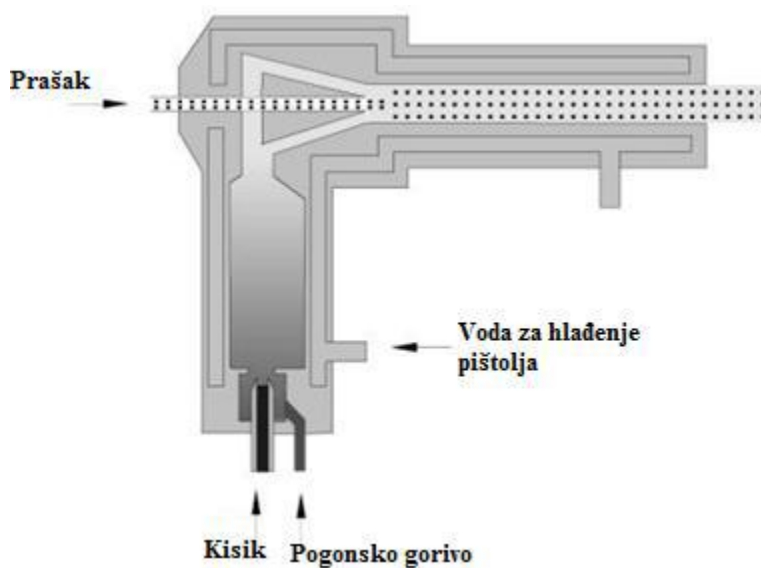
### 3.5. HVOF (High velocity oxy fuel) naštrcavanje

Noviji postupak toplinskog naštrcavanja, često upotrebljavan u zrakoplovnoj industriji. To je postupak detonacijskog naštrcavanja otkriven u pedesetim godinama prošlog stoljeća.

HVOF (High velocity oxy fuel) postupak naštrcavanja koristi toplinsku energiju nastalu eksplozijom plinovite smjese. Ovdje je važno napomenuti da se ove eksplozije događaju i nekoliko puta u sekundi, što rezultira diskontinuitetom i nepravilnostima. Tako je J.A.Browning usavršio postupak, te kao rezultat svega plinovita smjesa sada kontinuirano izgara te s dodatnim materijalom u obliku praška izlazi iz pištolja nadzvučnim brzinama. [14]

#### 3.5.1. Karakteristike HVOF (High velocity oxy fuel) naštrcavanja

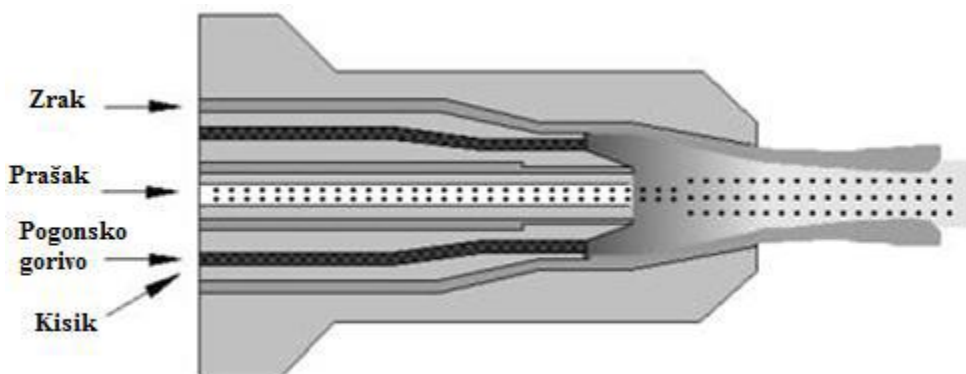
Patent J.A.Browninga nazvan je „Jet Kote™ HVOF“ te predstavlja prvu generaciju HVOF (High velocity oxy fuel) pištolja. Na slici 17 je prikazan pištolj prve generacije HVOF-a (High velocity oxy fuel).



**Slika 17** Shematski prikaz prve generacije HVOF pištolja „Jet Kote™ HVOF“ [15]

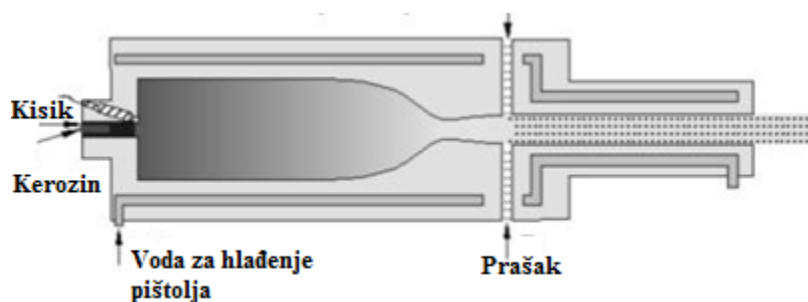
Ovaj pištolj je konstruiran tako da se u plinski mlaz dodaje prašak prilikom pokretanja, tada su tlakovi unutar komore od 3 do 5 bar, brzina nanošenja sloja iznosi 2 – 3 kg/h, komora je hlađena vodom. Ovdje je važno da se mlaz usmjerava prema izlaznoj sapnici pod kutom od 90°, a brzina koju tada postiže iznosi oko 450 m/s.

