

# Usporedba postupaka naštrcavanja APS i HVOF

---

**Papec, Marko**

**Master's thesis / Diplomski 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:235:183992>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marko Papec**

Zagreb, 2015. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Marko Papec

Zagreb, 2015. godina.

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

Posebno zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na stručnom vodstvu, savjetima te uloženom trudu.

Veliko hvala bratiću i dobrom prijatelju Vladimiru Lisičaku na brojnim praktičnim i stručnim savjetima koji su bitno poboljšali eksperimentalni dio ovog rada.

Također, najveća hvala roditeljima Stjepanu i Nadici te bratu Mihaelu na dugogodišnjoj potpori, strpljenju i razumijevanju bez kojih ne bi ni bio u prilici napisati ovaj rad.

Hvala Ivani što je uvijek bila uz mene.

Marko Papec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske 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	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Papec** Mat. br.: 0035164553

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba postupaka naštrecavanja APS i HVOF**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of APS and HVOF thermal spraying**

Opis zadatka:

Toplinsko naštrecavanje predstavlja jednu od tehnologija inženjerstva površina s najširoom primjenom. U tom području sve su dominantnija dva postupka: APS (Air Plasma Spray) i HVOF (High Velocity Oxygen Fuel).

U radu je potrebno dati pregled postupaka toplinskog naštrecavanja s posebnim naglaskom na APS i HVOF, navesti njihove prednosti i mane, te najčešća područja primjene. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi uzorke materijala sa prevlakama izrađenim pomoću navedenih tehnologija s posebnim naglaskom na povećanje otpornosti trošenju. Izrađene uzorke potrebno je laboratorijski ispitati i karakterizirati.

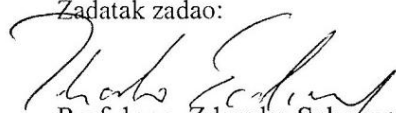
Na temelju dobivenih rezultata potrebno je usporediti APS i HVOF, te dati prijedloge mjesta primjene tih tehnologija u prehrambenoj industriji.

Zadatak zadan:  
7. svibnja 2015.

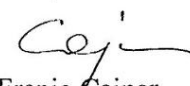
Rok predaje rada:  
9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:  
15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Zdravko Schatperl

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	IV
POPIS KRATICA .....	V
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD .....	1
1.1. Mehanizmi trošenja, izbor materijala te zaštita konstrukcijskih materijala .....	1
1.2. Zaštitna prevlačenja .....	6
1.2.1. Nanošenje nemetalnih prevlaka .....	8
1.2.2. Nanošenje metalnih prevlaka .....	9
1.2.3. Pregled postupaka prevlačenja .....	10
1.3. Toplinsko naštrcavanje .....	11
1.3.1. Podjela postupaka toplinskog naštrcavanja .....	14
1.3.1.1. Plameno naštrcavanje .....	16
1.3.1.2. Elektrolučno naštrcavanje .....	17
1.3.1.3. Naštrcavanje plazmom (plazmatsko naštrcavanje) .....	18
1.3.1.4. Visokobrzinsko plameno naštrcavanje (HVOF) .....	19
2. APS I HVOF POSTUPCI TOPLINSKOG NAŠTRCAVANJA .....	20
2.1. APS (Air Plasma Spray) naštrcavanje .....	20
2.1.1. Opis tehnologije APS naštrcavanja .....	23
2.1.2. Tehnološki parametri .....	25
2.1.3. Dobiveni naštrcani slojevi .....	26
2.1.4. Prednosti i mane APS-a .....	28
2.1.5. Najčešća područja primjene APS-a .....	29
2.2. HVOF (High Velocity Oxy – Fuel) naštrcavanje .....	31
2.2.1. Opis tehnologije HVOF naštrcavanja .....	31
2.2.2. Tehnološki parametri .....	34
2.2.3. Dobiveni naštrcani slojevi .....	35
2.2.4. Prednosti i mane HVOF-a .....	37
2.2.5. Najčešća područja primjene HVOF-a .....	38
2.3. Usporedba postupaka APS i HVOF naštrcavanja .....	39
2.4. Metode za ispitivanje svojstava naštrcanog sloja .....	42
2.4.1. Ispitivanje tvrdoće naštrcanog sloja .....	43
2.4.2. Ispitivanje prionljivosti (adhezije) naštrcanog sloja .....	43
2.4.3. Ispitivanje debljine naštrcanog sloja .....	44
2.4.4. Ispitivanje hrapavosti površine naštrcanog sloja .....	44
2.4.5. Određivanje poroznosti prevlake .....	45
2.4.6. Ispitivanje korozijske postojanosti i otpornosti na trošenje naštrcanog sloja .....	45
2.4.7. Ispitivanje modula elastičnosti i čvrstoće prevlake .....	46

---

3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	47
3.1. Korištena oprema, osnovni i dodatni materijal .....	47
3.1.1. Sustavi za APS i HVOF naštrecavanje .....	48
3.1.2. Primjena industrijskog robota kod APS i HVOF postupaka naštrecavanja .....	49
3.1.3. Osnovni i dodatni materijal .....	50
3.1.3.1. Osnovni materijal .....	50
3.1.3.2. Dodatni materijal .....	50
3.1.3.3. Karakteristike praha za naštrecavanje .....	51
3.2. Tehnologija naštrecavanja .....	54
3.2.1. Priprema podloge za naštrecavanje .....	54
3.2.1.1. Pjeskarenje ili sačmarenje .....	54
3.2.1.2. Odmašćivanje .....	54
3.2.1.3. Predgrijavanje .....	55
3.2.2. Parametri naštrecavanja .....	56
3.2.3. Dobiveni uzorci .....	58
3.3. Ispitivanje svojstava naštrecanih slojeva .....	59
3.3.1. Ispitivanje svojstava TBC prevlake .....	59
3.3.2. Ispitivanje svojstava Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> prevlake .....	61
3.4. Analiza i usporedba naštrecanih slojeva u odnosu na dobivene rezultate ispitivanja..	63
4. MOGUĆNOSTI PRIMJENE APS I HVOF POSTUPAKA NAŠTRCAVANJA U PREHRAMBENOJ INDUSTRIJI .....	64
5. ZAKLJUČAK .....	66
LITERATURA .....	68
PRILOZI .....	71

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Podjela prevlaka [4].....	7
Slika 2.	Podjela postupaka toplinskog naštrecavanja prema vrsti nositelja energije (DIN 32539) [5].....	15
Slika 3.	Podjela postupaka toplinskog naštrecavanja [7] .....	16
Slika 4.	Shema postupka plamenog naštrecavanja pomoću žice [5], [8] .....	17
Slika 5.	Princip plamenog naštrecavanja praškom [7] .....	17
Slika 6.	Shema postupka elektrolučnog naštrecavanja pomoću žice [5].....	18
Slika 7.	Prikaz deformiranja čestica praha pri udaru o površinu podloge [7] .....	21
Slika 8.	Shematski prikaz leta rastaljene čestice i njenog sudara s podlogom [7] .....	21
Slika 9.	Shema izgleda naštrecanog sloja i njegovog poprečnog presjeka [7].....	22
Slika 10.	Izgled složene strukture tipičnog naštrecanog sloja [7] .....	22
Slika 11.	Shema plazmatskog naštrecavanja [5] .....	23
Slika 12.	Primjer praha za naštrecavanje (SEM) [14].....	24
Slika 13.	Naštrecani slojevi APS postupkom: (a) NiCrAlY i (b) CoNiCrAlY na podlogu Inconel 713 LC [12] .....	27
Slika 14.	Osnovni princip HVOF naštrecavanja [5].....	32
Slika 15.	Konstrukcije pištolja za HVOF ovisno o gorivu [21] .....	33
Slika 16.	SEM slike prahova za naštrecavanje s različitom morfologijom [20] .....	36
Slika 17.	Tipične temperature plamena i brzine čestica kod različitih postupaka toplinskog naštrecavanja [20] .....	39
Slika 18.	Sustavi a) APS i b) HVOF postupaka naštrecavanja [21].....	40
Slika 19.	Usporedba otpornosti na abrazivno trošenje različitih slojeva oksidne keramike naštrecanih APS i HVOF postupkom [20].....	41
Slika 20.	Poprečni presjeci mikrostrukture TBC prevlake [16] .....	42
Slika 21.	Industrijski robot Yaskawa Motoman MC2000 s pripadajućim kontrolerom NX 100 koji je korišten za manipulaciju pištolja kod toplinskog naštrecavanja [36] ...	49
Slika 22.	Dobiveni uzorak TBC prevlake APS postupkom naštrecavanja.....	58
Slika 23.	Dobiveni uzorak Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> prevlake HVOF postupkom naštrecavanja .....	58
Slika 24.	SEM slika poprečnog presjeka uzorka naštrecanog TBC prevlakom.....	59
Slika 25.	SEM slika poprečnog presjeka uzorka naštrecanog Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> prevlakom .....	61
Slika 26.	Primjer korištenja postupaka toplinskog naštrecavanja u prehrambenoj industriji [35] .....	64
Slika 27.	Mogući primjeri upotrebe APS i HVOF postupaka naštrecavanja u prehrambenoj industriji.....	65



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Primjeri mjera i postupaka zaštite materijala [4].....	5
Tablica 2. Pregled postupaka prevlačenja [4] .....	10
Tablica 3. Prašci za naštrcavanje [5] .....	13
Tablica 4. Razlike između tri generacije razvijenih pištolja za HVOF sustave [20] .....	33
Tablica 5. Korišteni materijal praha za naštrcavanje TBC prevlake APS postupkom.....	50
Tablica 6. Korišteni materijal praha za naštrcavanje sloja otpornog na trošenje HVOF postupkom .....	51
Tablica 7. Karakteristike SL-20 praha za naštrcavanje.....	51
Tablica 8. Karakteristike ZrO <sub>2</sub> praha za naštrcavanje .....	52
Tablica 9. Karakteristike Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> praha za naštrcavanje.....	53
Tablica 10. Značajke važnijih otapala za odmašćivanje [4].....	55
Tablica 11. Tehnološki parametri korišteni kod APS naštrcavanja TBC prevlake.....	56
Tablica 12. Tehnološki parametri korišteni kod HVOF naštrcavanja Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> prevlake.....	57
Tablica 13. Ispitivanja TBC prevlake na temelju SEM slike .....	60
Tablica 14. Ispitivanje Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> prevlake na temelju SEM slike .....	61
Tablica 15. Mjerenje tvrdoće (prema Vickersu) uzorka naštrcanog Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> prevlakom.....	62

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>	<b>ENG ili NJEM</b>	<b>HR - Opis</b>
APS	Air Plasma Spray	Atmosfersko plazmatsko naštrcavanje
HVOF	High Velocity Oxy - Fuel	Visokobrzinsko plameno naštrcavanje
DIN	Deutsche Industrie Normen	Njemačke norme
ISO	International Organization for Standardization	Internacionalna organizacija za standardizaciju
ASTM	American Society for Testing and Materials	Američko društvo za ispitivanje materijala
PVD	Physical Vapor Deposition	Fizikalno prevlačenje iz parne faze
CVD	Chemical Vapor Deposition	Kemijsko prevlačenje iz parne faze
LPPS	Low Pressure Plasma Spray	Plazmatsko naštrcavanje kod smanjenog tlaka
VPS	Vacuum Plasma Spray	Vakuumsko plazmatsko naštrcavanje
DC	Direct Current	Istosmjerna struja
SEM	Scanning Electron Microscope	Skenirajući elektronski mikroskop
RF	Radio Frequency	Radio frekvencijski
TBC	Thermal Barrier Coating	Toplinski barijerni sloj
TGO	Thermally Grown Oxide	Toplinski rast oksida
YSZ	Ytria Stabilized Zirconia	Cirkonijev oksid stabiliziran itrijem
SAW	Submerged – Arc Welding	Zavarivanje pod troskom
FCAW	Flux – Cored Arc Welding	Zavarivanje pod praškom
PTAW	Plasma Transferred Arc Welding	Zavarivanje plazmom
SF	Spray Fusion	Postupak za difuzijsko žarenje (poput tvrdog lemljenja)
CGS	Cold Gas Spray	Hladno naštrcavanje
IET	Impulse Excitation Technique	Impulsna uzbudna tehnika
ICP	In-situ Coating Property	Senzor ICP

## **SAŽETAK**

Jedna od tehnologija inženjerstva površina s najširoom primjenom je toplinsko naštrcavanje koje spada u grupu postupaka u kojima se sitne čestice metalnih ili nemetalnih materijala u rastaljenom ili polurastaljenom stanju nanose na podlogu tako tvoreći naštrcani sloj. U ovom radu se uspoređuju dva postupka toplinskog naštrcavanja (APS – Air Plasma Spray i HVOF – High Velocity Oxy-Fuel) koji se koriste kod najzahtjevnijih aplikacija s naglaskom na otpornost prema trošenju. Promatra se utjecaj tehnoloških parametara na mikrostrukturu nanešene prevlake te samim time i na svojstva nanešene prevlake. U eksperimentalnom dijelu rada su izrađeni uzorci koji su zatim laboratorijski ispitani i okarakterizirani. Rezultati su pokazali da se pravilnim odabirom i optimizacijom parametara mogu postići odlična svojstva nanešene prevlake. APS i HVOF postupak toplinskog naštrcavanja se primjenjuju u sve više primjera te su tako predložene moguće primjene ovih tehnologija u prehrambenoj industriji.

Ključne riječi: toplinsko naštrcavanje, APS, HVOF, otpornost na trošenje, tehnološki parametri, metode ispitivanja naštrcanog sloja, primjena postupaka APS i HVOF

## **SUMMARY**

One of surface engineering technology with the widest application is thermal spraying, which belongs to a group of procedures in which the fine particles of metal or non-metallic materials in the molten state or semi-molten state is applied to the substrate, thereby forming sprayed coatings. This paper compares two methods of thermal spraying (APS - Air Plasma Spray and HVOF - High Velocity Oxy-Fuel) which are used in the most demanding applications with a focus on wear resistance. The influence of technological parameters on the microstructure of coatings and thus the properties of the applied coating is observed. In the experimental part of the work samples are made and then tested in laboratory and characterized. The results showed that with proper selection and optimization of the parameters it is possible to achieve excellent properties of the applied coating. APS and HVOF thermal spraying process are applied in more and more examples and there are some proposed possible applications of these technologies in the food industry.

Key words: thermal spraying, APS, HVOF, wear resistance, technological parameters, test methods of sprayed coating, application of APS and HVOF

## 1. UVOD

Izazov svakog inženjera je objasniti ponašanje materijala u realnim uvjetima primjene gdje se nerijetko javljaju ozbiljni štetni utjecaji poput trošenja, oštećivanja, korozije, visokotemperaturne oksidacije i sl. koji smanjuju radni vijek proizvoda u eksploataciji. Zbog kompleksnosti slučajeva u praksi nužan je znanstveni pristup koji uključuje istraživanja, razvoj novih materijala te inovativan i interdisciplinarni pristup inženjerstvu materijala. Također, pri rješavanju ovih problema potrebno je zadržati konkurentnost tj. zadovoljavajući omjer kakvoće i cijene kako bi se zadržala uspješnost na tržištu što u današnja vremena nije nimalo lako.

Znanja potrebna za rješavanje ovih problema uključuju poznavanje:

- procesa proizvodnje i obrade materijala,
- metoda istraživanja i ispitivanja svojstava,
- svojstva i ponašanja različitih tehničkih materijala,
- metoda za odabir materijala,
- postupaka modificiranja i prevlačenja površina te
- metoda modeliranja i simuliranja svojstava materijala i parametara procesa.

### 1.1. Mehanizmi trošenja, izbor materijala te zaštita konstrukcijskih materijala

Postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama nazivamo trošenjem. Pri rješavanju triboloških problema i dobivanju optimalnih rezultata potrebno je uzeti u obzir dijelove tribosustava, uvjete rada, protok kroz sustav (gibanja, energije, materijala i informacija), smetnje, gubitke i sva važnija međudjelovanja.

Tribološki sustav (tribosustav) se definira tako da mu je najznačajnija funkcija smanjenje trenja i trošenja koji se javljaju pri dodiru dviju površina u relativnom gibanju. U realnim

tehničkim sustavima su kao podsustav svugdje integrirani i tribološki sustavi, a njihova primjena često može spriječiti velike komercijalne gubitke ako je tribosustav dobro izveden i ako se odgovarajuće primjenjuje.

U eksploataciji tehničkih materijala se pojavljuje veliki broj slučajeva trošenja, ali svaki od pojedinih slučajeva trošenja materijala možemo opisati pomoću četiri najvažnija tj. osnovna mehanizma trošenja, a to su: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija. Dakle, možemo reći da u otpornost na trošenje spadaju pojedinačno otpornost na abraziju, otpornost na adhezijsko trošenje, otpornost na umor površine te otpornost na tribokoroziju [1, 2].

Otpornost na trošenje kao svojstvo materijala se jako teško jednoznačno kvantificira pa se zbog toga pri izboru materijala za eksploataciju, u situacijama trošenja, materijal vrlo često bira isprobavanjem i to na temelju već poznatih ili sličnih rješenja. Ovakav pristup često rezultira nedovoljno dobrim ili čak neuspjelim rješenjima pa je za uspješnu primjenu materijala u uvjetima trošenja potreban sustavni pristup.

Kako bi se napravila što kvalitetnija analiza sustava i procesa trošenja potrebno je svrstati slučajeve trošenja u karakteristične skupine. U standardnoj klasifikaciji tipova trošenja DIN 50 320 kriteriji za svrstavanje slučajeva trošenja su sljedeći:

- *elementi tribosustava*: kruto tijelo-međumeditij-kruto tijelo; kruto tijelo-kruto tijelo (suho, granično i mješovito trenje); kruto tijelo-čestice; kruto tijelo-tekućina+čestice; kruto tijelo-plin+čestice; kruto tijelo-tekućina,
- *relativno gibanje*: klizanje, kotrljanje, udarci, vibracije, valjanje, strujanje,
- *tipovi i mehanizmi trošenja*: adhezija, abrazija, umor površine i tribokorozija (pojedinačno i kombinirano).

Najkritičnija faza kod izbora materijala pri razvoju proizvoda za eksploataciju jest izbor mogućih rješenja tj. predizbor varijanti. Broj varijanti mora biti odabran tako da se izbjegne opasnost od eliminiranja konačnog, optimalnog rješenja zbog odabira premalog broja varijanti, a također znatno se povisuju troškovi izbora ako se odabere prevelik broj varijanti. Kod predizbora materijala mogu poslužiti dijagramski prikazi područja primjenjivosti materijala za određene uvjete rada, preporuke iz triboloških priručnika i kataloga te razvijeni računalni programski paketi za izbor materijala.