Ubrzo je slijedila i druga generacija HVOF pištolja tzv. „Diamond Jet“. Postupak rada je drugačiji, tako se ovdje prašak dodaje na kraju komore, a prije komore se miješaju gorivi plin i kisik. Taj postupak povećava brzinu plinskog mlaza što rezultira brzinom ispaljivanja smjese od 550 m/s. Hlađenje je postignuto zrakom ili dušikom. Na slici 18 je prikazan pištolj druge generacije HVOF naštrecavanja. [14]



**Slika 18** Shematski prikaz druge generacije HVOF pištolja „Diamond Jet“ [15]

Danas, točnije 1992. pojavljuje se treća generacija HVOF pištolja, proizvodnja tvrtke „PRAXAIR TAFI“, a model pištolja „JP 500“. Ovim načinom naštrecavanja postižu se velike brzine plinskog mlaza (slično kao kod konvergentno – divergentnog oblika komore, slično kao na raketnim motorima). Ovdje se prašak dodaje na kraju komore te se na taj način izbjegava zagrijavanje. Cijev kroz koju je usmjeren plinski prašak je duža, a sve to kao poseljicu ima smanjenje stupnja divergencije. Gorivo koje služi kao pogon je kerozin, a cijev i komora hlade se vodom. Na slici 19 je prikazan pištolj treće generacije HVOF naštrecavanja. [14]

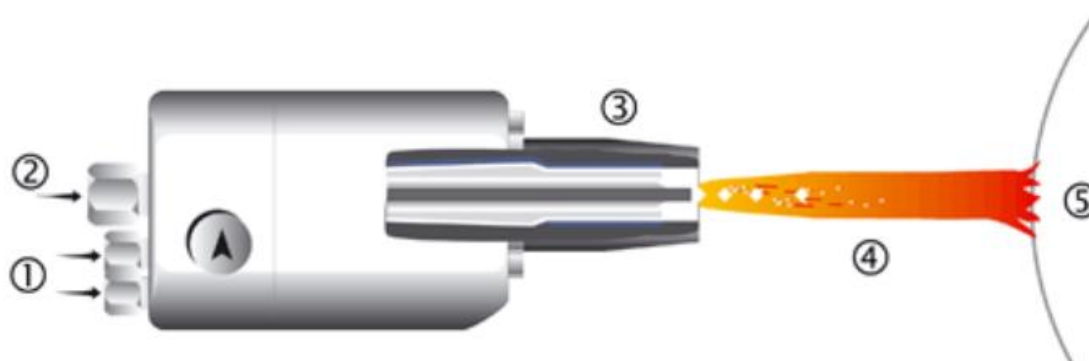


**Slika 19** Shematski prikaz treće generacije HVOF pištolja „JP 5000“ [15]

Visokobrzinsko plameno naštrcavanje – HVOF, jedan je od novijih postupaka prevlačenja kojim se dobiva visoka čvrstoća prijanjanja, niska poroznost, nisko izgaranje legirnih elemenata, mali postotak oksida, ... Neke od karakteristika ovog postupka prevlačenja su visoka otpornost na trošenje i jako dobra klizna svojstva.

Proces se događa u komori izgaranja, gdje se dodatni materijal u obliku praha dovodi u centralni dio komore za izgaranje pod velikim tlakom i visokom temperaturom, njen maksimalni iznos je 3160 °C. Brzina rastaljenih čestica doseže do 2000 m/s što omogućuje nanošenje tankog sloja velike dimenzijske točnosti. Također rezultira izvrsnom gustoćom sloja, dobrom prionljivošću i malom poroznosti. Za razliku od ostalih postupaka toplinskog naštrcavanja čestice dodatnog materijala se ne tale potpuno već dolazi do jakog deformiranja uslijed velike kinetičke energije čestica dodatnog materijala. Fizikalni mehanizam koji se ostvaruje prionjivost je mehaničko sidrenje. Kao gorivo se mogu koristiti propan ( $C_3H_8$ ), propilen ( $C_3H_6$ ), vodik, acetilen, zemni plin i kerozin. [14]

Slika 20 prikazuje shematski prikaz HVOF (High velocity oxy fuel) naštrcavanja.



**Slika 20** Shematski prikaz HVOF (High velocity oxy fuel) naštrcavanja [8]

(1.gorivi plin, kisik; 2.prašak i aromatizirajući plin; 3.sapnica s i bez dovodenja topline; 4.plinski plamen i čestice dodatnog materijala; 5.podloga, radni komad)

### 3.5.2. Prednosti i nedostaci HVOF (High velocity oxy fuel) postupka

Svojstvom da veća brzina čestica kod toplinskog naštrcavanja rezultira velikim adhezijskim čvrstoćama, manjoj poroznosti, manjoj utrošenosti vremena za hlađenje i udar mlaza u radnu površinu u polurastaljenom stanju nastaje HVOF naštrcavanje. Upravo ovaj postupak toplinskog naštrcavanja kao svoje prednosti sadrži [14]:

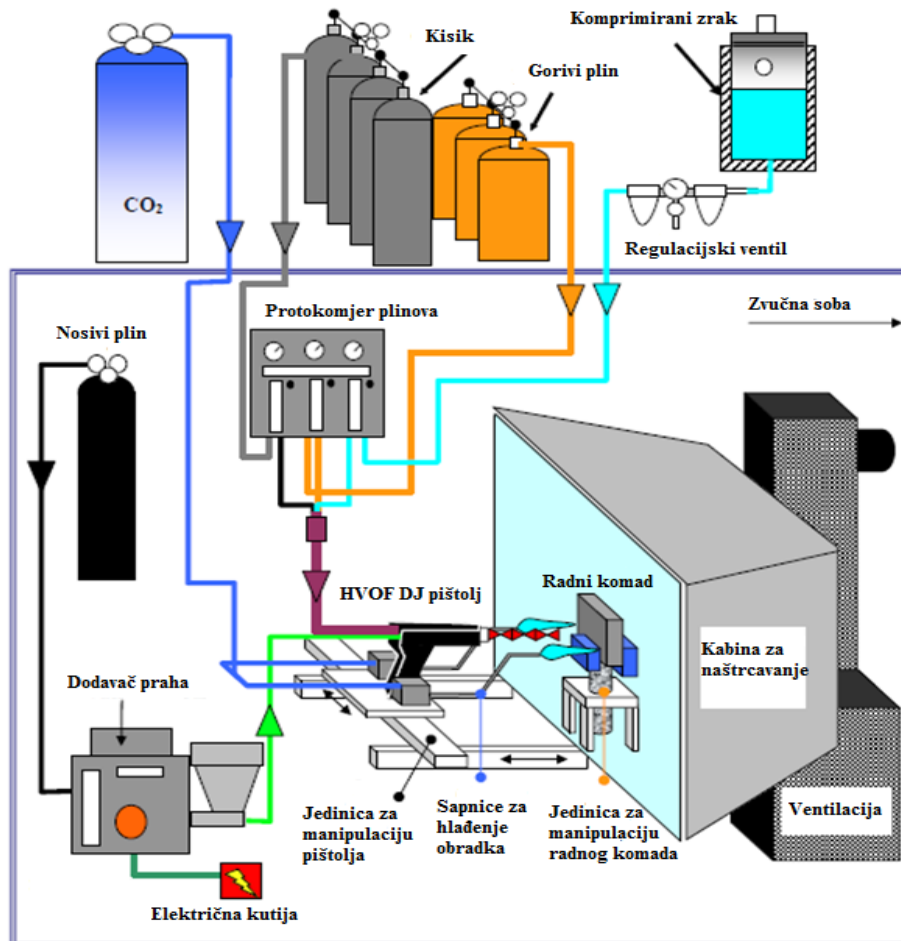
- Jednoliko i efikasno zagrijavanje čestica praha, posljedica toga su jake turbulencije u komori za izgaranje;
- Za let čestica potrebno je manje vrijeme, radi velikih brzina plinskoga mlaza, a to sve smanjuje površinsku oksidaciju;
- Brzina postupka smanjuje mogućnost miješanja s okolnim zrakom;
- Temperatura čestica je puno niža u odnosu na ostale postupke (oko 3000°C);
- Mala poroznost (od 1 do 2 %);
- Visoka tvrdoća prevlake;
- Čestice praha se kemijski ne mijenjaju;
- Velika otpornost na trošenje i dobra korozijska otpornost;
- Mogućnost debljeg nanošenja prevlaka;
- Moguća automatizacija;
- Fleksibilnost opreme.

Nedostaci su uglavnom povezani s nedovoljnim poznavanjem opreme i radnih parametara kao što su [14]:

- Skupa oprema;
- Nemogućnost prevlačenja malih cilindričnih unutarnjih promjera;
- Visoka potrošnja plinova;
- Potrebna dodatna zvučna izolacija i ventilacija.

### 3.5.3. Oprema kod HVOF (High velocity oxy fuel) naštrcavanja

Najvažniji dio opreme su sustav za prevlačenje kojim osiguravamo kvalitetu naštrcanog sloja, te sustav kontrole medija i kontrole rukovanja. Slika 21 prikazuje shematski prikaz HVOF (High velocity oxy fuel) postrojenja.



Slika 21 Shematski prikaz realnog HVOF (High velocity oxy fuel) sustava [16]

#### 4. USPOREDBA POSTUPAKA TOPLINSKOG NAŠTRCAVANJA

U tablici 2 je dan prikaz postupaka toplinskog naštrcavanja koji su obrađeni s obzirom na izvor topline, temperaturu uspostavljenog luka, brzinu čestica koje izlaze iz sapnice, vrstama dodatnog materijala, poroznost, čistoću te gorive plinove.

Iz tablice 2 je vidljivo da plazma naštrcavanje ima daleko najveću temperaturu uspostavljenog luka (iznad 15000°C), također je vidljivo da HVOF (High velocity oxy fuel) naštrcavanje ima najveću brzinu čestica koje izlaze iz sapnice a rezultat tog je najmanje utrošeno vrijeme za hlađenje i najmanja poroznost sloja. Isto tako može se zaključiti da je prašak puno češće korištena vrsta dodatnog materijala od žice.

Tablica 2 Usporedba različitih procesa toplinskog naštrcavanja [8]

Tehnika naštrcavanja	Izvor topline	Pogonsko gorivo	Vrsta dodatnog materijala	Temp. na izlazu iz pištolja °C	Brzina čestica m/s	Materijali za naštrcavanje	Vlačna čvrstoća	Razina poroznosti %
Elektrolučno naštrcavanje	Luk između elektroda	Zrak	Žica	6000	240	Rastezljivi materijali	40-60 MPa	8-15
Plazma naštrcavanje	Plazmeni luk	Inertni plin	Prašak	16000	120-600	Metal, keramika, plastika i spojevi	30-70 MPa	2-5
Plazma pod malim pritiskom	Plazmeni luk	Inertni plin	Prašak	16000	900	Metal, keramika, plastika i spojevi	>70 MPa	<5
Raspršivanje	--	--	Prašak	--	--	Taljivi metali	>70 MPa	<0,5
Plameno naštrcavanje	Elektrolitički plin	Detonantni valovi	Prašak	3300	240	Metal i keramika	20-28 MPa	10-20
HVOF Detonacijski pištolj	Kisik Acetilen Dušik	Detonantni valovi	Prašak	4500	800	Metal, keramika, plastika i spojevi	>70 MPa	0,1-1
HVOF Sulzer METCO DJ pištolj	Oxypropan Oxyhydrogen Oxypropilen	Zrak	Prašak	2800	1350	Metal i keramika	40-96 MPa	0,5-2