Bolje i točnije informacije o mogućem ponašanju izabranog materijala u realnim uvjetima eksploatacije moguće je dobiti pomoću laboratorijskih ispitivanja kod kojih se ispitivanje vrši na standardiziranim i tipiziranim uređajima te dogovorenim i propisanim metodama ispitivanja. Moguće je izraditi uzorke za ispitivanje ili još bolje ispitivati već gotove dijelove (ako je to ekonomski opravdano), a pri tome treba postići što veću sličnost između modela i stvarne situacije kod eksploatacije proizvoda.

Konačni izbor i konačnu ocjenu ispravnosti, kada ni laboratorijska ispitivanja ne daju kvalitetno jednoznačno rješenje, moguće je jedino donijeti kod ispitivanja i praćenja samih dijelova ili proizvoda u uvjetima eksploatacije. Zbog visokih troškova, teškoća oko uvjeta ispitivanja i mjerenja učinaka ova ispitivanja se rjeđe provode u praksi iako su tako dobivene informacije najvrednije.

Najveći utjecaj na tribološka svojstva i na niz drugih svojstava materijala imaju sastav i mikrostruktura tog materijala. Postoji puno usporedivih podataka koji su dobiveni na temelju već izrađenih normiranih i dogovorenih laboratorijskih ispitivanja raznih ispitnih tijela (u prvom redu poluproizvoda i gotovih proizvoda) iz pojedinih materijala. Ti najpotpuniji i najdostupniji podaci, uz podatke koji proizlaze iz praćenja pojedinih materijala u izradi i uporabi, nam upotpunjuju sliku svojstava materijala i daju uvid u moguće ponašanje materijala tokom eksploatacije [3].

Pri eksploataciji konstrukcijskog materijala dolazi do određene pojave ili procesa oštećivanja ili trošenja ako u sustavu postoji kemijska, mehanička, biološka ili neka druga pokretačka sila koja je inicijator oštećivanja. Ta pokretačka sila se očituje i uzrok je štetnim pojavama i procesima, a brzina oštećivanja je razmjerna toj pokretačkoj sili. Međutim, razni fizikalni i kemijski otpori se opiru njezinom djelovanju te im je brzina oštećivanja obrnuto razmjerna. Veličine pokretačke sile i otpora ovise o unutarnjim i vanjskim činiteljima oštećivanja. U unutarnje činitelje spadaju obilježja materijala dok u vanjske činitelje spadaju obilježja okoline (ili medija) i druge fizikalne okolnosti.

Prema ovim činiteljima temelje se mjere i postupci površinske zaštite i to na primjeni dvaju načela, a to su:

- smanjenje ili poništenje pokretačke sile, tj. uzroka oštećivanja i trošenja te
- povećanje otpora koji se opiru djelovanju te pokretačke sile.

Tehnički se ova dva načela iskorištavaju kako bi se postigle odgovarajuće mjere zaštite površine materijala i to na sljedeća tri načina:

- mijenjaju se unutarnji činitelji oštećivanja tj. mijenjaju se obilježja konstrukcijskog materijala,
- mijenjaju se vanjski činitelji oštećivanja tj. mijenjaju se obilježja okoline (medija) i fizikalnih okolnosti (temperature, naprezanja, brzine gibanja, električnog potencijala...),
- štiti se konstrukcijski materijal odvajanjem od medija (okoline) postojanim slojem (filmom, prevlakom ili oblogom) koji nastaje spontano ili se namjerno nanosi.

U ostale vrste fizikalnog i kemijskog oštećivanja i trošenja materijala spadaju:

- korozija
- izgaranje
- truljenje
- toplinski raspad (destrukcija)
- degradacijsko starenje
- erozija
- kavitacija
- vodikova bolest
- runjenje (mrvljenje, drobljenje)
- taljenje
- isparivanje (hlapljenje)
- elektroerozija
- fizikalno otapanje i fizikalno izluživanje (ekstrakcija)
- bubrenje
- puzanje itd..

Neki od primjera zaštitnih mjera i postupaka (u skladu sa spomenutim načelima i načinima njihove primjene) su navedeni u tablici 1., a u ovom radu se detaljnije obrađuje treći način zaštite materijala koji karakterizira odvajanje osnovnog materijala od medija (ili okoline) zaštitnim slojem [4].



Tablica 1. Primjeri mjera i postupaka zaštite materijala [4]

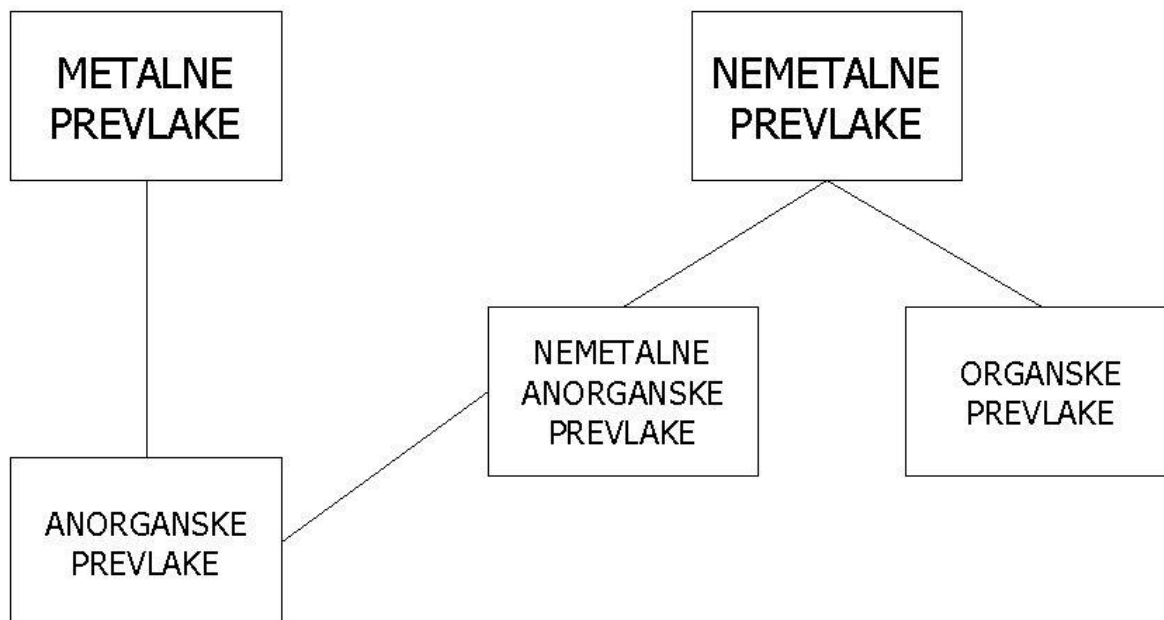
Način primjene načela zaštite	Načelo zaštite	
	Smanjenje ili poništenje uzroka oštećivanja (primjeri)	Povećanje otpora djelovanju uzroka (primjeri)
(1)	(2)	(3)
Promjena unutarnjih činitelja oštećivanja	<p>Zaštita od korozije zamjenom ugljičnog čelika bakrom, Cu-legurama, polimernim materijalima, keramikom ili staklom.</p> <p>Zaštita Al od korozije u elektrolitima rafinacijom.</p> <p>Zaštita od bimetalne korozije u elektrolitima izborom povoljne kombinacije metala.</p> <p>Zaštita od požara primjenom nezapaljivih materijala.</p> <p>Zaštita od oštećivanja koje uzrokuje pukotine i lom te izobličenje smanjenjem napetosti žarenjem metala (popuštanje) i dr.</p>	<p>Zaštita Fe od korozije legiranjem s Cr, Ni, Mo, Al, Si i Co, čime se postiže sklonost pasivnosti (visokolegirani nehrđajući i vatrostalni čelici).</p> <p>Zaštita od bimetalne korozije u elektrolitima konstrukcijskim odvajanjem dvaju metala (izolacijski umetci).</p> <p>Zaštita drva od požara, truljenja i napada kukaca impregnacijom.</p> <p>Zaštita od toplinskog raspada zamjenom organskih materijala anorganskima i sl.</p>
Promjena vanjskih činitelja oštećivanja	<p>Zaštita metala od oksidacije vrućim zrakom primjenom inertne ili reduktivne atmosfere (Ar, He, amonijak), odnosno vakuuma.</p> <p>Zaštita metala od korozije u vodi uklanjanjem otopljenog kisika (propuhivanjem vodenom parom, dodatkom hidrazina itd.).</p> <p>Zaštita metala od korozije u elektrolitima promjenom pH-vrijednosti.</p> <p>Katodna zaštita od korozije u elektrolitima.</p> <p>Zaštita od erozije filtracijom fluida.</p> <p>Zaštita od umora sprečavanjem vibracija.</p>	<p>Zaštita od korozije, degradacijskog starenja i puzanja hlađenjem strujama fluida.</p> <p>Anodna zaštita nehrđajućih čelika, Ti i Al od korozije u elektrolitima.</p> <p>Zaštita metala od korozije u elektrolitima dodatkom inhibitora.</p> <p>Zaštita metala od korozije u vodenim otopinama povećanjem električne otpornosti (npr. zamjenom morske vode slatkom, odnosno deionizacijom ili destilacijom slatke vode).</p>
Odvajanje materijala od medija ili okoline zaštitnim slojem	<p>Zaštita metala od korozije prevlačenjem s Cu, Ag, Au, Pt i Rh.</p> <p>Zaštita ugljičnog čelika od</p>	<p>Zaštita ugljičnog čelika od korozije u vodi i zraku prevlačenjem sa Zn ili Cd.</p> <p>Zaštita metala od korozije u</p>

	<p>korozije u vodi, zraku i vodenim otopinama emajliranjem, plastifikacijom, gumiranjem i ličenjem.</p> <p>Zaštita metala od korozije oblaganjem kiselostalnim i vatroostalnim materijalima (keramikom, grafitom, ugljikom itd.)</p> <p>Zaštita željeza od podzemne korozije oblogama i omotima na bazi bitumena, katranske smole i plastičnih masa.</p> <p>Zaštita polimernih materijala od starenja, fizikalnog otapanja i izluživanja te bubrenja metalizacijom.</p>	<p>sulfatnoj (sumpornoj), kloridnoj (klorovodičnoj, hidroklornoj, solnoj), kromatnoj (kromnoj) i fluoridnoj (fluorovodičnoj, hidrofluornoj) kiseline oblaganjem s Pb.</p> <p>Zaštita željeza od visokotemperaturne oksidacije alitiranjem ili inkromiranjem.</p> <p>Zaštita Al od korozije, abrazije i zajedanja anodizacijom (eloksiranjem).</p> <p>Zaštita od visokotemperaturnog razaranja topl. izolacijom.</p> <p>Zaštita materijala od trošenja nanošenjem slojeva pomoću postupaka toplinskog naštrcavanja.</p>
--	---	--

## 1.2. Zaštitna prevlačenja

Vrlo često u nekim slučajevima eksploatacije odabrani materijal nije dovoljno postojan pa se različitim metodama modificiranja i prevlačenja površina na površinu materijala nanose najrazličitije zaštitne prevlake. Nanošenje prevlaka je ujedno i najraširenija metoda zaštite materijala od korozije, trošenja i drugih oštećivanja materijala. U zadnje vrijeme ovi postupci modificiranja i prevlačenja površina ne služe samo za stvaranje prevlaka i slojeva otpornih na trošenje već se istovremeno primjenjuju i kombiniraju sa slojevima koji su otporni na koroziju ili slojevima koji površini daju estetski i atraktivan izgled. Pri tome je jedan od najvažnijih zahtjeva postizanje maksimalne trajnosti i pouzdanosti prevučenog proizvoda, a to se postiže osiguranjem dovoljne postojanosti same prevlake [4, 5].

Glavna podjela prevlaka je prema karakteru i podrijetlu tvari koja čini povezani sloj (opnu) na površini podloge (supstrat) prema slici 1.. Dakle, metalne prevlake su uvijek anorganskog podrijetla, dok nemetalne prevlake mogu biti anorganske i organske.



**Slika 1. Podjela prevlaka [4]**

Oblogama se nazivaju prevlake većih debljina, a tanke prevlake se nazivaju filmovima (opnama). Svaka prevlaka mora štiti podlogu, ali glavna svrha prevlačenja može biti različita, zato se prema tom kriteriju razlikuju:

- zaštitne prevlake u užem smislu riječi (npr. antikorozijske prevlake, oksidi, fosfati, kromati, emajl, boje, lakovi, plastične mase, guma, bitumen, katranske smole, prevlake za zaštitu od mehaničkog trošenja...),
- dekorativne prevlake koje daju estetski dojam (npr. galvanski nikel i dekorativni krom, anodne prevlake na aluminiju, emajli, lakovi, boje, plastične mase...),
- funkcionalne prevlake kojima se postižu određena svojstva površine bitna za primjenu proizvoda (npr. prevlake za električnu ili toplinsku izolaciju, prevlake olova za zaštitu od radijacije, prevlake srebra nikla i aluminijske za refleksiju svjetla, različite crne prevlake za apsorpciju svjetla, antistatičke prevlake...),

- reparaturne prevlake kojima se popravljaju proizvodi premalih dimenzija ili regeneriraju istrošeni ili oštećeni proizvodi (npr. prevlake tvrdog kroma, monela nanesenog navarivanjem, prevlake dobivene metalizacijom prskanjem tj. toplinskim naštrcavanjem, organske prevlake za popunjavanje poput kitova te epoksidnih i poliesterskih smola itd.) [4, 5].

Kvaliteta prevlaka ovisi prvenstveno o njezinoj debljini i kompaktnosti, o čvrstoći prijanjanja (prionljivosti, adheziji) na podlogu, o stupnju hrapavosti podloge i prevlake itd. Također je vrlo važno odabrati i postupak tj. tehnologiju nanošenja koji se sastoji od pripreme podloge (predobrade osnovnog materijala), od prevlačenja u užem smislu i od eventualne naknadne obrade prevlaka. Kod izbora postupka se treba voditi računa i o veličini i obliku proizvoda koji se prevlači. Također, sve je teže odabrati najprikladniji postupak za nanošenje slojeva ili modificiranja površina zbog sve većeg broja različitih postupaka. Kod problema s trošenjem, najprije je potrebno analizirati tribosustav te razmotriti slične slučajeve trošenja iz prakse kako bi se ograničili predvidivi mehanizmi i tipovi trošenja i prema njima zatim odabrao najpogodniji postupak za stvaranje zaštitnih slojeva otpornih na trošenje ili pak koroziju, ovisno o potrebi [4, 5].

### ***1.2.1. Nanošenje nemetalnih prevlaka***

Nemetalne prevlake mogu biti anorganske i organske. Nemetalne anorganske prevlake se nanose fizikalnim ili kemijskim postupcima. Fizikalno se takve prevlake obično nanose izvana, tj. bez sudjelovanja podloge. Kemijski se prevlake najčešće oblikuju procesom u kojem sudjeluje površina podloge (konverzijske prevlake). Među fizikalnim postupcima najvažniji su emajliranje i vruće prskanje (toplinsko naštrcavanje), a u kemijske i elektrolitične postupke spadaju bruniranje, anodizacija (eloksiranje Al), fosfatiranje, kromatiranje itd. Nemetalnim organskim prevlakama se smatraju sve one koje čini kompaktnima organska tvar tvorbom opne. Takvi se slojevi dobiju nanošenjem organskih premaznih sredstava (bojenjem i lakiranjem), uobičajenim podmazivanjem, plastifikacijom (prevlačenjem plastičnim masama), gumiranjem i bitumenizacijom [4, 5].

### 1.2.2. Nanošenje metalnih prevlaka

Metalne prevlake su uvijek anorganske, a ovisno o tome odvijaju li se pri prevlačenju samo fizikalne promjene ili su prevlake produkt kemijskih reakcija ti slojevi se najčešće nanose fizikalnim ili kemijskim postupcima metalizacije ili platiranja.

Jedna od važnijih metoda metalizacije je vruće uranjanje kod kojeg se osnovni materijal umače u rastaljeni materijal, a sloj prevlake na površini nastaje zbog kvašenja te se tako dobiva sloj skrućenog metala koji obavezno mora imati puno niže talište od osnovnog materijala. Kako bi se osiguralo potpuno kvašenje obratka talinom potrebno je pripremiti podlogu završnim čišćenjem te tako osigurati zadovoljavajuću čistoću njezine površine [4].

Sljedeća metoda koja se vrlo često koristi za nanošenje metalnih slojeva jest vruće prskanje, tj. toplinsko naštrecavanje kod kojeg mlaz kapljica, stvoren brzom strujom zraka ili drugog plina, udara o površinu podloge osnovnog materijala, pri čemu se kapljice spljošte, naglo hlade i skrućuju u kružne pločice malog promjera [6].

Od ostalih metoda nanošenja metalnih prevlaka valja spomenuti i postupak platiranja kojeg karakterizira primjena plastične (trajne) deformacije pri metalizaciji metala. Ovaj postupak se provodi visokim tlakom koji uzrokuje tečenje metala prevlake (obloge), a eventualno i podloge (jezgre). Obično se ovom metodom nanose postojaniji metali na jeftinije i/ili čvršće podloge pa se platirani materijali često nazivaju bimetalima ili obučenim metalima. Platiranje se najčešće provodi hladnim ili vrućim valjanjem, odnosno provlačenjem te vrućim prešanjem.

Metalne prevlake se još mogu nanositi sljedećim postupcima:

- nataljivanjem i navarivanjem,
- lemljenjem i lijepljenjem,
- difuzijskom metalizacijom,
- metalizacijom bez struje (ionska izmjena, metalizacija redukcijom),
- metalizacija napanjanjem (PVD i CVD postupak, vakuumska metalizacija),
- galvanotehnikom i dr. [4, 5].