## 5. NAKNADNA OBRADA NAKOG NAŠTRCANOG SLOJA

Kako je bitno očistiti i pripremiti radno površinu prije toplinskog naštrcavanja isto tako je bitno mehanički obraditi naštrcani sloj kako bi se odstranile razne nečistoće nastale toplinskim naštrcavanjem. Ovdje je bitno voditi brigu o pravilnom odabiru alata i režima obrade jer oni ovise o materijalu i debljini sloja. Postupci završne obrade nakon toplinskog naštrcavanja su: poliranje, brušenje, glodanje, tokarenje, superfiniš, honanje i lepovanje.

Poliranje, brušenje, honanje, lepanje i superfiniš su obrade odvajanjem čestica bez definiranja geometrije alata.

Poliranje se u pravilu koristi za poboljšani izgled obratka, to je zaglađivanje površine obratka pomoću abraziva. Najčešće se provodi nakon operacije brušenja kako bi odstranili ogrebotine nastale nakon brušenja. Ovdje ovaj postupak se koristi za uklanjanje okidacije.

Honanje je postupak kojeg karakteriziraju male brzine i mali pritisci alata. Najčešće se provodi kao završna obrada unutarnjih cilindričnih površina.

Lepanje je postupak sličan honanju, a njime se postiže jako fino stanje hrapavosti površine, velika dimenzijska točnost površine i velika točnost dosjednih površina. Ovim postupkom dobiva se stanje hrapavosti u klasama od N1 do N4.

Superfiniš je u principu kratkohodno honanje, ovim postupkom se postiže najfinija kvaliteta hrapavosti površine od N1 do N3. Najčešće se ovim postupkom obrađuju vanjske cilindrične površine.

Tokarenje i glodanje su obrade odvajanjem čestica s definiranom geometrijom reznog alata.

Tokarenje je postupak obrade odvajanjem čestica koji se obavlja na stroju koji se zove tokarilica i obrađuje obratke cilindričnog oblika. Obradak obavlja glavno rotacijsko gibanje dok alat obavlja ostala posmično, dostavno i pripremno. Alat je tokarski nož koji može biti napravljen od keramike, tvrdom metala, brzoreznog čelika, keremeta, dijamanta i dr.

Glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica kojim obrađujemo ravne plohe, zakrivljene plohe, utore, zupčanike, žljebove. Ovdje alat obavlja glavno rotacijsko gibanje dok posmično mogu obavljati i alat i obradak. Alat je glodalo koje može biti različitih oblika ovisno o tome kakav obradak glodamo.

Materijali reznih alata, odnosno reznog dijela alata, ovisno o vrsti materijala dijele se na [17]:

- Alatni čelici (0,6 do 1,5% C), postižu brzine rezanja od 10 m/min. i mogu izdržati temperaturu zagrijavanja do 300°C;
- Brzorezni čelici, mogu biti legirani s Cr, W, Co, V i Mo, postižu brzine rezanja od 30 do 40 m/min. i mogu izdržati temperaturu zagrijavanja do 600°C;
- Tvrdi metal, sinteritan od tvrdih metalnih karbida (W, Ta, Ti) i veziva;
- Prevučeni tvrdi metali TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiCN, prevučeni PVD i CVD postupcima;
- Sitno – zrnati tvrdi metali;
- Keramike, oksidne na bazi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i nitridna Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>;
- CBN – kubni bor nitrid;
- PCD – polikristalni dijamant.

Još neki od postupaka naknadne obrade koji nisu mehanički mogu biti: difuzija, impregnacija, vruće izostatičko prešanje, laserska obrada.



## 6. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu će se analizirati uzorci načinjeni plazma navarivanjem, ocijeniti prikladnosti tehnologije i utvrditi specifične greške koje su se pojavile. Nadalje dat će se prijedlozi za poboljšanje tehnologije plazma navarivanja ovisno o vrsti praška i zahtjevima navarenog sloja.

Navarivanje je postupak toplinske obrade materijala sličan naštrcavanju. Definira se kao nisko energetska toplinska naštrcavanje. Kod navarivanja se površinski sloj materijala tali i miješa s dodatnim materijalom, navareni slojevi su nešto deblji i brzine čestica kod navarivanja su puno veće nego kod naštrcavanja.

### 6.1. Oprema kod plazma navarivanja

Eksperiment se proveo u Laboratoriju za zavarivanje FSB-a (Fakulteta strojarstva i brodogradnje). Na slici 22 je prikazan sustav za plazma naštrcavanje, a sastoji se od sljedećih dijelova:

1. Izvor struje za plazma navarivanje GAP3002 AC/DC koji ima 100% intermitenciju za struje do 280A, moguć je radi i istosmjernom i izmjeničnom strujom.
2. Vodeno hlađenje koje je neophodno kako bi sustav funkcionirao na pravilan način, također produžuje trajnost same sapnice.
3. Boce s komprimiranim plinovima.
4. Sustav za dobavu praška.
5. Upravljačka jedinica gibanja pištolja, omogućava podešavanje parametara njihovih.
6. Pištolj za plazma navarivanje.



Slika 22 Oprema za plazma navarivanje praškom [18]

## 6.2. Oblikovanje eksperimentalnog rada

Osnovni materijal odljevka kružnog poprečnog presjeka dimenzija (dimenzije  $\text{Ø}171/\text{Ø}78 \times 51$ ) je GGG40 (EN GJS 400 15) ili tzv. nodularni lijev feritno-perlitne strukture. Na osnovni materijal se postupkom plazma navarivanja nanio sloj bronce, radi se o aluminijskoj bronci sastava Cu-Al-Ni iz „Castolina“. Sloj bronce je nanesen na unutarnjem i vanjskom prstenu, postignuta visina na oba prstena je oko 5 mm i to u dva prolaza na svakom prstenu. Nakon toga je strojnom obradom tokarenja skinut sloj navarenog dijela do visine 1,5 mm. Slike 23 i 24 prikazuju obradak nakon nanošenja sloja i nakon dodatne obrade tokarenja.



**Slika 23** Obradak nakon nanosenoj sloja plazma navarivanjem [18]



**Slika 24** Obradak nakon dodatne obrade tokarenja [18]

Na unutarnjem prstenu je načinjen sloj širine 24 mm i visine 5 mm. Glavni parametri kojima je načinjen unutarnji prsten su prikazani u tablici 3.

Tablica 3 Parametri pri navarivanju unutarnjeg prstena

PARAMETAR	IZNOS PARAMETRA
PREDGRIJAVANJE	BEZ PREDGRIJAVANJA
TEMPERATURA OSNOVNOG MATERIJALA	19 °C
VRSTA STRUJE	AC, IZMJENIČNA STRUJA
JAKINA STRUJE PLAZMENOG LUKA	92 A
INTENZITET DOBAVE PRAŠKA	60 %

Vizualnom kontrolom navarenog unutarnjeg sloja vide se neke nepravilnosti, vidljiva su područja naljepljivanja i šupljina (pora). Zbog toga će se pri nastanku vanjskog sloja promijeniti neki od parametara u odnosu na unutarnji sloj. Bitan čimbenik je povećanje jakosti izmjenične struje.

Na vanjskom prstenu je načinjen sloj na srednjem promjeru od 180 mm, širine 20 mm i visine 5 mm. Glavni parametri kojima je načinjen vanjski prsten su prikazani u tablici 4.

Tablica 4 Parametri pri navarivanju vanjskog prstena

PARAMETAR	IZNOS PARAMETRA
PREDGRIJAVANJE	BEZ PREDGRIJAVANJA
TEMPERATURA OSNOVNOG MATERIJALA	23 °C
VRSTA STRUJE	AC, IZMJENIČNA STRUJA
JAKINA STRUJE PLAZMENOG LUKA	112 A
INTENZITET DOBAVE PRAŠKA	62 %
BRZINA GIBANJA PIŠTOLJA PO X OSI	59 mm/s
ŠIRINA NJIHANJA	17 mm

POTROŠNJA PRAŠKA	29 g/min
VRIJEME NAVARIVANJA	ZA SREDNJI PROMJER 180 mm POTERBNO JE 4,5 MIN PO KRUGU
BRZINA NAVARIVANJA	125 mm/min
PROTOK I VRSTA PLAZMENOG PLINA	1 l/min; Ar 5.0
PROTOK I VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	15 l/min; Ar 5.0
PROTOK I VRSTA POTISNOG PLINA	3 l/min; Ar 5.0

Pri vizualnoj kontroli navarenog vanjskog sloja vidljiva su poboljšanja i to ukazuje na važnost usklađivanja parametara s ciljem ostvarivanja što kvalitetnijeg sloja. Također nam ukazuje i na određeni raspon širine u kojoj se mogu optimizirati parametri.

### 6.3. Analiza mikrostrukture

Nakon vizualne kontrole provodi se analiza mikrostrukture, iz osnovnog materijala odljevka kružnog poprečnog presjeka izrezana su dva uzorka. Pomoću tračne pile prikazane na slici 25 izrezan je uzorak 1 iz navarenog vanjskog sloja i uzorak 2 iz navarenog unutarnjeg sloja. Nakon izrezivanja uzorke je bilo potrebno izbrusiti i ispolirati te nakon toga poslati na makroanalizu. Nakon poliranja uzorci se trebaju očistiti, čišćenje se obavlja u hladnoj ili toploj vodi, ispiru se alkoholom i suši u struji toplog zraka. Uzorci 1 i 2 prikazani su na slikama 26 i 27.