### 1.2.3. Pregled postupaka prevlačenja

Pregled najvažnijih postupaka prevlačenja materijala nanošenjem nemetalnih (anorganskih i organskih) i metalnih (anorganskih) prevlaka je dan u tablici 2.:

**Tablica 2. Pregled postupaka prevlačenja [4]**

Vrsta prevlake	Postupak prevlačenja/modificiranja površine
Nemetalne anorganske prevlake	<ul style="list-style-type: none"> <li>• emajliranje</li> <li>• vruće prskanje (toplinsko naštrecavanje)</li> <li>• bruniranje</li> <li>• anodizacija (eloksiranje)</li> <li>• fosfatiranje</li> <li>• kromatiranje</li> <li>• patiniranje itd.</li> </ul>
Nemetalne organske prevlake	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bojanje i lakiranje</li> <li>• plastifikacija</li> <li>• gumiranje</li> <li>• bitumenizacija</li> <li>• konzervacija itd.</li> </ul>
Metalne (anorganske) prevlake	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vruće uranjanje</li> <li>• toplinsko naštrecavanje (vruće prskanje ili šopiranje)</li> <li>• platiranje plastičnom deformacijom</li> <li>• nataljivanje i navarivanje</li> <li>• lemljenje i lijepljenje</li> <li>• difuzijska metalizacija</li> <li>• neparivanje</li> <li>• galvanotehnika</li> <li>• ionska zamjena (cementacija)</li> <li>• katalitička redukcija itd.</li> </ul>

U ovom radu se detaljnije obrađuje način zaštite materijala koji karakterizira odvajanje osnovnog materijala od okoline ili medija zaštitnim slojem i to određenim postupcima toplinskog naštrecavanja.

### 1.3. Toplinsko naštrcavanje

Toplinsko naštrcavanje je tehnologija fizikalne metalizacije kod koje se na površinu obratka nanose kapljice rastaljenog metala ili nemetala za koje je bitno da se taljenjem ne raspadaju. Kapljice se dobivaju taljenjem dodataka za naštrcavanje koji su uglavnom u obliku žice ili praška, a rastaljuju se u ili izvan uređaja za naštrcavanje te se pomoću brze struje zraka ili drugog plina nanose na podlogu osnovnog materijala (obratka) gdje se prijanjaju na nju tzv. sidrenjem te ne dolazi do taljenja površine obratka. Kapljice se udarajući u podlogu spljošte, naglo hlade te skrućuju u sitne kružne pločice promjera do 0,1 mm, debljine do 0,05 mm. Često se ova tehnologija još naziva i vrućim prskanjem ili šopiranjem prema izumitelju M. U. Schoopu [4].

Ova tehnologija je u svijetu prisutna već cijelo stoljeće te se s vremenom proširila njezina primjena. U prvom redu ova tehnologija je bila namijenjena poboljšanju triboloških svojstava i zaštiti od korozije te je u ovom području još uvijek najveći dio primjene. U današnje vrijeme primjena se proširuje na poboljšanje električnih, elektroničkih, optičkih, kemijskih i magnetnih svojstava naštrcanog materijala. Također, treba spomenuti i važnu primjenu kod zaštite od visokih temperatura i dobivanja estetskih i dekorativnih svojstava površine.

Tehnologija toplinskog naštrcavanja se intenzivno primjenjuje u gotovo svima industrijskim područjima od kojih posebno treba spomenuti: zrakoplovnu industriju, termoelektrane i hidroelektrane, automobilsku industriju, procesnu industriju, petrokemijsku industriju, industriju stakla, papirnu i tiskarsku industriju te biotehnologiju [5, 6].

Toplinski naštrcani slojevi se razlikuju po strukturi, mehanizmu vezanja te prema mogućnosti naknadne obrade u odnosu na slojeve nanešene drugim postupcima. Budući da su u toplinski naštrcanim slojevima čestice povezane bez pravilnog reda javlja se poroznost, a stupanj poroznosti ovisi o postupku naštrcavanja te korištenim materijalima. Volumni udio pora se najčešće kreće između 0,5 % i 20 %.

Naštrcani slojevi poboljšavaju površinska svojstva osnovnog materijala, a ti slojevi imaju i bitno drukčija svojstva od primijenjenog dodatnog materijala. Kako su slojevi puno manje debljine u usporedbi s osnovnim materijalom na koji se nanose, njihovom primjenom se mijenjaju isključivo površinska svojstva naštrcanog dijela, a sam dio mora biti sposoban podnijeti narinuta opterećenja u eksploataciji.

Debljine slojeva se najčešće kreću već od 10  $\mu\text{m}$  pa do nekoliko milimetara, a čvrstoća prijanjanja sloja može iznositi često i više od 100 MPa. Doduše, naštrcani slojevi su heterogeni i anizotropni pa se uvjetno mogu primijeniti kod koncentriranog opterećenja u točki ili liniji.

Ovisno o vrsti sloja, njegovoj strukturi i postupku nanošenja sloja, toplinski naštrcani slojevi mogu ispuniti sljedeće funkcije:

- povišenje otpornosti na trošenje (posebice kod mehanizama abrazije i adhezije tj. kod različitih pojava klizanja, brazdanja, djelovanja mlaza i erozije zbog djelovanja fluida),
- zaštita od korozije, visokotemperaturne oksidacije te zaštite od agresivnih medija,
- biokompatibilnost,
- električna vodljivost ili električna izolacija,
- toplinska izolacija,
- povoljno ponašanje pri uhodavanju (npr. kod kompresora i turbina),
- odnošenje materijala (repariranje istrošenih dijelova).

Od metalnih materijala toplinski se prevlače svi tehnički važni materijali od kojih valja posebno spomenuti čelike, željezne lijevove, aluminij i Al-legure, titan i titanove legure, nikal i niklove legure te materijale na bazi bakra i kobalta. Također, često se prevlače i keramički proizvodi, a uvjetno i plastika, staklo i drvo pri čemu se ograničenja odnose na toplinsko opterećenje osnovnog materijala i vezu između sloja i osnovnog materijala.

Kao materijali prevlaka tj. dodaci za naštrcavanje mogu se koristiti svi metali, ali i nemetali koji imaju tekuću rastaljenu fazu pri normalnim uvjetima tlaka dok se materijali koji nemaju tekuće rastaljene faze (npr. SiC) mogu nanositi u prikladnoj kombinaciji s drugim materijalima koji imaju tekuću rastaljenu fazu te stvaraju matricu. Neovisno o postupku naštrcavanja ponajprije se dodatni materijal za naštrcavanje koristi u obliku praha i žice. Prema DIN 352999 prahovi za naštrcavanje se ovisno o njihovom kemijskom sastavu mogu podijeliti prema tablici 3., a može se koristiti i kombinacija tj. mješavina različitih prahova [5, 6, 7].



Tablica 3. Prašci za naštrcavanje [5]

Kemijski sastav	Primjeri
Čisti metali	Cr, W, Ni, Al, Cu, Mo
Legure	Čelici, NiCr, NiAl, CoCrW, CuAl, MCrAlY
Metalni karbidi	WC, TiC, WC-Co, Cr <sub>2</sub> C <sub>3</sub> -NiCr, WC-CoCr
Samotekuće legure	NiCrBSi
Keramika i oksidi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>3</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Organski materijali	

Kod postupaka sa žicom kao dodatnim materijalom se najčešće koriste masivne žice te punjene žice. Podjela žica je u skladu sa DIN 8566 (Dio 1-3), a žice mogu biti od najrazličitijih materijala (npr. čelici, Al i njegove legure, Cu i Cu-legure, Zn i Zn-legure, Ni i Ni-legure, molibden...).

Za kvalitetno naštrcavanje tj. dobro prijanjanje naštrcanog sloja je potrebna temeljita i ispravna priprema površine. Određena mikrohrapavost podloge se postiže predobradom (sačmarenje, električno ohrapavljenje, tokarenje, glodanje itd.), a prema potrebi je potrebno i odmašćivanje tj. uklanjanje nečistoća od ulja, masti i sl. [5].

Naknadna obrada nanesenih slojeva može biti mehanička ili toplinska kako bi se postigla manja hrapavost i poroznost, povećala čvrstoća prijanjanja te postigla dodatna zaštita od korozije. Kod ovih naknadnih obrada je najčešće riječ o brušenju, poliranju, finom tokarenju i glodanju za smanjivanje hrapavosti, a kao toplinske obrade naštrcanih slojeva valja spomenuti pretaljivanje i difuzijsko žarenje kojima se postiže bolja zaštita od korozije ili se povećava adhezija između podloge i nanesene prevlake. Ove toplinske obrade se provode samo kod onih osnovnih materijala koji podržavaju spomenute postupke toplinske obradbe [4].

Primjena postupaka toplinskog naštrcavanja ima niz prednosti u odnosu na ostale brojne postupke kojima se na podlogu nanose zaštitni metalni spojevi. Neke od najvažnijih prednosti su:

- mogućnost korištenja najrazličitijih varijacija osnovnog materijala i materijala slojeva,

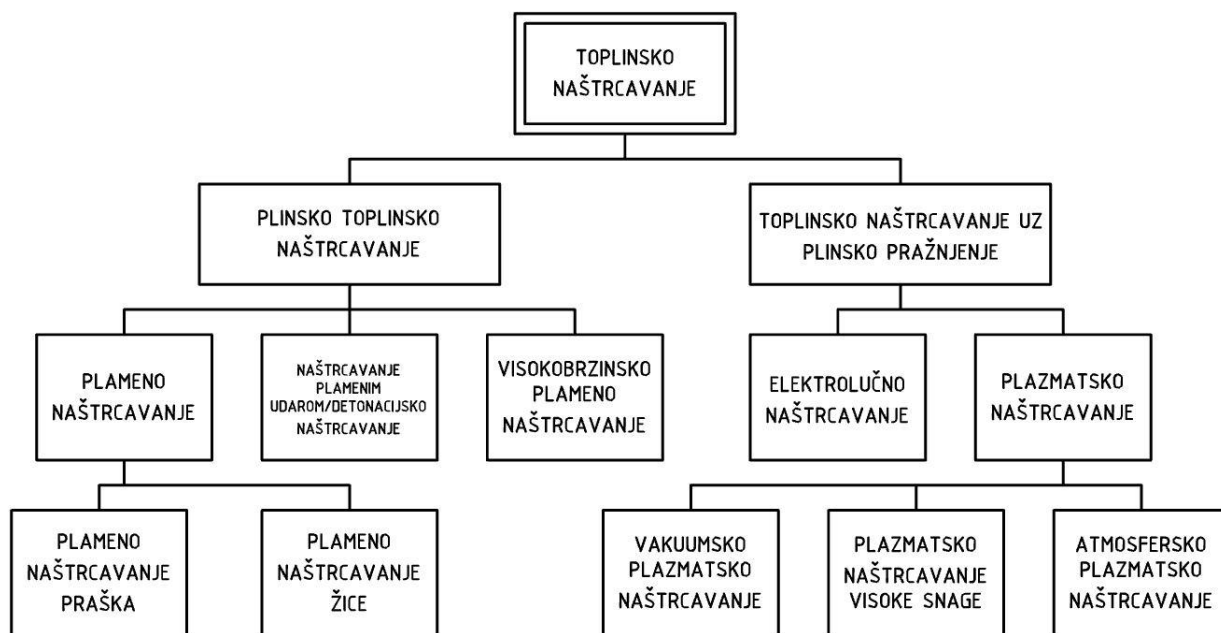
- mogućnost postizanja veće prionljivosti sloja u odnosu na druge postupke,
- mogućnost gotovo trenutne upotrebe naštrcanog proizvoda zbog izostanka vremena potrebnog za sušenje ili skrućivanje,
- nanošenje na mjestu eksploatacije dijelova kod nekih postupaka,
- dosta veliki raspon okolišne temperature i vlage kod pojedinih postupaka,
- mogućnost naštrcavanja najrazličitijih veličina podloge odnosno radnog komada,
- naštrcani sloj može koristiti kao temelj za naknadne postupke (npr. nanošenje premaza bojanjem i sl.).

Dakle, zbog prije navedenih razloga, toplinski naštrcani spojevi koji spadaju u grupu anodnih spojeva imaju i važnu primjenu kod zaštite konstrukcijskih metala (ponajprije čelika) od korozije [4, 5].

### ***1.3.1. Podjela postupaka toplinskog naštrcavanja***

Postupci toplinskog naštrcavanja se mogu podijeliti:

- prema vrsti dodatka za naštrcavanje,
- prema vrsti provođenja postupka i
- prema vrsti prenošenja energije na slici 2. - (DIN 32530) [5].



**Slika 2. Podjela postupaka toplinskog naštrcavanja prema vrsti nositelja energije (DIN 32539) [5]**

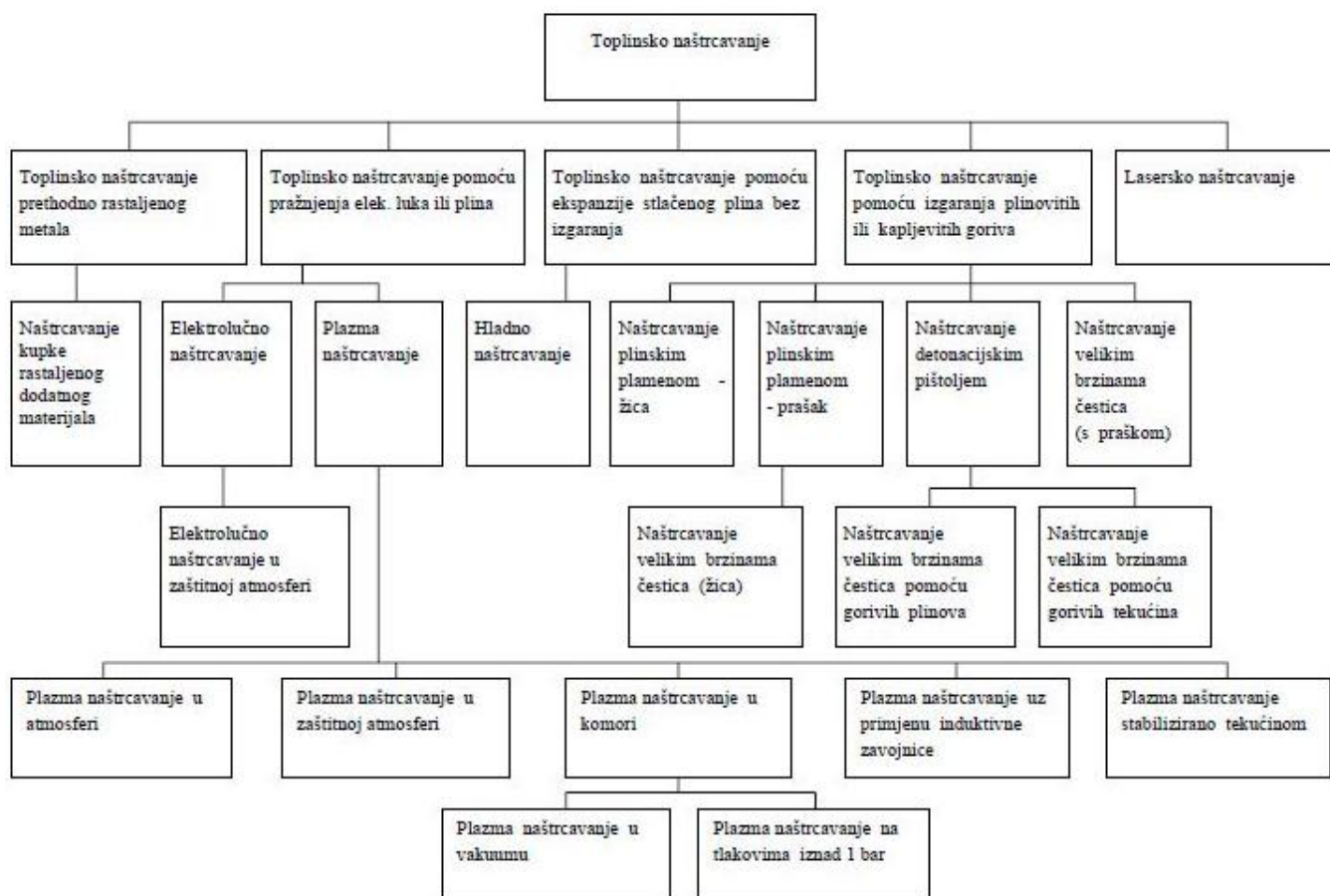
Također, podjela prema [7] dijeli tehnologiju toplinskog naštrcavanja na 5 glavnih skupina postupaka koji se razlikuju po izvoru energije i pri tome postignutoj toplinskoj i kinetičkoj energiji naštrcanih čestica. Ova podjela je prikazana na slici 3..

Najveće značenje tj. najširu primjenu danas imaju plameno, elektrolučno, plazmatško te visokobrzinsko plameno naštrcavanje (HVOF – High Velocity Oxy-Fuel).

Plameno i elektrolučno naštrcavanje se najšire primjenjuju zbog ekonomičnosti i jednostavnosti samih postupaka dok se plazmatško naštrcavanje i HVOF naštrcavanje koriste kod najzahtjevnijih slučajeva površinske zaštite materijala.

Odabir odgovarajućeg postupka toplinskog naštrcavanja ovisi o:

- zahtjevanim karakteristikama slojeva (gustoća, prianjanje, debljina sloja, tvrdoća itd.),
- dijelovima koji će se prevlačiti (geometrija, površina koja se prevlači, troškovi, osnovni materijal),
- rubnim uvjetima,
- mjestu prevlačenja (u radionici ili na licu mjesta),
- troškovima itd. [5].

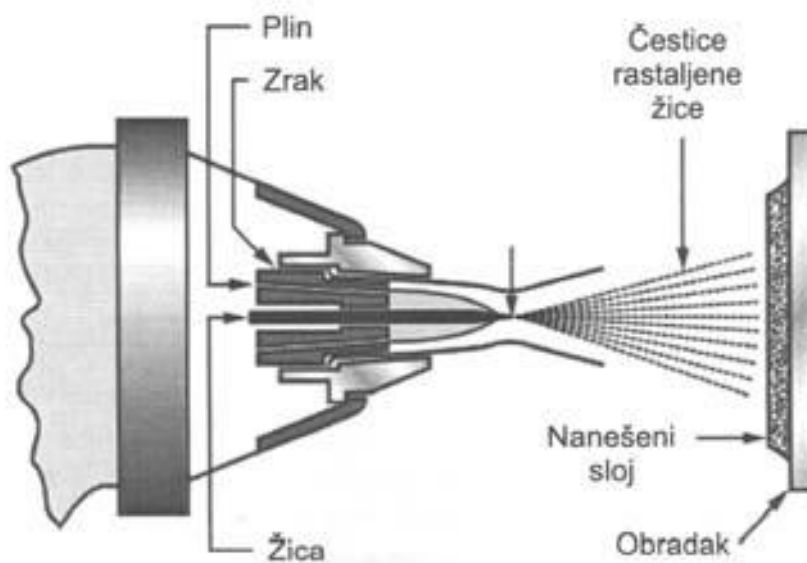


**Slika 3. Podjela postupaka toplinskog naštrecavanja [7]**

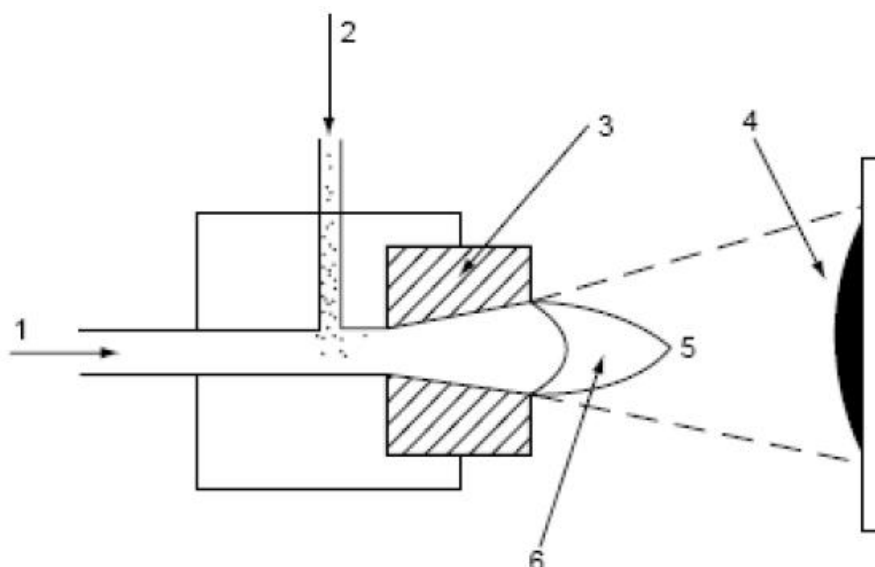
### 1.3.1.1. Plameno naštrecavanje

Slika 4. i slika 5. prikazuju shemu postupka plamenog naštrecavanja pomoću žice i pomoću praha. Kod plamenog naštrecavanja se dodatni materijal rastaljuje i nanosi na površinu osnovnog materijala pomoću ekspanzije plamena gorivog plina i kisika ili pomoću dodatnih plinova. Gorivi plinovi koji se koriste su najčešće acetilen, propan i vodik.