**Slika 25** Tračna pila pomoću koje su izrezani uzorci





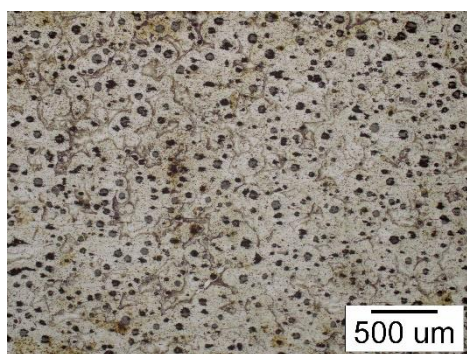
**Slika 26** Uzorak 1 (vanjski sloj)



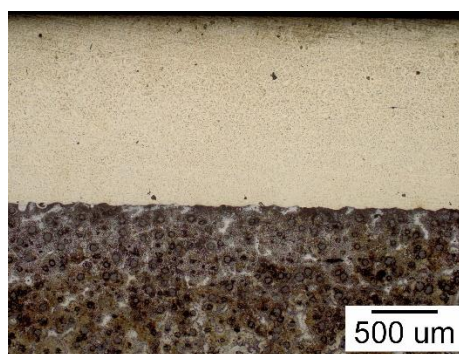
**Slika 27** Uzorak 2 (unutarnji sloj)

Kako bi se napravila makroanaliza uzorke je potrebno nagrčiti odgovarajućim sredstvom. Prvo nagrčivanje se provelo s nitalom. Nital je otopina alkohola i 5 % dušične kiseline i pogodna je za otkrivanje mikrostrukture. Budući da je riječ o heterogenom sloju, procedura ili postupak nagrčivanja materijala odvijao se u 2 faze. Prva faza bila je nagrčivanje u nitalu čime se nagrčivao osnovni materijal, druga faza je nagrčivanje bronce u reagensu  $\text{Cu}_4\text{B}$  kompleks. Nakon provedenog postupka strukture uzoraka su se fotografirale digitalnom kamerom pri povećanju od 50 i 100 puta. Napravljeno je nekoliko slika, osnovnog materijala pri povećanju od 50 puta i navarenog sloja pri povećanjima od 50 i 100 puta. Slike mikrostrukture uzoraka prikazane su slikama 28 i 29.

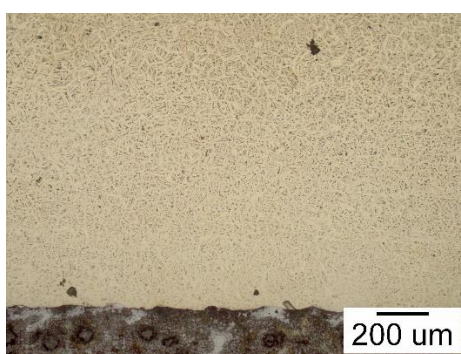
Osnovni materijal, povećanje 50 puta.



Navareni sloj, povećanje 50 puta.

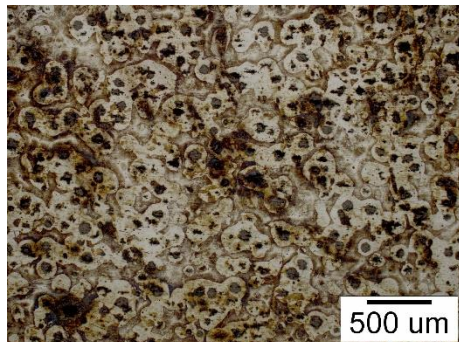


Navareni sloj, povećanje 100 puta.

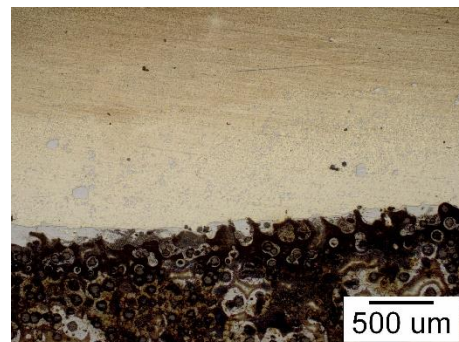


**Slika 28** Struktura uzorka 1

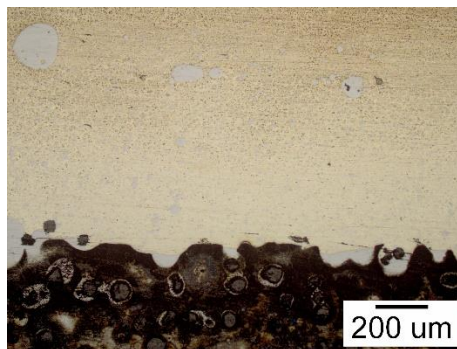
Osnovni materijal, povećanje 50 puta.



Navareni sloj, povećanje 50 puta.



Navareni sloj, povećanje 100 puta.



**Slika 29** Struktura uzorka 2

#### 6.4. Mjerenje tvrdoće

U ovom dijelu eksperimentalnog rada oba uzorka su podvrgnuta mjerenju tvrdoće. Tvrdoća se mjerila Vickersovom metodom mjerenja tvrdoće (HV 1). Stroj na kojem će se mjeriti tvrdoća zove se tvrdomjer od proizvođača „Zwick“.



Definicija tvrdoće po Vickersu je omjer sile, kojom djeluje utiskivač u obliku pravilne dijamantne četverostrane piramide sa vršnim kutom od  $136^\circ$  i površine otiska utiskivača na površini predmeta koji se ispituje. Mjerenje se započelo od vrha navarenog sloja prema osnovnom materijalu uz određeni posmak. Djelovanje opterećenja započinje preko dijamantnog vrha na uzorak, za svaki uzorak je obavljeno 10 mjerenja. Formula na temelju koje se dobiva tvrdoća po Vickersu:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{0,18544 * F}{d^2} \quad (2)$$

HV – tvrdoća po Vickersu

F – sila utiskivanja (N)

A – površina otiska u obliku četverostrane piramide sa kvadratnom osnovicom ( $\text{mm}^2$ )

d – dijagonala otiska (mm)

Rezultati mjerenja prikazani su u tablicama 5 i 6.

Tablica 5 Prikaz mjerenja tvrdoće uzorka 1

BROJ MJERENJA	UDALJENOST OD VRHA RUBA(mm)	DIJAGONALA OTISKA(mm)	HV 1
NAVARENI SLOJ			
1.	0,4	0,0955	203
2.	0,8	0,0905	226
3.	1,2	0,0920	219
OSNOVNI MATERIJAL			
4.	1,6	0,0900	229
5.	2,0	0,1060	165
6.	2,5	0,1120	148
7.	3,0	0,1100	153

8.	3,5	0,0928	200
9.	4,0	0,1090	156
10.	4,5	0,1170	135

Tablica 6 Prikaz mjerenja tvrdoće uzorka 2

BROJ MJERENJA	UDALJENOST OD VRHA RUBA(mm)	DIJAGONALA OTISKA(mm)	HV 1
NAVARENI SLOJ			
1.	0,4	0,0860	251
2.	0,8	0,0865	248
3.	1,2	0,0873	243
4.	1,6	0,0845	260
OSNOVNI MATERIJAL			
5.	2,0	0,1120	148
6.	2,4	0,0985	191
7.	2,8	0,1078	159
8.	3,3	0,0960	201
9.	3,8	0,0950	205
10.	4,3	0,0870	235

Na temelju rezultat mjerenja je vidljivo da je kod oba uzorka navareni sloj tvrdi od osnovnog materijala. Zanimljivo je kako je navareni sloj za koji se koristio prašak bronce puno tvrdi od osnovnog materijala koji je nodularni, tzv. žilavi lijev. Time je potvrđena svrha navarivanja koje se koristi kao zaštita osnovnog materijala od mehaničkog, korozijskog i drugih vrsta trošenja.

## 6.5. Problemi pri nastanku sloja

Kod primjene praška bronce javlja se dosta problema, pojava odljepljivanja, pojava naljepljivanja i šupljina (pora). Ti problemi mogu biti posljedice nekih tehnoloških razloga kao što su: premala temperatura podloge jer se u pravilu materijali kod navarivanja ne predgrijavaju, nedovoljno očišćena ili odmašćena podloga, pogrešna tehnika rada, prevelika brzina pištolja i prevelika količina praška, premala struja plazmenog luka te pogrešno odabrana vrsta struje.

Ovo zadnje treba posebno napomenuti jer prema Castolinovoj specifikaciji praška bronce, navarivanje se provodi izmjeničnom strujom kako bi došlo do oksidacije aluminijske površine i stvaranja zaštitne prevlake. Kod navarivanja s primjenom izmjenične struje potrebna je zaštita operatera i zaštita okoline od buke koja doseže do 100 dB. Nadalje uspostava plazmenog luka kod primjene izmjenične struje je puno zahtjevnija, a u radu je moguće očekivati više zastoja i veći broj promjena elektroda. Na kraju, ako se pri navarivanju bronce koristi istosmjerna struja ne dolazi do čišćenja oksidnog sloja s osnovnog materijala i homogenizacije taljevine te se javlja naljepljivanje i odvajanje sloja.

Kako bi se izbjegli navedeni problemi potrebno je načiniti neke aktivnosti i poboljšanja:

1. Predgrijavanje – predgrijavanje je bitan dio procesa, pogotovo u zimskom periodu kada uvjeti navarivanja nisu jednaki kao u ljetnom periodu, nadalje predgrijavanjem se umanjuje mogućnost nastanka pukotina i odljepljivanja zbog manje temperaturne razlike između materijala i navara. Predgrijavanje utječe i na površinski sloj koji se može dodatno očistiti od vlage i nečistoća te se predgrijavanjem povećava deponat nataljenog praška i ujednačava kvaliteta navarenih slojeva.

2. Priprema površine – važno je osim strojnom obradom kojom se postiže zadovoljavajuća hrapavost dobro očistiti i odmastiti kako bi se uklonile sve nečistoće.

3. Tehnika rada – plazma navarivanje je samo po sebi specifična tehnologija, jako osjetljiva na odstupanja parametara i radne uvjete te je potrebno educirati tehnologe i operatere koji provode taj proces. Bitno je upoznati ih sa detaljima parametara i procesa te nekim ograničenjima i posljedicama nastanka određenih pogrešaka.

4. Skladištenje dodatnih materijala – skladištenje je važna stavka jer se lošim skladištenjem može umanjiti svojstvo praška, a to dovodi do problema u navarenom sloju i problema u procesu navarivanja. Preporuka je skladištiti prašak u originalnoj ambalaži u grijanim prostorima s razinom vlage ispod 50%.

5. Radni prostor – plazma navarivanje proizvodi dosta buke i prašine te je preporučljivo odvojiti radni prostor od ostatka pogona, drugi razlog je što je plazma navarivanje dosta osjetljiv proces te bi prašina, nečistoće i sl. iz ostatka pogona otežale proces.

6. Parametri navarivanja – viđeno je već kako postoji određeni raspon širine u kojem se mogu optimizirati parametri. Kontrola parametara i opreme mora se provoditi zbog osjetljivosti plazma navarivanja, također potrebno je slojeve koji su malo deblji izvoditi u dva ili više prolaza kako bi se postigla što bolje homogenost. Tehnika rada je također bitna, tako da tehnika gibanja pištolja zadovoljava načelo da prvo ide plazmeni luk a onda prašak. Još je bitno napomenuti da se treba voditi briga o opremi kao što je duljina dobavnog crijeva i o pozicionerima s obzirom na brzinu rotacije.