Primjena ovog postupka je relativno ograničena jer se dobiva manje-više slojevita struktura s izraženom poroznošću, ali je ujedno riječ o jednostavnom i jeftinom procesu toplinskog naštrecavanja [5].



**Slika 4. Shema postupka plamenog naštrcavanja pomoću žice [5], [8]**



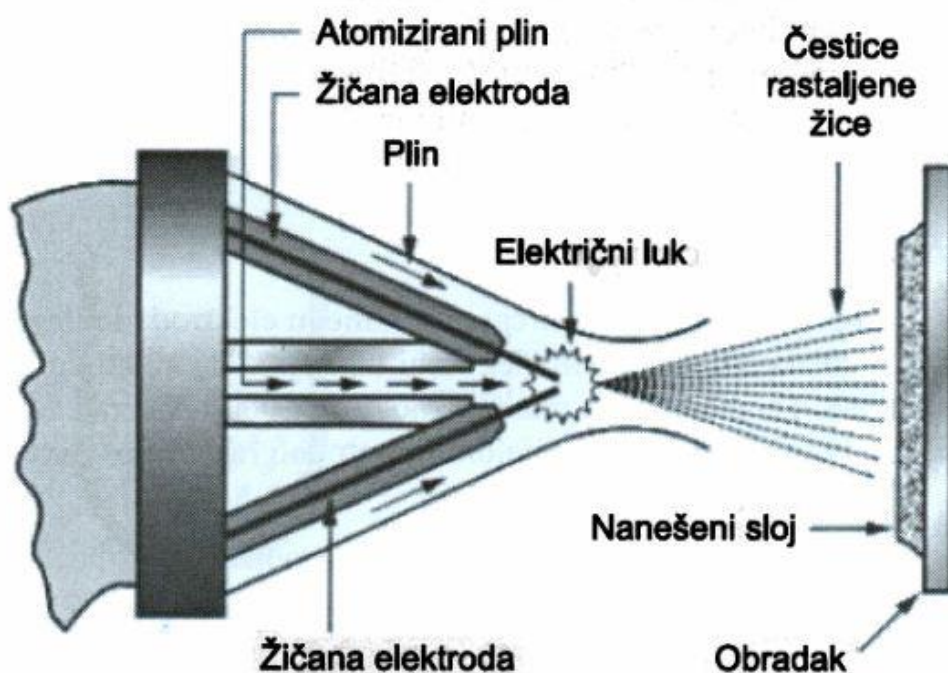
**Slika 5. Princip plamenog naštrcavanja praškom [7]**

**(1) gorivi plin i plin koji podržava gorenje, (2) dobava praška,  
(3) tijelo pištolja, (4) naštrcani sloj, (5) mlaz čestica, (6) plinski plamen.**

### 1.3.1.2. Elektrolučno naštrcavanje

Električni luk je izvor topline kod elektrolučnog naštrcavanja, a ostvaruje se između dvije žice za naštrcavanje koje su spojene s izvorom istosmjernje struje. Toplina dobivena električnim lukom rastaljuje krajeve žica, a kapljice rastaljenog materijala se zatim pomoću atomiziranog

plina ubrzavaju prema površini naštrcavanja. Važno je kontinuirano dovoditi obje žice kako bi se postigao stabilni električni luk, a za ovaj postupak toplinskog naštrcavanja kao dodatni materijali se koriste samo električni vodljivi materijali. Postoji mogućnost naštrcavanja i nevodljivih materijala, ali je pritom potrebno koristiti punjene žice kod kojih se unutar plašta žice koji mora biti od vodljivog materijala nalazi električki nevodljivi materijal (npr. oksidna keramika). Shemu postupka elektrolučnog naštrcavanja prikazuje slika 6..



**Slika 6.** Shema postupka elektrolučnog naštrcavanja pomoću žice [5]

### 1.3.1.3. Naštrcavanje plazmom (plazmatsko naštrcavanje)

Kod plazmatskog naštrcavanja je također električni luk izvor topline koji se uspostavlja između elektrode i mlaznice. Mlaznica ima zadaću anode, a prolaskom plazmatskog plina kroz električni luk se plin ionizira te se postižu vrlo visoke temperature (čak do 20000 K). Dodatni materijal u obliku praška se ubrizgava u plazmu gdje se djelomično ili potpuno rastaljuje [5].

Postoji nekoliko vrsta plazmatskog naštrcavanja ovisno o tome u kakvoj se atmosferi odvija naštrcavanje. Atmosfera može biti normalna, zaštitna ili postoji mogućnost naštrcavanja u atmosferi smanjenog okolnog tlaka. Kod ovakvih postupaka najčešće je riječ o naštrcavanju materijala s dodatkom za naštrcavanje od materijala sklonih oksidaciji i reaktivnih materijala, a riječ je o postupcima atmosferskog plazmatskog naštrcavanja (APS – Air Plasma Spraying) i vakuumsko-plazmatskog naštrcavanja ( LPPS – Low Pressure Plasma Spraying i VPS – Vacuum Plasma Spraying) [7].

Kao plazmatski plinovi se upotrebljavaju argon, helij, vodik, dušik ili njihove mješavine.

#### *1.3.1.4. Visokobrzinsko plameno naštrcavanje (HVOF)*

Visokobrzinsko plameno naštrcavanje (HVOF – High Velocity Oxy-Fuel Flame) se prema vrsti nositelja energije (DIN 32530) dijeli u zasebnu grupu postupaka. Iako HVOF spada u plamena naštrcavanja, bitno se ovaj postupak razlikuje u odnosu na obična plamena naštrcavanja zbog pojavljivanja puno većih brzina plamena i čestica. Detaljnije se razrađuje ovaj postupak u poglavlju 2.2 HVOF (High Velocity Oxy – Fuel) naštrcavanje.

## 2. APS I HVOF POSTUPCI TOPLINSKOG NAŠTRCAVANJA

Atmosfersko plazmatsko naštrcavanje (APS) i visokobrzinsko plameno naštrcavanje (HVOF) se koriste kod prevlačenja materijala koji imaju najveće zahtjeve u vidu otpornosti na trošenje, otpornosti na visoke temperature i zaštite od korozije. Ovi postupci se odabiru kad je potrebna bolja gustoća, tvrdoća, debljina i prijanjanje sloja u odnosu na mogućnosti plamenog i elektrolučnog naštrcavanja.

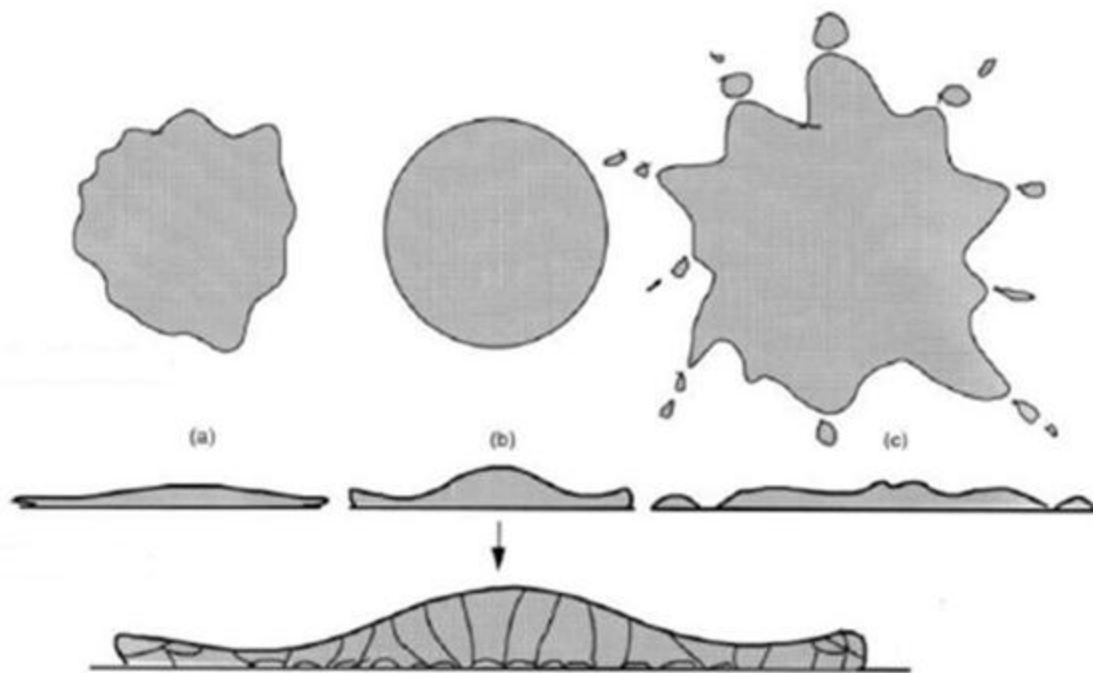
Također, APS i HVOF postupci toplinskog naštrcavanja se međusobno nadopunjuju kad je u pitanju područje upotrebe kod najzahtjevnijih primjena u eksploataciji.

### 2.1. APS (Air Plasma Spray) naštrcavanje

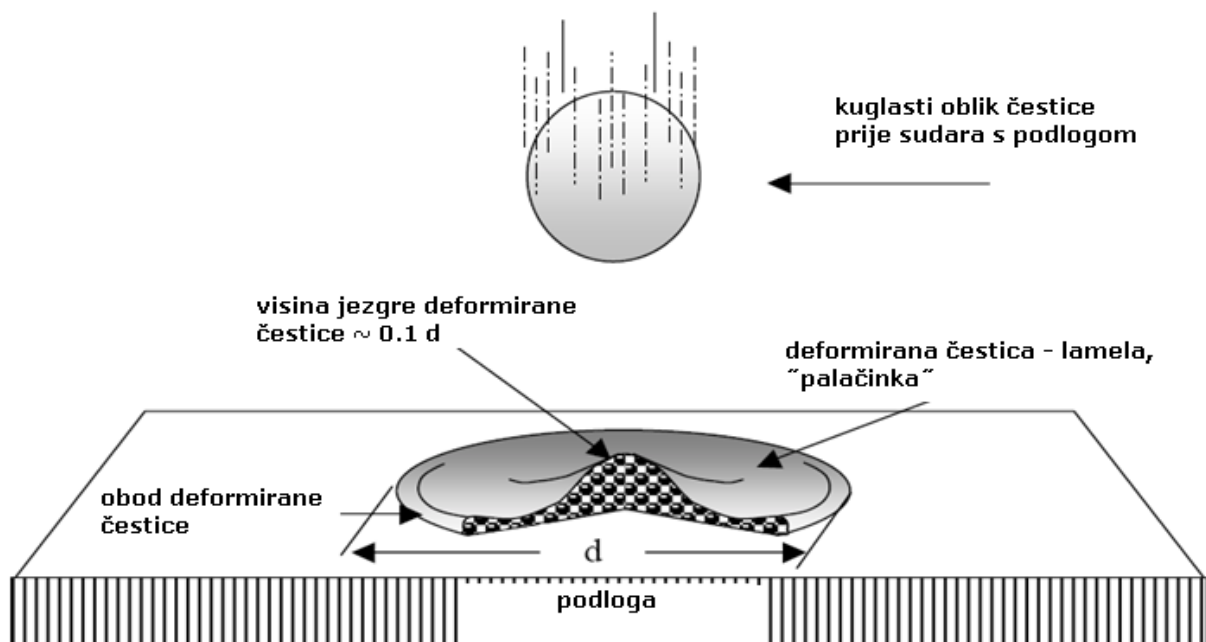
Najrašireniji postupak plazmatskog naštrcavanja je atmosfersko plazmatsko naštrcavanje (APS – Air Plasma Spray ili Atmospheric Plasma Spray) koje karakterizira naštrcavanje u normalnoj atmosferi. Atmosferskim plazmatskim naštrcavanjem je moguće nanositi jako široku paletu materijala uključujući keramiku koja zahtjeva relativno visoke temperature. Odlika ovog naštrcavanja je i mogućnost postizanja velike količine nanošenja materijala prevlake (i do nekoliko kilograma na sat), a također je riječ o najjednostavnijem postupku plazmatskog naštrcavanja.

Kod APS-a se kao dodatak za naštrcavanje koriste najčešće prahovi kod kojih se promjer čestica uglavnom kreće između 10  $\mu\text{m}$  i 100  $\mu\text{m}$ , a udaranjem tih čestica o podlogu [slika 7.] dobivaju se lamele debljine nekoliko mikrometara i promjera od nekoliko desetina mikrometara pa do stotinu mikrometara [slika 8. i slika 9.]. Skrućivanjem se dobiva i karakteristična mikrostruktura sloja kod koje imamo lamele različite veličine, nerastaljene čestice uklopljene u nanešeni sloj, okside, sitne pukotine, praznine i dr. [slika 10.]. Brzina čestica koje se nanose na supstrat se kreću od stotinu pa do nekoliko stotina metara u sekundi, a kod udaranja u površinu i skrućivanja čestica dolazi do naglog hlađenja pri čemu se toplina predaje radnom komadu i okolini. Minimalna debljina prevlake je najčešće oko 50  $\mu\text{m}$  kako bi se dobio konzistentan površinski sloj [9].

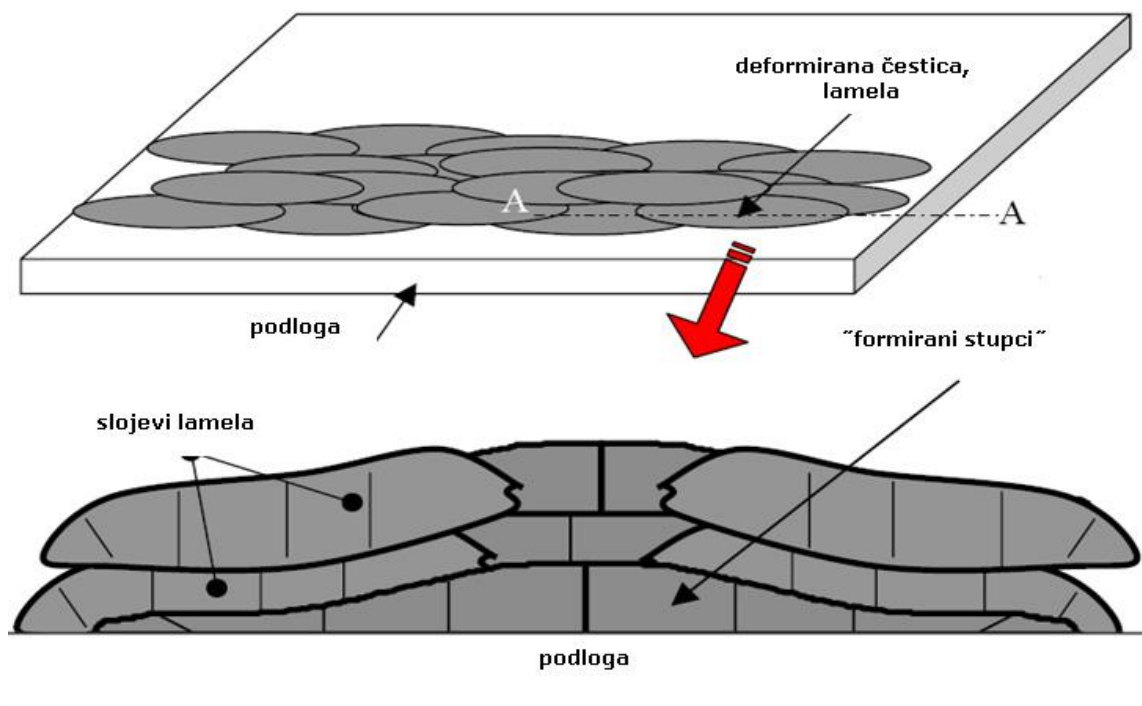




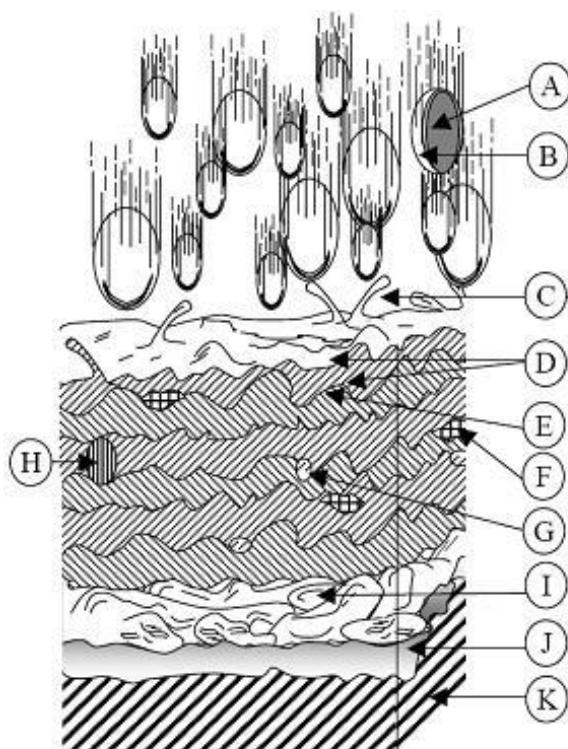
Slika 7. Prikaz deformiranja čestice praha pri udaru o površinu podloge [7]



Slika 8. Shematski prikaz leta rastaljene čestice i njenog sudara s podlogom [7]



Slika 9. Shema izgleda naštrcanog sloja i njegovog poprečnog presjeka [7]

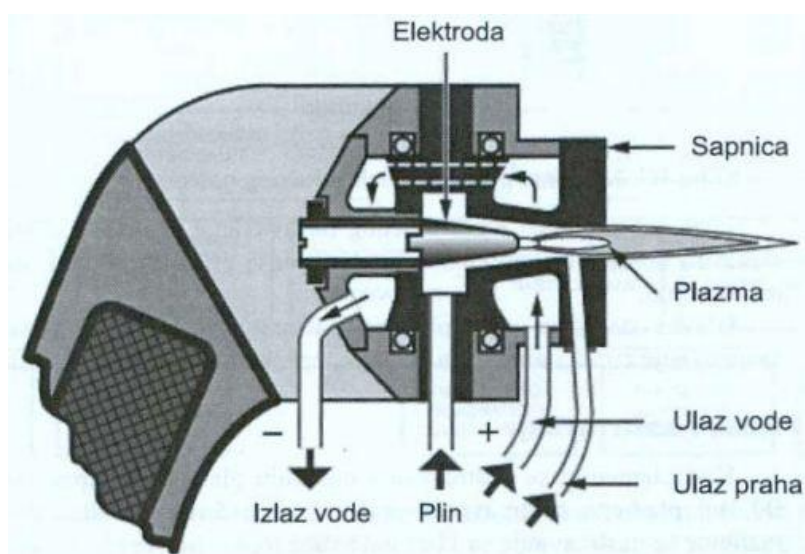


Slika 10. Izgled složene strukture tipičnog naštrcanog sloja [7]

- A - poprečni presjek naštrcavane čestice, unutrašnjost je u rastaljenom stanju.
- B - oksidni sloj formiran u fazi leta,
- C - udar čestice u podlogu,
- D - formiranje oksida na površini,
- E - interlaminarna adhezija dva sloja,
- F - legiranje dviju čestica,
- G - pore ili šupljine formirane zarobljenim plinom,
- H - nerastaljene čestice,
- I - individualna lamela,
- J - sloj koji otpušta elektrone,
- K - podloga.

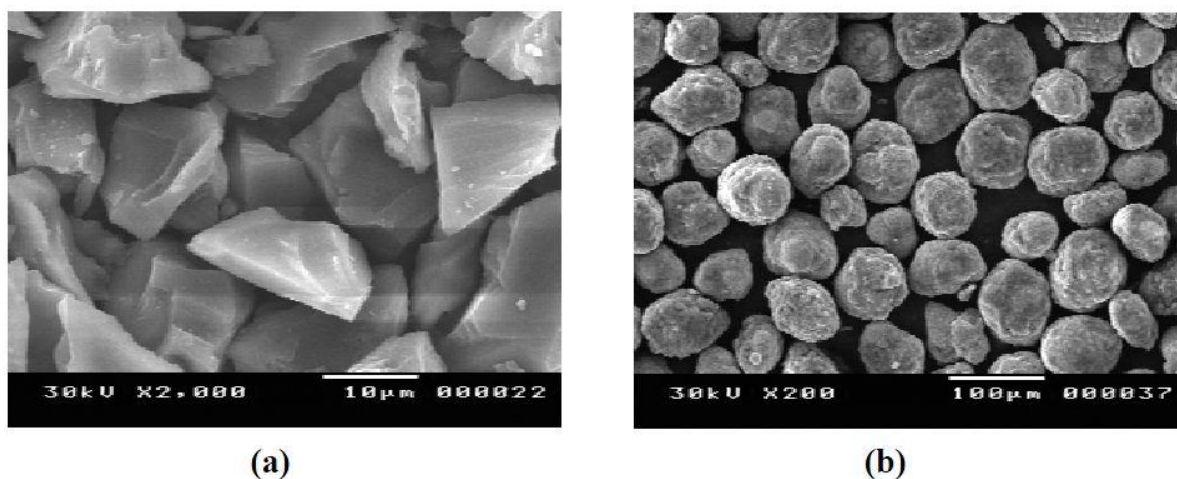
### 2.1.1. Opis tehnologije APS naštrcavanja

Mlaz plazme se dobiva propuštanjem plazmatskog plina kroz električni luk dobiven strujom uglavnom pomoću istosmjernih (DC) uređaja te dovodi do pištolja hlađenog vodom koji se sastoji od elektrode koja ima ulogu katode i mlaznice (sapnice) koja ima ulogu anode [slika 11.]. Elektroda je od wolframa s malim udjelom torija (do 2%) te ima oblik šipke, a njezin vrh je konusni i zaobljen. Mlaznica (anoda) je najčešće od bakrene legure.



Slika 11. Shema plazmatskog naštrcavanja [5]

Najčešće se koriste plinovi s velikom atomskom masom (argon, dušik) katkad u mješavini s plinovima veće toplinske provodnosti (vodik, helij) ili viskoznosti (helij) [9]. Često se za inicijaciju električnog luka koristi argon koji se vrlo lako ionizira da bi mu se zatim dodao dodatni plin poput vodika ( $H_2$ ) koji se raspada na visokim temperaturama prije nego se ionizira pa se zbog toga dobije veća energija plazme (za određenu temperaturu) nego kod samog Ar ili He. Dobivenu mješavinu elektrona, iona i neutralnih čestica koju nazivamo plazma karakterizira ekstremno visoka temperatura (10000 K – 30000 K) i visoka količina topline. Ovaj nagli rast temperature i energije ima za uzrok izlaz plazme iz mlaznice vrlo velikom brzinom. Pri samom izlazu plazme iz mlaznice (sapnice) u plazmu se ubrizgava prah [slika 12.] pomoću injektora. Injektor praha je najčešće jednostavna cijev unutarnjeg promjera između 1,2 mm i 2 mm. Injektor praha čak i kad je hlađen vodom ne smije biti pozicioniran preblizu mlazu plazme kako ne bi došlo do začepljenja [10].



**Slika 12. Primjer praha za naštrcavanje (SEM) [14]**

- a)  $Al_2O_3$
- b) Ni – 5% Al

Čestice praha se rastaljuju i velikom brzinom udaraju o površinu velikom kinetičkom energijom te formiraju laminarnu prevlaku na površini na koju se nanose. Stanje čestica praha za naštrcavanje (temperatura, brzina i veličina čestica) i podloge (temperatura, hrapavost, kemijski sastav...) određuju samo rasprostiranje i skrućivanje pojedinih čestica. Kako bi se poboljšala mehanička adhezija prevlake o površinu i smanjila tlačna naprezanja podloge,

podloga mora biti ohrapavljena da se dobiju vrijednosti površinske hrapavosti reda veličine od  $10 \pm 2 \mu\text{m}$  [11].

Razumijevanje interakcije plazme i čestica praha je ključno za kontroliranje procesa naštrcavanja, njegovu pouzdanost i ponovljivost. Međutim, ovo je kompleksno pitanje zbog različitih veličina čestica ( $5 \mu\text{m} - 120 \mu\text{m}$ ), različitih brzina ( $50 \text{ m/s} - 500 \text{ m/s}$ ) i temperatura ( $1200 \text{ K} - 4500 \text{ K}$ ) čestica te volumetrijskog kontinuiteta emisije plazme ( $10^8 \text{ W/m}^3 - 10^9 \text{ W/m}^3$ ) [10].

### 2.1.2. Tehnološki parametri

Konvencionalna svojstva prevlake ovise o tri podsustava koja operater može podešavati:

- formiranje plazme i njezina interakcija s okolinom,
- prah i njegovo ubrizgavanje s rezultirajućim parametrima čestica (temperatura, promjer, brzina, protok) pri udaru o površinu i
- formiranje slojeva, lamela i formiranje prevlake [10].

Postoje mnogi tehnološki parametri naštrcavanja koji utječu na svojstva naštrcanog sloja pomoću atmosferskog plazmatskog naštrcavanja, a najčešći kontrolni parametri su:

- kemijski sastav, fazna struktura i veličina kristala tj. čestica praha,
- temperatura i priprema podloge,
- plazmatski plin,
- plazmeni pištolj,
- napon,
- struja,
- doziranje praha,
- kut naštrcavanja te
- udaljenost sapnice od radnog komada [11].

Ove parametre je potrebno optimizirati kako bi se dobila što bolja svojstva naštrcane prevlake.

Karakteristike konvencionalnog električnog luka su te da se radi o niskom naponu (često oko 70 V), ali s relativno visokim jakostima struje (400 A – 1000 A) kod kojeg se dobiva mlaz plazme sa specifičnom entalpijom između 5 MJ/kg i 35 MJ/kg. Pri izlazu iz mlaznice temperatura plina se kreće između 10.000 K – 12.000 K, dok mu je brzina između 400 m/s i 2600 m/s. Treba podesiti protok plazmenog plina kako bi se dobio optimalni moment čestica praha. Prašak se ubrizgava radijalno u odnosu na os mlaznice i to nekoliko milimetra od izlaza iz mlaznice. Ubrizgane čestice praha nošene plinom sadrže oko  $10^7$  –  $10^8$  čestica po sekundi, a u plazmi se zadržavaju od 0,1 do nekoliko milisekundi.

Taljenje čestica praha ovisno o rasponu veličine čestica ovisi i o vremenu zadržavanja čestice u plazmi koja je naravno povezana s njihovom brzinom, a duljina plazmenog mlaza je limitirana (oko 3 cm – 20 cm ovisno o okolnom tlaku i značajkama postupka), a ovisi i o sastavu plazmenog plina. Ova dva parametra koja kontroliraju taljenje čestica su ustvari povezana sa izborom pištolja za naštrcavanje.

Smanjenjem veličine tj. promjera čestica praha potrebno je drastično povećati brzinu nosećeg plina pa kod čestica promjera manjeg od 5  $\mu\text{m}$  do 10  $\mu\text{m}$  plin počinje jako remetiti mlaz plazme. Brzine plazme kod istosmjernih DC uređaja se mjere nenametljivim optičkim metodama.

Potrebno je pronaći najbolji kompromis između navedenih parametara kako bi došli do potpuno rastaljenih čestica praha koje bi udarale u površinu dovoljno velikim brzinama. Iako je raspon izbora vrijednosti prilično uzak najvažniji parametri koje treba odabrati su: tip pištolja, sastav i maseni protok plinova, električni parametri (struja i napon) te način i količinu ubrizgavanja praha [10].

Prionljivost (adhezija) prevlake jako ovisi i o pripremi podloge, temperaturi predgrijavanja podloge, morfologiji i sastavu te oksidima koji se nalaze na površini metalnog supstrata.

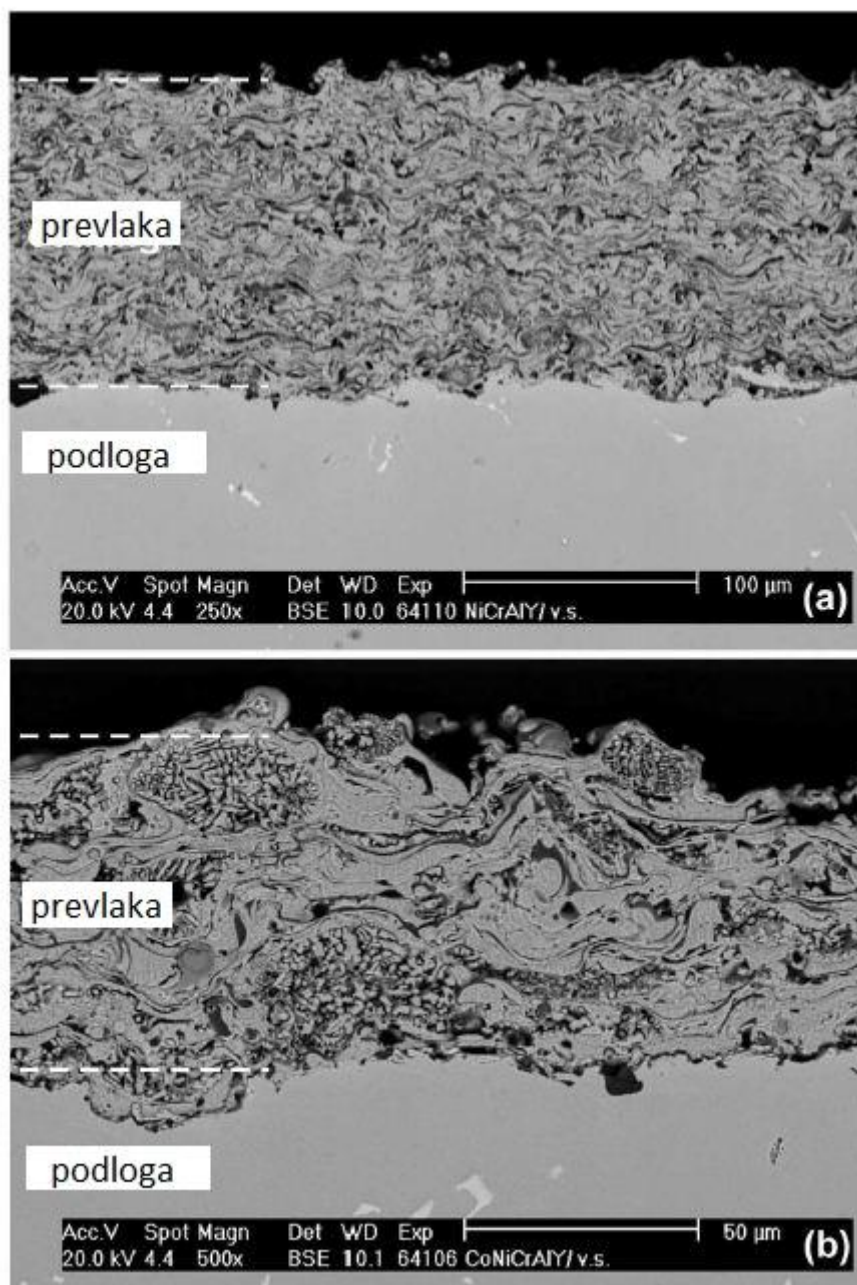
Temperatura podloge i prevlake je također povezana i sa distribucijom zaostalih naprezanja, a kut udara čestica o površinu koji bi trebao biti što bliži  $90^\circ$ .

### **2.1.3. Dobiveni naštrcani slojevi**

Sama struktura i svojstva dobivenih slojeva u principu ovisi o kemijskom sastavu dodatka za naštrcavanje i tehnologiji tj. postupku naštrcavanja, a debljina i gustoća prevlake, veličina i

orijentacija zrna, poroznost i hrapavost površine se smatraju najvažnijim parametrima koji u krajnjoj liniji daju karakteristike nanešene prevlake [12].

Mikrostruktura zaštitnih slojeva dobivenih APS-om se često pomoću mikroskopa (npr. SEM) [slika 13.] istražuje i uspoređuje za različite uvjete i parametre kako bi se zatim usporedila i povezala sa testovima i laboratorijskim istraživanjima u kojima su dobivene tvrdoće, poroznosti te vlačne čvrstoće naštrcanih slojeva [11].



**Slika 13. Naštrcani slojevi APS postupkom: (a) NiCrAlY i (b) CoNiCrAlY na podlogu Inconel 713 LC [12]**

Veličina čestica praha utječe na mikrostrukturu i mehanička svojstva prevlake dobivene APS naštrecavanjem, a dokazano je i da se poroznost povećava s povećanjem veličine čestica praha dok je povećani sadržaj oksida povezan sa smanjenjem veličine čestica praha. Također, faktori poput brzine i temperature čestica imaju snažan utjecaj na sve aspekte poroznosti, a razlikujemo sferoidne pore, orijentirane pore s velikim omjerom širine i visine te volumetrijske pore. Zbog manjih brzina većih čestica dobije se prevlaka kod koje su čestice međusobno slabije povezane što dalje uzrokuje smanjene modula elastičnosti, manja zaostala naprezanja, manji sadržaj oksida i manju tvrdoću. Kad je riječ o manjim česticama stvari su obrnute te se dobiju veće vrijednosti spomenutih svojstava. Zaostala naprezanja unutar prevlake su važno mehaničko svojstvo jer imaju velik utjecaj na mogućnost odvajanja prevlake od površine supstrata, a nastaju zbog različitog toplinskog širenja prevlake i podloge [13].

#### **2.1.4. Prednosti i mane APS-a**

Glavna prednost atmosferskog plazmatskog naštrecavanja je ta da se mogu nanositi gotovo svi materijali, a posebno je ovaj postupak prikladan za naštrecavanje keramičkih materijala i vatrostalnih materijala koji imaju visoko talište. Postupak je najjednostavniji od svih postupaka plazmatskog naštrecavanja i dobivaju se slojevi boljih svojstava od plamenog i elektrodučnog naštrecavanja.

Na početku je primjena APS prevlaka bila ograničena kod visokovrijednih proizvoda u zrakoplovnoj i nuklearnoj industriji, a sada se primjena proširila u gotovo sve grane industrije uključujući i automobilsku industriju. Razvili su se raznovrsni postupci kojim se mogu nanositi gotovo svi materijali (keramike, metali, cermeti, kompoziti) i drastično se poboljšala ponovljivost i pouzdanost procesa. Razvili su se novi pištolji i upravljanje se poboljšalo sensorima i boljom kontrolom procesa [10].

DC tip plazma pištolja se široko primjenjuje u industriji, a potrebno je spomenuti tri glavna nedostatka koja se pokušavaju poboljšati i razviti, a to su: nestabilnost električnog luka, erozija tj. prekomjerno trošenje elektroda i to posebno anode i radijalno ubrizgavanje praška. Prva dva nedostatka su povezana jer zbog toplinskog opterećenja anode, a samim time i



njezina erozija ovisi o zadržavanju električnog luka i gustoći struje na mjestu izlaska plazmenog mlaza iz sapnice. Sljedeći problem kod plazmatskog naštrcavanja je efikasno ubrizgavanje praška u plazmeni mlaz kako bi se maksimalan broj čestica ubrizgao u ionizirani plazmatski plin i rastalio u dovoljnoj mjeri te tako postigla maksimalna efikasnost nanošenja. Još uvijek se dosta istražuju mogućnosti ravnomjernog aksijalnog ubrizgavanja praša u središte mlaza plazme [9].

Aksijalno ubrizgavanje praša je omogućeno razvijanjem RF (Radio Frequency) pištolja (supersonične brzine) te novih istosmjernih DC pištolja [10].

Prevlake koje služe kao toplinski barijerni sloj tj. TBC (Thermal Barrier Coating) prevlake se pokazuju kao problematične kad je u pitanju trajnost jer se kod hlađenja pojavljuju toplinska zaostala naprezanja zbog razlike materijala supstrata i materijala prevlake. Također, javljaju se dodatna naprezanja uslijed toplinskog rasta oksida (TGO – Thermally Grown Oxide) i općenito oksidacije te se tada mogu pojaviti mikropukotine koje se dalje radijalno šire i odvajaju sloj od baznog materijala što onda dovodi do zatajenja ili kvara u eksploataciji [12].

Međutim, poroznost prevlake koja se javlja kad je samo dio čestica praša rastaljen je poželjna kod TBC-a. Na primjer, to je slučaj kod APS naštrcavanja keramičkog dijela prevlake gdje su veličine čestica između 11  $\mu\text{m}$  i 125  $\mu\text{m}$ .

Problemi s adhezijom se mogu pojaviti i inače kod keramičkih prevlaka na metalnu podlogu, a kao izvedivo rješenje je umetanje veznog međusloja između podloge i gornje oksidne prevlake [14].

### **2.1.5. Najčešća područja primjene APS-a**

Širenje primjene APS naštrcavanja u različite industrije je dovelo do poboljšanja u stabilnosti procesa, efikasnosti i stupnju nanošenja te ekonomičnosti. Također, primjenom i razvojem kontrole procesa korištenjem specijaliziranih programskih paketa za nadgledanje dijelova sustava (dozatora praša, pištolja, manipulacija obratkom itd.) i korištenjem senzora kojim se mogu pratiti karakteristike čestica u letu (trajektorije, brzine i temperature) kao i praćenjem temperature podloge su se drastično poboljšale performanse i konzistencija APS naštrcavanja [9].

Zanimljiva je primjena superlegura koje su najpouzdanije i najisplativije kada se koriste kod proizvoda koji moraju zadovoljiti kod visokih temperatura eksploatacije i visokih razina opterećenja (npr. plinske turbine u industriji i zrakoplovstvu). Iako one same po sebi imaju dobru otpornost na koroziju i oksidaciju, često se površina dodatno štiti od štetnih posljedica oksidacije i korozije pri višim temperatura pomoću nanošenja specifične grupe visokotemperaturnih prevlaka. Tu spadaju prvenstveno prevlake na bazi aluminijevog oksida modificiranog difuzijom Pt i MCrAlY gdje slovo M označava elemente Ni, Co (i Fe) te njihove prikladne međusobne kombinacije. Ovi zaštitni slojevi mogu biti nanešeni kao samostalni zaštitni sloj ili kao vezni međusloj za toplinski barijerni sloj (TBC – Thermal barrier coating) [12].

Tipični toplinski barijerni sloj (npr. kod zaštite turbinskih lopatica) se sastoji od spomenutog veznog međusloja MCrAlY koji je nanešen postupkom VPS, LPPS ili APS naštrecavanja te gornjeg sloja koji je na bazi cirkonijevog oksida stabiliziranog itrijem (YSZ – Ytria Stabilized Zirconia), a najčešće se nanosi APS naštrecavanjem (može i EB-PVD postupkom). Ovaj sustav supstrata i slojeva je tipičan primjer jednog superlegura/TBC sustava, a ovakvi slojevi se koriste vrlo često u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji za npr. zaštitu lopatica turbina, komora izgaranja, prstena klipa, sinkronih prstena itd. [15, 16].

Također, slojevi aluminijevog oksida ( $Al_2O_3$ ) naštrecani plazmatskim naštrecavanjem su vrlo važni keramički materijali koji imaju puno tehnoloških primjena. Imaju nekoliko specijalnih svojstava poput visoke tvrdoće, kemijske inertnosti, otpornosti na trošenje i visokog tališta. Aluminijev oksid može zadržati i do 90% svoje čvrstoće čak pri 1100 °C. Zbog ovih odličnih svojstava se aluminijev oksid koristi kao prevlaka kod raznovrsnih mehaničkih dijelova, a posebice kod kritičnih komponenti koje se nalaze u doticaju s agresivnim medijem ili atmosferom, visokim temperaturama i tlakovima. Keramičke prevlake obično karakterizira i relativno visoka poroznost koja štetno djeluje kada prevlaka mora pokazati dobra zaštitna svojstva u agresivnom okruženju kako se elektroliti ne bi probili do štice površine [14].

Prevlake nanešene postupkom APS-a se također koriste i za reparaciju potrošenih dijelova strojeva kako bi se vratile dimenzijske tolerancije i ujedno poboljšala površinska svojstva i performanse naštrecavanjem npr. keramike, kompozita, vatrostalnih materijala i sl..

Uz razumijevanje i poboljšavanje konvencionalnih postupaka plazmatskog naštrecavanja radi se na istraživanju i evoluciji plazmatskog naštrecavanja nanostrukturiranih prevlaka [10].

## 2.2. HVOF (High Velocity Oxy – Fuel) naštrecavanje

Brojna i iscrpna laboratorijska istraživanja i praćenje ponašanja materijala u eksploataciji su pokazala da inovativne i novorazvijene tehnike toplinskog naštrecavanja površina smanjuju troškove održavanja sustava u različitim industrijama te pružaju dugoročno razne pogodnosti [19].

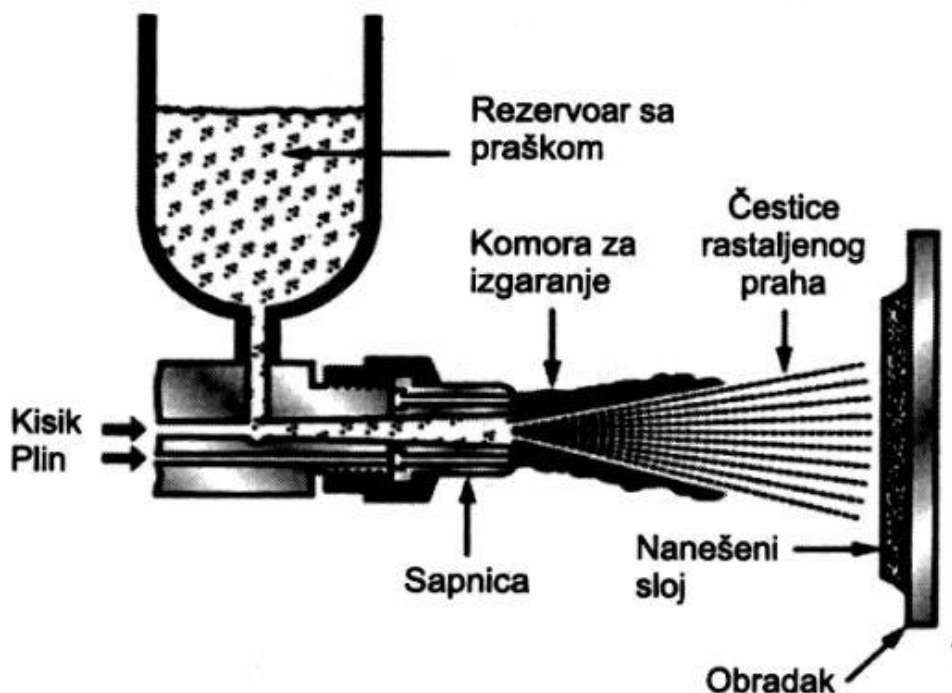
U takve postupke zasigurno spada i HVOF postupak naštrecavanja koji se često ubraja u plamena naštrecavanja jer potreban izvor topline daje izgaranje smjese goriva i kisika. Ipak, značajno se HVOF razlikuje od klasičnih postupaka plamenih naštrecavanja po brzinama plamena i čestica koje su višestruko veće u usporedbi s plamenim naštrecavanjem pa se zato po podjeli prema vrsti nosača energije (DIN 32530) postavlja kao zaseban postupak [5].

HVOF je posebno zanimljiv kad je u pitanju povećavanje otpornosti na trošenje materijala kako bi se postigla bolja kvaliteta i prednosti u proizvodnji. Postupci visokobrzinskog naštrecavanja, a posebno HVOF, se koriste za dobivanje prevlaka s vrlo malom poroznošću i velikom adhezijom naštrecanog sloja.

Postoji nekoliko različitih sustava HVOF naštrecavanja koji se razlikuju po nekim detaljima kao npr. prema konstrukciji pištolja i kapacitetima, ali svi sustavi rade na istom principu [20].

### 2.2.1. Opis tehnologije HVOF naštrecavanja

HVOF sustavi imaju pištolj s internom komorom za sagorijevanje u kojoj smjesa goriva (plinsko ili tekuće) i kisika izgara pod povišenim tlakom. Produkti izgaranja ekspanzijom kroz mlaznicu (sapnicu) postižu nadzvučne brzine koje se prepoznaju po Machovim čvorovima (eng. „shock diamonds“) pri izlazu iz mlaznice. Prah se ubrizgava u vrući, ekspandirajući plin te se čestice praha rastaljuju i ubrzavaju prema površini supstrata [slika 14.]. Čvrstoća prijanjanja je često veća od 70 MPa, a može biti veća i od 100 MPa dok su najčešće maksimalne debljine nanešenih slojeva između 1 mm i 2 mm [19].

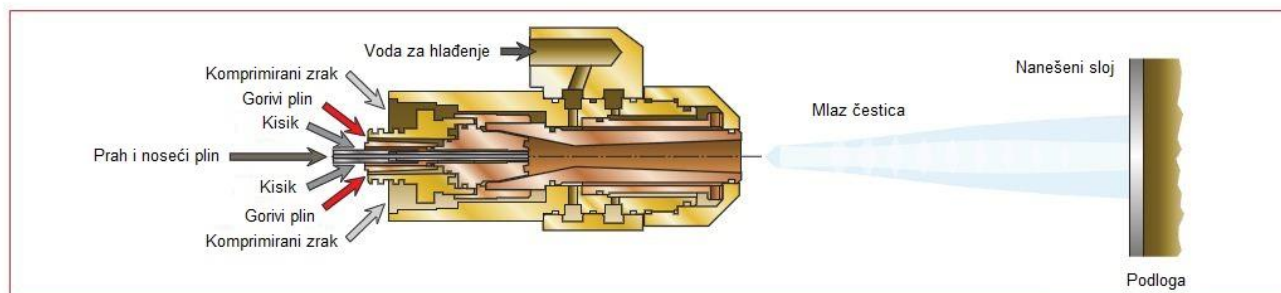


Slika 14. Osnovni princip HVOF naštrecavanja [5]

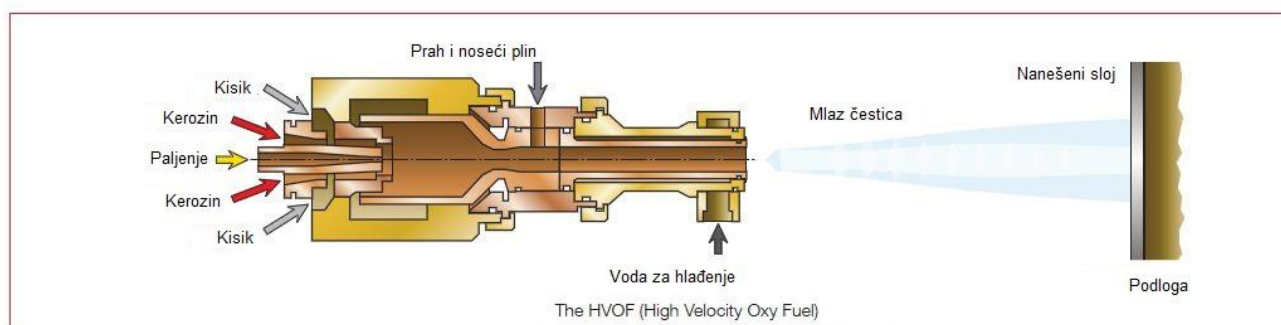
Potrebna toplina se dobiva izgaranjem smjese kisika i goriva, a kao gorivo se najčešće koristi vodik, kerozin, propan, propilen, zemni plin, etilen ili acetilen. Zahvaljujući specijalnim konstrukcijama mlaznica se postižu nadzvučne brzine. Kod HVOF postupka se u komoru za izgaranje koja se nalazi unutar pištolja [slika 15.] ubrizgava zajedno uz gorivo i kisik i prah za naštrecavanje. Čestice praha se zatim potpuno ili djelomično rastaljuju u plamenu čija temperatura varira u rasponu od 2500 – 3200 °C ovisno o gorivu, omjeru kisika i goriva te pritisku plina. Da li će se čestice praha rastaliti potpuno ili djelomično ovisi o temperaturi plamena, vremenu zadržavanja čestica u plamenu, talištu materijala praha i toplinskoj provodnosti [5, 20].

Pištolji s komorama za izgaranje koje karakterizira izgaranje pri visokim tlakovima (iznad 3 bara) i protoka plina koji se kreće od nekoliko stotina litara u minuti generiraju nadzvučne brzine plamena. Te pištolje možemo grubo podijeliti u tri generacije, a pojedina svojstva tih pištolja su prikazana u tablici 4..

### HVOF pištolj za plinsko gorivo



### HVOF pištolj za tekuće gorivo (kerozin)



Slika 15. Konstrukcije pištolja za HVOF ovisno o gorivu [21]

Tablica 4. Razlike između tri generacije razvijenih pištolja za HVOF sustave [20]

	Tip sapnice	Iznos snage (kW)	Tlak u komori (bar)	Kg/h (WC-Co)
<b>1. generacija</b>	Ravna	80	3 do 5	2 do 6
<b>2. generacija</b>	De laval	80 do 120	5 do 10	2 do 10
<b>3. generacija</b>	De laval	100 do 300	8 do 12 (čak i do 25)	10 do 12

Budući da se prevlaka stvara pomoću rastaljenih čestica koje se ubrzavaju prema površini te udaraju u površinu i brzo se skrućuju, jasno je da njihova brzina igra važnu ulogu kako bi se dobila gustoća lamela u strukturi prevlake. Temperatura plamena ima snažan utjecaj na materijale koji se mogu naštrcavati. Sa znanstvene točke gledišta, brzina čestica praha i temperatura tih čestica zajedno s karakteristikama podloge su glavni parametri koji određuju svojstva naštrcane podloge [20].

### 2.2.2. Tehnološki parametri

HVOF postupak je vrlo kompleksni proces zbog brojnih varijabli koje utječu na formiranje prevlake, a samim time i na njezina svojstva. Te varijable uključuju karakteristike korištene opreme (npr. geometrija mlaznice, udaljenost sapnice od podloge koja se naštrcava) i procesne parametre (npr. vrsta goriva, protok goriva, ubrizgavanje praha itd.). Zbog kompleksne prirode HVOF postupka je nužna kontrola i optimizacija procesa naštrcavanja kako bi se dobila prevlaka željenih svojstava, a to je prilično zahtjevna zadaća.

Trendovi u razvoju HVOF procesa se kreću ka povećanju pritiska plina, većim brzinama čestica praha te smanjenju temperature čestica praha jer ovi parametri imaju najveći utjecaj na mikrostrukturu prevlake.

Kontrolom i odabirom vrste plina/goriva, protoka plina/goriva, omjerom kisika i goriva te tlaka u komori za sagorijevanje je moguće postići različita stanja čestica praha pa je tako dokazano da sitne čestice NiCr-a trpe veću oksidaciju kad su u pitanju veće temperature te često kod velikih brzina zbog čestica koje nisu potpuno rastaljene pri njihovom udaru u površinu nastaju pore u kojima je zarobljen zrak. S druge strane, potpuno rastaljene NiCr čestice formiraju prevlaku koja ima manja kristalna zrna u usporedbi s ulaznim materijalom praha i poroznost je manja. Dakle, stanje čestice, njezina kinetička energija, lokalna temperatura nanosa su vjerojatno najvažniji faktori koji utječu na mikrostrukturu i svojstva prevlake.

Također, sadržaj oksida u naštrcanom sloju je povezan pretežno s reakcijom rastaljene čestice s okolinom pa je važno da plamen „štiti“ dovoljno dugo česticu u letu uz totalno izgaranje kisika unutar plamena. Ostali faktori koji snažno djeluju na dinamiku formiranja prevlake, uz stanje čestice, su temperatura i hrapavost površine podloge osnovnog materijala, kut naštrcavanja te stopa nanosa.

Željena ciljana svojstva naštrcanog sloja možemo dobiti samo utvrđivanjem točnih parametara procesa, a optimizacija performansi i svojstava prevlake se može postići i kontrolirati preko njezine mikrostrukture i interakcije između sustava prevlaka/podloga [20, 28].

### 2.2.3. Dobiveni naštrcani slojevi

Cilj je postići kvalitetnu prevlaku s odgovarajućim svojstvima i traženim performansama za pojedinu primjenu.

Glavna značajka HVOF-a jest mogućnost dobivanja guste prevlake s malim sadržajem neželjenih anomalija poput degradacije i oksidacije metalnih materijala i fazne transformacije. Ovakva poželjna mikrostruktura se dobiva zbog kratkog zadržavanja čestica u relativno hladnom plamenu. HVOF postupak se široko primjenjuje kod nanošenja cermeta i metalnih prevlaka, ali se također pokazalo i da je ovaj postupak odličan i kod nanošenja keramičkih prevlaka.

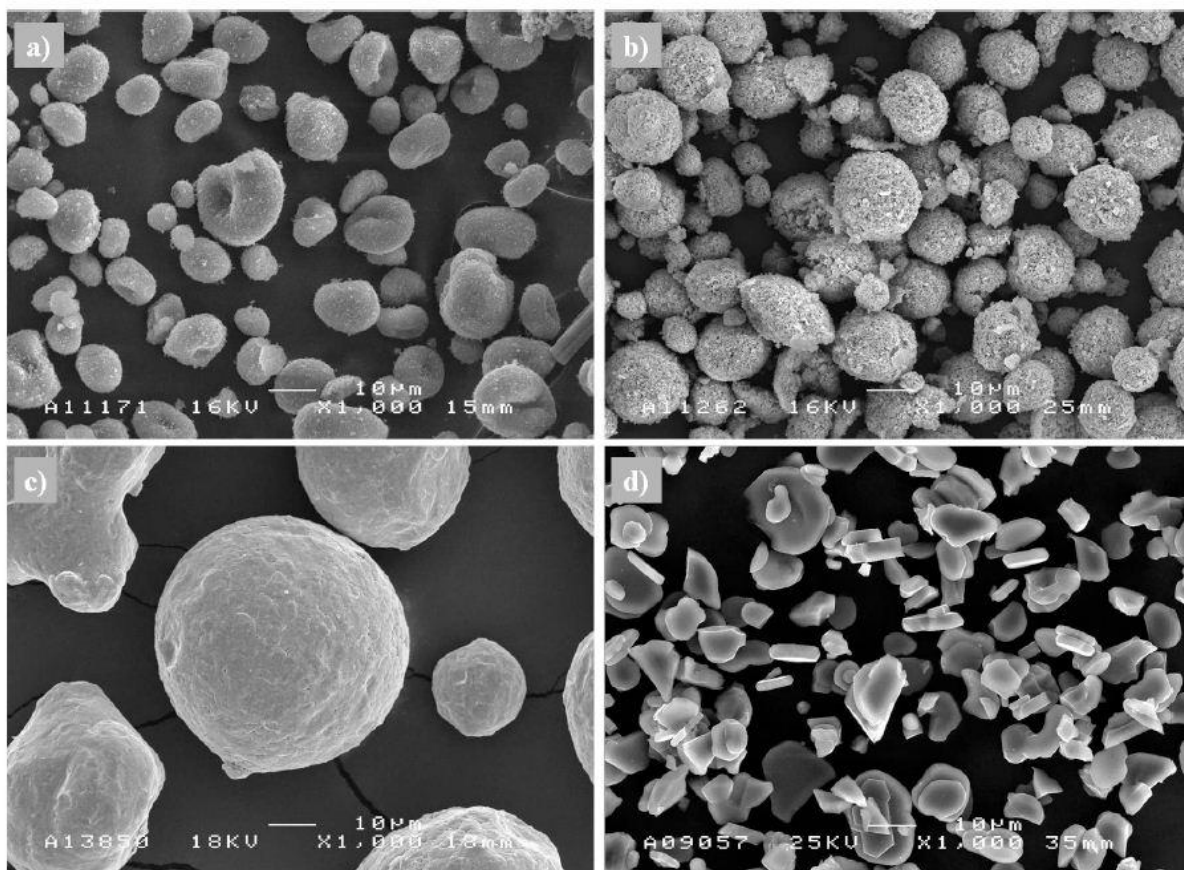
Prevlake dobivene različitim tehnikama HVOF-a imaju svojstva bitno drukčija od onih dobivenih drugim postupcima toplinskog naštrcavanja.

HVOF postupak se pokazao posebno dobar kod naštrcavanja karbidnih i metalnih prevlaka relativno niskom temperaturom plamena i nadzvučnim brzinama čestica praha. Uz neka ograničenja moguće je dobiti i visokokvalitetne keramičke prevlake koje pokazuju odličnu otpornost na trošenje. Prevlake sa takvim svojstvima mogu biti i na bazi cermeta kombinirajući različite metalne matrice uključujući Co, Cr, Ni, WC i  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ . Kod brzog hlađenja prevlake moguće je postići da matrica bude amorfnu i zasićenu s W i C pa se onda takva prevlaka naknadno može podvrgnuti žarenju na temperaturu iznad  $600\text{ }^\circ\text{C}$  kako bi joj se još dodatno povisila tvrdoća te ujedno smanjila zaostala naprezanja.

$\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr prevlake u odnosu na WC-Co prevlake u mnogo slučajeva imaju manju otpornost na trošenje, ali kod povišenih temperatura (iznad  $450\text{ }^\circ\text{C}$ ) imaju bolja svojstva jer pri tim temperaturama otpornost Co-WC nije zadovoljavajuća. Kao alternativa  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr prevlakama se također mogu koristiti i TiC i  $\text{TiB}_2$  koji su u istraživanjima pokazali još bolju otpornost na trošenje.

Kako bi se dobila visokokvalitetna keramička prevlaka s HVOF postupkom, sustav za naštrcavanje mora omogućiti dovoljno energije za taljenje čestica za vrijeme kratkog zadržavanja u plamenu i leta prema površini. Zato takvi prahovi koji se koriste moraju imati usku distribuciju veličine čestica, a prosječna veličina mora biti manja nego kod uobičajenih postupaka HVOF naštrcavanja. Vrlo je važan i izbor goriva kako bi se odredila točna kombinacija temperature i brzine čestica za uspješno nanošenje visokokvalitetne prevlake.

Svojstva i karakteristike praha za naštrcavanje su vrlo važna te su u korelaciji s kasnijim svojstvima prevlake pa je tako moguće da se za isti materijal praha, ali različite morfologije i veličine čestica praha [slika 16.], koji je naštrcan sličnim rasponom temperatura i brzina čestica, mogu dobiti bitno drukčija svojstva prevlake.



**Slika 16. SEM slike prahova za naštrcavanje s različitom morfologijom [20]**

- a) aglomerirani i sinterirani  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$  prah
- b)  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  prah osušen raspršivanjem
- c) plinski atomizirani Ni20Cr prah
- d) sjedinjeni i gnječeni  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prah

Samotekuće legure (EN ISO 14920) se koriste kao slojevi za zaštitu od trošenja istovremeno s dobrom otpornošću na koroziju. Kod HVOF naštrcavanja prevlake od samotekuće legure NiWCrBSi se pri optimizaciji procesa pokazalo da posebne efekte na poroznost, a samim time onda i na otpornost na koroziju, imaju udaljenost mlaznice od površine koja se naštrcava, omjer goriva i kisika te dotok praha.



Primjer prevlake koja može pružiti dobru zaštitu od korozije u agresivnim okolinama je i prevlaka trgovačkog naziva Hastelloy C kod koje također pri naštrcavanju treba obratiti pozornost na dobivanje što manje poroznosti dok su kod visokotemperaturne korozije posebice zanimljive npr. HVOF prevlake  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ ,  $\text{NiCrBSi}$ , Stellite-6 i Ni-20Cr. Superlegure zaštićene ovim prevlakama su pokazale superiornija svojstva u usporedbi sa superlegurama koje nisu bile zaštićene u uvjetima visokotemperaturne korozije.

Analiza dobivenih karakteristika prevlake se uglavnom provodi nakon samog procesa naštrcavanja jer je samo naštrcavanje teško pratiti pomoću senzora iako je moguće npr. mjeriti temperaturu pomoću termoelemenata pričvršćenih na drugu stranu podloge materijala koji se naštrcava te pomoću dobivenih informacija izračunati zaostala naprezanja, modul elastičnosti i koeficijent toplinskog širenja prevlake. U današnjoj industrijskoj primjeni se rijetko koriste ovakve metode online analize procesa naštrcavanja.

Kod primjene prevlaka dobivenih HVOF postupkom koje trebaju imati veliku otpornost na trošenje najvažnija svojstva koja se kontroliraju i mjere su tvrdoća, modul elastičnosti, čvrstoća kao i poroznost [20].

#### **2.2.4. Prednosti i mane HVOF-a**

Prevlake dobivene HVOF postupkom imaju u usporedbi s drugim toplinski naštrcanim površinama bolje karakteristike. Primjerice, moguće je ostvariti prevlake s niskom poroznošću koja je redovito manja i od 2 %, a čak je moguće ostvariti i 0,5 % poroznosti. HVOF prevlake se odlikuju visokom čvrstoćom prijanjanja pa tako tipična čvrstoća koja se može očekivati kod karbidnih slojeva prelazi 69 MPa, a za druge vrste materijala se očekuje veća čvrstoća adhezije nego kod npr. APS postupka. Također, jedna od prednosti HVOF prevlaka je i mogućnost postizanja visoke tvrdoće i čvrstoće prevlake koje ovise o kemijskim i drugim faktorima, kraćem vremenu zadržavanja čestica u plamenu te nižim temperaturama plamena pa se time postižu odlična otpornost na trošenje s odličnom otpornosti na udarce.

HVOF se uglavnom primjenjuje kod prevlaka na bazi cermeta i metala zbog ograničene snage većine HVOF pištolja i sustava, ali HVOF nudi zanimljivu kombinaciju za dobivanje guste prevlake s kontroliranim faznim transformacijama [20, 21].

U prošlosti je jedno od ograničenja HVOF-a bilo to da je debljina nanešenog sloja bila relativno mala (najčešće do 2 mm), ali se danas mogu postići debljine sloja od čak 6,4 mm za neke WC prevlake. Ako je zahtjev za debljim slojevima, onda se koriste postupci poput SAW, FCAW i PTAW [19].

U odnosu na ostale sustave i postupke toplinskog naštrcavanja HVOF je najskuplji te najkompleksniji pa sustav treba odabrati i konfigurirati u okviru financijskih mogućnosti i proizvodnih potreba [21].

### **2.2.5. Najčešća područja primjene HVOF-a**

Jedna od najčešće spominjanih primjena HVOF-a jest primjena HVOF-a kao alternative tvrdom kromiranju u zrakoplovnoj, naftnoj, petrokemijskoj, drvnoj i papirnoj industriji gdje se javljaju visoka opterećenja frikcijskog trošenja. HVOF postupak se u usporedbi s tvrdim kromiranjem pokazao kao bolji u pogledu zaštite okoliša (i ljudi), pruža bolja svojstva zaštitnih slojeva, bolju pokrivenost, mogućnost naštrcavanja većih dimenzija te mogućnost korištenja više materijala praha [20].

Primjeri primjene različitih HVOF prevlaka se mogu naći u prvom redu u zrakoplovnoj, procesnoj, papirnoj industriji te kod termoelektrana pa se tako razne komponente štite HVOF prevlakama poput kuglastih i zapornih ventila, turbinske lopatice, stalni trap, prsten klipa, kućišta, cijevi izmjenjivača i sl. Zbog niske poroznosti (ispod 1%) HVOF prevlake pokazuju odličnu otpornost na koroziju, a zbog visoke tvrdoće kombinirane sa visokom čvrstoćom prijanjanja na podlogu i interlaminarnih veza, ove prevlake imaju razne primjene kod aplikacija kod kojih je potrebna visoka otpornost na trošenje. HVOF prevlake tvrdog metala sadrže karbide i/ili nitride, poput npr. WC-CoCr, WC-(W,Cr)<sub>2</sub>C-Ni i (Ti,Mo)(C,N)-Ni/Co, koji imaju visoku tvrdoću i odlična tribološka svojstva te se najčešće ovakve prevlake koriste za zaštitu dijelova u strojogradnji. U energetske sektoru se puno primjenjuju HVOF prevlake NiCr, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-20NiCr, NiCrBSi, Stellite-6 kod zaštite različitih bojlera, izmjenjivača topline, cijevi itd., a samotekuće legure se koriste kod npr. spalionica otpada i dr. [20].

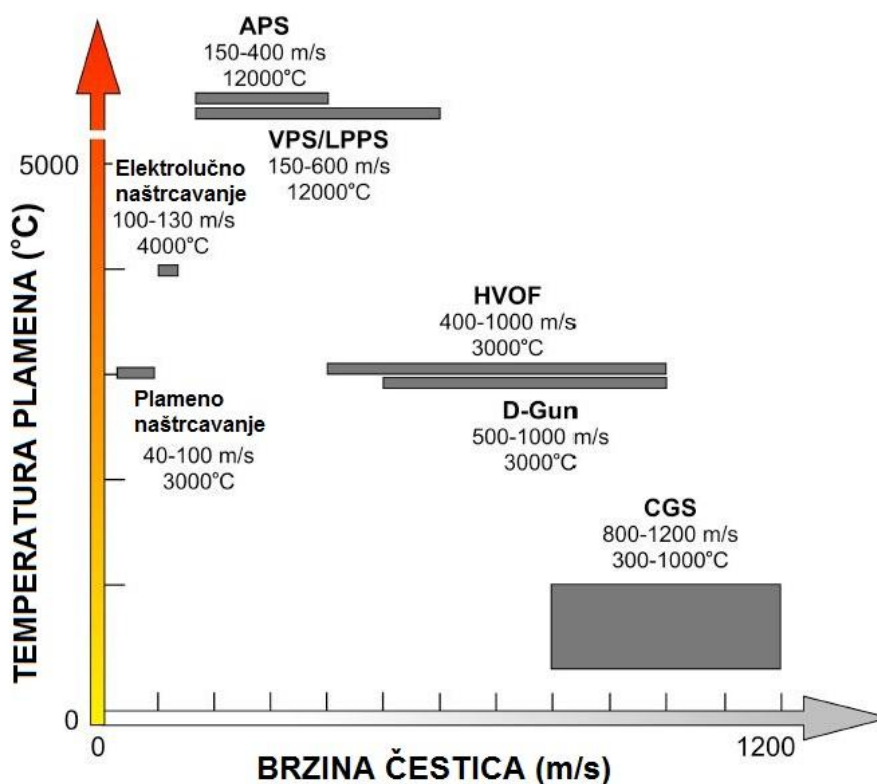
Nakon što se na površinu podloge nanese željena debljina prevlake, moguće je prevlaku podvrgnuti difuzijskom žarenju (oko 1000°C) što uzrokuje difuziju elemenata između rastaljene prevlake i baznog materijala SF (Spray Fusion) postupkom (poput tvrdog

lemljenja). Pri dodavanju 35% do 65% WC dobiva se poboljšana otpornost na abraziju i eroziju. U tom slučaju čvrstoća prijanjanja može iznositi čak oko 200 MPa, a debljina sloja se može kretati čak od 3 mm do 6 mm što čini ovaj naknadni postupak vrlo pogodnim kod najvećih opterećenja abrazije, erozije i korozije [19].

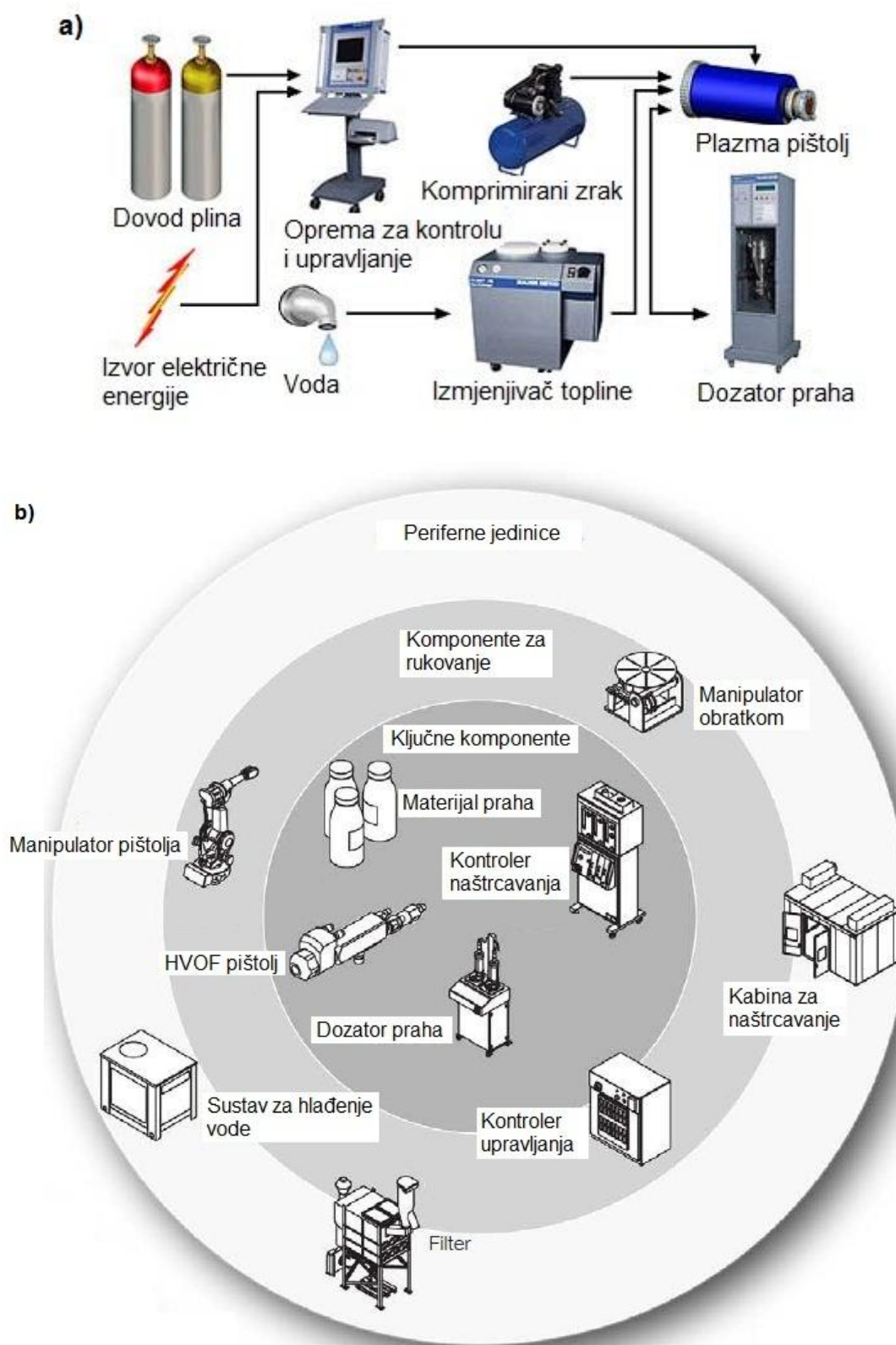
### 2.3. Usporedba postupaka APS i HVOF naštrecavanja

Budući da prevlaka nastaje naštrecavanjem rastaljenih čestica, brzina čestica i temperature koje se razvijaju imaju najvažniju ulogu u formiranju guste lamelarne strukture prevlake. Slika 17. prikazuje tipične raspone temperature plamena i brzine čestica kod pojedinih postupaka toplinskog naštrecavanja.

Glavna razlika u samim sustavima APS i HVOF postupaka naštrecavanja je u ključnim komponentama koje su zadužene za razvijanje potrebne topline dok su komponente za rukovanje obratcima i periferne jedinice zajedničke kao što je prikazano na slici 18..



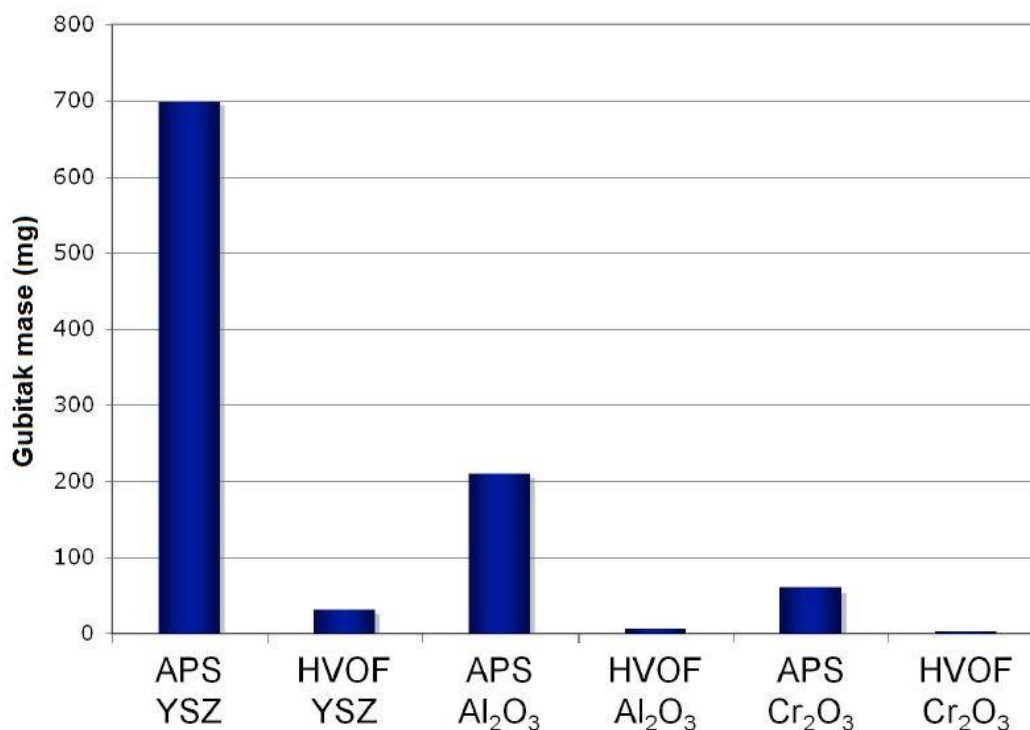
Slika 17. Tipične temperature plamena i brzine čestica kod različitih postupaka toplinskog naštrecavanja [20]



Slika 18. Sustavi a) APS i b) HVOF postupaka naštrcavanja [21]

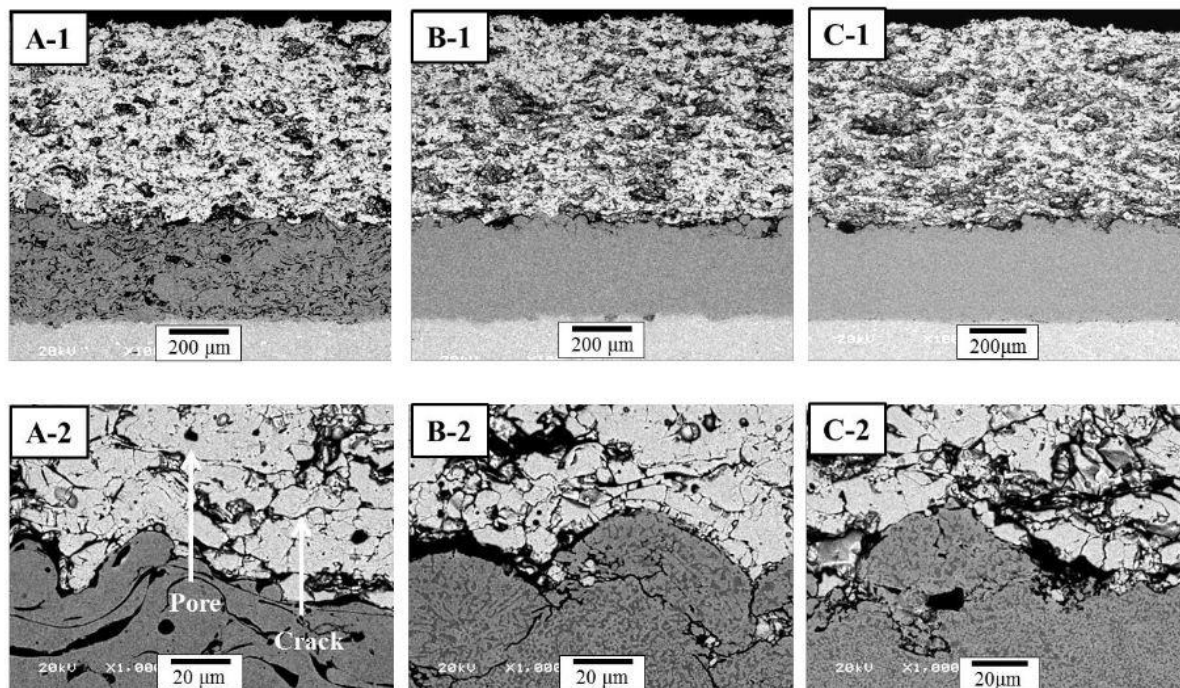
Što se tiče otpornosti na trošenje prevlaka dobivenih HVOF postupkom, one imaju superiornija svojstva od onih dobivenih APS postupkom kad je u pitanju ista vrsta materijala praha za naštrcavanje. Tako je dokazano da HVOF prevlake  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25\%Ni}$  imaju bolju otpornost na udarna opterećenja u odnosu na APS postupke jer se dobije gušća struktura s manje defekata, a budući da na mehanizme trošenja  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25\%Ni}$  prevlaka najviše utječe slojevitost prevlake bez poroznosti i mikropukotina između lamela, kontrola ovih faktora ima najveći utjecaj na otpornost na trošenje ovakvih prevlaka [20].

Slična situacija je i kod keramičkih prevlaka naštrcanih HVOF postupkom u odnosu na APS iako ima samo nekoliko HVOF pištolja razvijenih na tržištu za naštrcavanje keramičkih prevlaka kod industrijske namjene. HVOF prevlake imaju veću gustoću te manje pora i mikropukotina u odnosu na APS prevlake pa se kod ispitivanja i mjerenja abrazije gumenim kotačem (ASTM G 65) pokazalo da su rezultati višestruko povoljniji kod HVOF prevlaka [slika 19.], a pokazalo se da su rezultati bolji u korist HVOF i kod mjerenja mikrotvrdoće, čvrstoće na lom i modula elastičnosti. Doduše, treba napomenuti da se kod ove usporedbe uzima u obzir TBC sloj kod kojeg nije nužna maksimalna gustoća prevlake bez poroznosti [20].



**Slika 19. Usporedba otpornosti na abrazivno trošenje različitih slojeva oksidne keramike naštrcanih APS i HVOF postupkom [20]**

Ova razlika u dobivenim svojstvima otpornosti na trošenje HVOF i APS prevlaka se može objasniti preko razlike u distribuciji različitih vrsta pora (sitne pore i mikropukotine) kod navedenih postupaka kao npr. u slučaju na slici 20..



**Slika 20. Poprečni presjeci mikrostrukture TBC prevlake [16]**

- (A) TBC prevlaka s međuslojem naštrcanim APS postupkom, različita povećanja,
- (B) TBC prevlaka s međuslojem naštrcanim HVOF postupkom, različita povećanja,
- (C) TBC prevlaka s međuslojem naštrcanim LPPS postupkom, različita povećanja.

#### 2.4. Metode za ispitivanje svojstava naštrcanog sloja

Kontrola naštrcanog sloja je kontrolirana u standardu DVS Merkblatt 2304 – Osiguranje kvalitete utvrđivanjem i praćenjem svih faktora koji utječu na proces naštrcavanja. Najprije se vrši brza procjena kvalitete naštrcanog spoja makroskopski, vizualnom kontrolom kako bi se

otkrile greške poput neprevučениh površina, napuhnuća, napuklina, odstupanja u boji, hrapavosti i sjaju. U daljnje makroskopske metode spadaju utvrđivanje hrapavosti, kontrola penetrantima, debljine prevlake i sl.. Zatim se koriste razne razorne metalografske metode kod kojih se dobivaju saznanja o tvrdoći sloja, poroznosti, debljini sloja, sadržaju oksida, čvrstoći prijanjanja, mikrostrukтури, stupnju rastaljivanja naštrcanih čestica itd. Ispitivanje i ocjenjivanje dobivenih prevlaka je rijetko moguće nerazornim metodama u koje spadaju ultrazvučna kontrola, termografija, magnetski indukcijski postupci i postupci s vrtložnim strujama. Od važnijih pokusa treba spomenuti i vlačne pokuse, ispitivanja savijanjem, ispitivanja vučenjem te različita ispitivanja otpornosti na trošenje i otpornosti na koroziju [5].

#### **2.4.1. Ispitivanje tvrdoće naštrcanog sloja**

Tvrdoća prevlake se obično mjeri ili kod poprečnog presjeka ili na površini prevlake. Najčešće se koriste dvije metode mjerenja tvrdoće, a to su metoda (npr. prema Vickersu) kod koje se mjeri tvrdoća kod malog opterećenja ili mikrotvrdoća te metoda kod određivanja makrotvrdoće pri kojoj treba voditi računa o tome da se zbog debljine sloja često moraju primijeniti Super-Rockwell metode kao npr. HRN i sl. [5, 20].

Kod Vickersove metode mjerenja tvrdoće se potrebno pridržavati standarda EN ISO 14923 koji između ostalog određuje potrebnu debljinu prevlake koja se mjeri ovisno o tome da li se mjeri kod poprečnog presjeka ili na površini prevlake. Primjerice, debljina prevlake kod mjerenja na površini prevlake bi trebala biti takva da se izbjegne utjecaj materijala podloge na dobivene rezultate mjerenja [20].

#### **2.4.2. Ispitivanje prionljivosti (adhezije) naštrcanog sloja**

Prionljivost tj. adhezija je jedan od najvažnijih parametara prevlake koji utječe na performanse i ponašanje cjelokupnog sustava prevlaka/podloga u praktičnoj primjeni. Budući da nema metalurških veza između prevlake i podloge već je riječ samo o mehaničkim vezama, stanje površine podloge i parametri nanošenja prvog sloja prevlake imaju najvažniju ulogu za dobivanje dobre adhezije.

Standardna metoda mjerenja adhezije toplinski nanešenog sloja i osnovnog materijala se određuje kao vlačna čvrstoća prijanjanja i to vlačnim pokusom prema DIN 50160/ DIN EN 582. Ova metoda se najčešće primjenjuje iako se u literaturi spominje više od 80 drugih metoda kojima se može odrediti adhezija prevlake i osnovnog materijala. Kod poroznijih keramičkih prevlaka se može pojaviti problem kod kojeg se ljepilo može probiti preko pora do podloge osnovnog materijala pa se mogu dobiti prevelike vrijednosti adhezije pa su tako za porozne keramičke prevlake razvijeni testovi smične čvrstoće prijanjanja i test na brazdanje [20].

#### **2.4.3. Ispitivanje debljine naštrcanog sloja**

Norma ISO 3882 definira metode i rubne uvjete koje je potrebno primijeniti kod mjerenja debljine naštrcanog sloja. Debljina sloja ima posebnu važnost kod slojeva koji moraju imati veliku otpornost na koroziju, a funkcionalnost sloja je određena i njegovom minimalnom debljinom. Najčešće se debljine slojeva kreću u području od oko 20  $\mu\text{m}$  pa do nekoliko stotina  $\mu\text{m}$  ovisno o postupku naštrcavanja, a imaju granice tolerancije od  $\pm 20 \mu\text{m}$ . Kod automatiziranog vođenja procesa naštrcavanja je moguće postići i tolerancije debljine sloja u području  $\pm 5 \mu\text{m}$  [5].

Kod mjerenja debljine sloja razlikujemo određivanje lokalne debljine i određivanje prosječne debljine po cijeloj površini. Postoje razne razorne metode (npr. mjerenje debljine mikroskopom, mjerenje debljine profilometrijom) i nerazorne metode od kojih se najčešće koriste magnetski indukcijski postupci i postupci s vrtložnim strujama, a treba spomenuti i metodu mjerenja debljine mikrometarskim vijkom [7, 20].

#### **2.4.4. Ispitivanje hrapavosti površine naštrcanog sloja**

Kod svakog toplinski naštrcanog sloja u manjoj ili većoj mjeri postoji odstupanje površine od zadanog oblika ili se može pojaviti valovitost zbog slaganja slojeva kod naštrcavanja u više prolaza. Također javlja se i hrapavost površine koju možemo podijeliti na mikrohrapavost i makrohrapavost, a istraživanjem se utvrđuje profil hrapavosti, odnosno iznos hrapavosti.



Najčešće se koriste kontaktne metode (pomoću ticala - 2D i 3D) ili beskontaktne metode (optički uređaji, skenirajući mikroskopi) [5, 7].

#### **2.4.5. Određivanje poroznosti prevlake**

Postoji veliki broj različitih metoda koje se mogu koristiti za određivanje poroznosti prevlake. Nerazorne metode poput apsorpcije vode, živina porosimetrija, piknometrija pomoću helija, Arhimedova metoda i druge se koriste za kvantitativno mjerenje poroznosti. Ove metode se rijetko koriste u industriji zbog kompleksnosti. Najčešće se poroznost prevlake analizira i određuje pomoću analize slika dobivenih pomoću mikroskopa (npr. SEM i dr.) te ovakva analiza zadovoljava u 95 % slučajeva iako treba naglasiti da priprema uzoraka ima veliki utjecaj na dobivene rezultate [20].

#### **2.4.6. Ispitivanje korozijske postojanosti i otpornosti na trošenje naštrcanog sloja**

Otpornost na koroziju toplinski naštrcanih slojeva je uvijek važno svojstvo, a najveći utjecaj na ovo svojstvo u prvom redu ima okoliš, ali i svojstva prevlake poput kemijskog sastava, mikrostrukture, fazne strukture uključujući pukotine i pore te interakcija između prevlake, supstrata i okoliša. Jako rijetko se može postići prevlaka koja u potpunosti onemogućuje probijanje plinova ili tekućina kroz prevlaku do podloge pa je odabir sustava prevlaka/podloga jedan od najvažnijih parametara kad je u pitanju korozivna sredina u određenoj primjeni. Koriste se različiti testovi u kojima se potapa uzorak u kupku koja simulira stvarne uvjete ili se ubrzanim testovima u laboratoriju određuje otpornost na koroziju. Također, mogu se koristiti i različita elektrokemijska ispitivanja kako bi se ocijenila reakcija prevlake/supstrata kao sustava u korozivnom okruženju.

Otpornost na trošenje toplinski naštrcanih prevlaka je od najvećeg značaja za mnoge primjene. Vrlo je važno odrediti tip tj. mehanizme trošenja koji bi se mogli pojaviti u eksploataciji sustava prevlaka/osnovni materijal.

Jedan od najčešće korištenih testova je test abrazije gumenim kotačem prema ASTM G 65 i ASTM G 105 kojima se određuje otpornost na abraziju trećim tijelom, a mjeri se gubitak mase i dubina traga trošenja analizom profila. Adhezijsko trošenje i klizno trošenje se

određuje testovima poput pin-on-disc (VAMAS), block-on-ring (ASTM G 77), block-on-pin (FALEX) i različitim drugim modificiranim testovima. Također, postoji mnoštvo standardiziranih testova za određivanje udarnog trošenja, fretinga, Taber indeksa trošenja, erozije, brazdanja itd. [5, 7, 20].

#### **2.4.7. Ispitivanje modula elastičnosti i čvrstoće prevlake**

Postoji nekoliko metoda pomoću kojih možemo utvrditi modul elastičnosti prevlake među kojima treba spomenuti IET tehniku, ICP senzore i instrumentalno utiskivanje. IET standard je pobliže opisan u ASTM E 1876-99 i ENV 843-2.

Budući da modul elastičnosti jako ovisi o mikrostrukturi prevlake te posebno o poroznosti prevlake i ostalim manama prevlake, njegova vrijednost se može iskoristiti kod procjene ujednačenosti i kvalitete određene prevlake u odnosu na neku drugu toplinski naštrcanu prevlaku.

Čvrstoća materijala se može opisati kao njegova sposobnost apsorpcije energije prije i tijekom loma. Zbog krhke prirode mnogih toplinski naštrcanih prevlaka u evaluaciji iskoristivosti i performansi prevlake mehanizmi loma igraju važnu ulogu. Kod ovog ispitivanja je ideja ta da se primijeni dovoljno velika sila kojom se utiskuje Vickersova dijamantna piramida u prevlaku kako bi se inicirala pukotina na dijagonalnim kutovima te se zatim mjeri prosječna duljina te pukotine u odnosu na primijenjenu silu utiskivanja kako bi se izračunao koeficijent čvrstoće na lom. Pukotine u sloju se lakše šire paralelno s podlogom dok se vertikalne pukotine obično javljaju kod krhkih keramičkih prevlaka. Također, pukotine koje su paralelne s podlogom se najčešće iniciraju i šire kroz granice tj. rubove lamela [20].

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

U sklopu ovog rada su izrađeni uzorci materijala sa prevlakama pomoću tehnologija APS i HVOF naštrcavanja koji su zatim laboratorijski analizirani i ispitivani. Standardnim metodama i opremom za svjetlosnu i skenirajuću elektronsku mikroskopiju te uređajima za automatsku analizu slike je okarakterizirana dobivena mikrostruktura koja najviše utječe na svojstva prevučenog materijala te su dobiveni rezultati uspoređeni s dostupnim rezultatima sličnih ispitivanja iz literature. APS tehnologijom je naštrcana TBC prevlaka, a HVOF postupkom je naštrcana prevlaka na bazi krom karbida.

Također, za TBC prevlaku su izmjereni i ispitani ostali podaci važni za određivanje svojstava dobivene prevlake poput debljine veznog međusloja, debljina gornjeg sloja, defekti vezanja međusloja i osnovnog materijala, poroznost međusloja i gornjeg sloja itd.

Sloj krom karbida je ispitan te je određena ravnomjernost nanošenja prevlake, debljina prevlake, stupanj poroznosti, adhezija sloja i osnovnog materijala te je izvršeno ispitivanje tvrdoće po Vickersu.

#### 3.1. Korištena oprema, osnovni i dodatni materijal

APS postupkom toplinskog naštrcavanja je nanešena TBC (Thermal Barrier Coating) prevlaka, a kao osnovni materijal je poslužila superlegura Inconel IN617 na bazi nikla, dok je HVOF postupkom na isti osnovni materijal nanešena prevlaka na bazi krom karbida.

TBC prevlaka se sastoji od dva sloja (oba naštrcana APS postupkom) od kojih je jedan vezni međusloj, a dugi sloj je gornji sloj od oksidne keramike. Ova prevlaka bitno poboljšava svojstva i otpornost osnovnog materijala kod visokih temperatura i korozivne sredine. Primjeri primjene su opisani u prethodnim poglavljima.

Prevlaka na bazi krom karbida je na osnovni materijal nanešena HVOF postupkom toplinskog naštrcavanja. Ova vrsta prevlake se primjenjuje u prvom redu onda kada je potrebno