## 7. ZAKLJUČAK

Degradacija materijala djelovanjem korozivskih mehanizama česta je pojava u industriji i svakodnevnoj primjeni. Korozija je proces koji se ne može u potpunosti zaustaviti nego se samo može usporiti do prihvatljive razine. Koroziju se može sprječavati na razne načine, a jedan od njih je i postupak toplinskog naštrcavanja koji je razrađen u ovom radu.

Toplinsko naštrcavanje je noviji postupak nastao u cilju zaštite konstrukcija i određenih strojnih dijelova od raznih čimbenika te kako bi produžio njihov eksploatacijski vijek. To je postupak koji ima jako široku primjenu u industrijskom sektoru obzirom na raspon materijala koji se mogu naštrcavati. Pozitivna stavka kod ovog postupka je brzina kojom se izvodi i činjenica da se osnovnom materijalu koji se naštrcava ne mijenja mikrostruktura jer samo zagrijava površina dok se primjerice kod navarivanja koji je sličan postupak toplinske obrade tali dio površine i miješa s dodatnim materijalom. Naravno kako bi postupak bio učinkovit bitno je poznavati problematiku materijala koji se naštrcava, uskladiti parametre i savršeno pripremiti površinu naštrcavanja kako ne bi došlo do odljepljivanja naštrcanog sloja. Kako je to postupak koji se i dalje usavršava i poboljšava, sada se radi na postupku hladnog naštrcavanja kojim se postižu nadzvučne brzine čestica, za vjerovati je da će u budućnosti naći još širu primjenu u industrijskom i drugim sektorima.

U eksperimentalom radu je obrađen postupak plazma navarivanja koji je definiran kao nisko energetska toplinska naštrcavanje.

Navarivanje je postupak toplinske obrade materijala sličan toplinskom naštrcavanju. Slojevi koji se navaruju su deblji nego kod naštrcavanja, brzina čestica je veća i kako je već napomenuto površinski sloj materijala se tali i miješa s dodatnim materijalom.

Prema provedenom ispitivanju postupak plazma navarivanja je ispunio svoju namjenu. Tvrdoća navarenog sloja je dosta veća od tvrdoće osnovnog materijala i nije došlo do odljepljivanja navarenog sloja. Rezultati ne bi bili takvi da to nije provodio stručan tim upoznat s problematikom nanošenja materijala i širinom raspona parametara kojim su se otklonile neke početne poteškoće.

---

**LITERATURA**

- [1] D. E. Crawmer: Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International and the Thermal Spray Society, 2004
- [2] K. Šimunović, M. Franz, G. Marić: Istraživanje i procjena zaostalih napreznja u plinski naštrcanim NiCrBSi slojevima, Metalurgija 47 (2008) 2, 93-97.
- [3] E. Lugscheider: Handbuch der thermischen Spritztechnik, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [4] Christopher C. Berndt Ghislain Montavon: Thermal Spray: Preserving 100 Years Of Technology, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 15(1), str. 5-8, 2006.
- [5] Z. Glogović: Utjecaj parametara plinskog naštrcavanja na svojstva nanešenog sloja, doktorski rad, Zagreb, 2010.
- [6] T. Filetin, K. Grilec: Postupci modificiranja i prevlačenja površina – priručnik za primjenu, Zagreb, 2004.
- [7] Z. Kožuh: Utjecaj eksploatacijskih uvjeta na čvrstoću lijepljenih spojeva, doktorska disertacija, Zagreb, 1998.
- [8] I. Garašić: [http://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1416223416-0-toplinskonastrcavanjezim2012\\_2h.pdf](http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1416223416-0-toplinskonastrcavanjezim2012_2h.pdf), PP Toplinsko naštrcavanje, FSB (predavanje za studente), Zagreb

[9]...[http://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1397803484-0-1389947555-0-toplinskonastrcavanje1s.ppt](http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1397803484-0-1389947555-0-toplinskonastrcavanje1s.ppt), PP Toplinsko naštrcavanje, FSB (predavanja za studente), Zagreb

[10] Hrvatski zavod za norme: Toplinsko naštrcavanje – Nazivlje, razredba (EN 657: 2005), HZN, Zagreb, 2008.

[11] <http://www.lasercladding.com/Services/ThermalSpray> (18.02.2015.)

[12] I. Gedzevicius , A.V. Valiulis: Analysis of wire arc spraying process variables on coatings properties, Sciencedirect

[13] <http://www.precisionrolls.com/services/thermal-spraying/> (18.02.2015.)

[14] D.Ivaniš: Karakterizacija prevlaka dobivenih HVOF postupkom, diplomski rad, Zagreb, 2011.

[15][http://www.hsuhh.de/werkstoffkunde/index.php?brick\\_id=8BBNpQHopSQm5PIy&action=setlanguage&language=en](http://www.hsuhh.de/werkstoffkunde/index.php?brick_id=8BBNpQHopSQm5PIy&action=setlanguage&language=en) (18.02.2015.)

[16] Stokes J: Theory and application of the Sulzer Metco HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) thermal spray process, Dublin City University, Dublin 2008, str. 44-78

[17] Š. Šavar: Obrada odvajanjem čestica, Zagreb, 1987.

[18] Zavod za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb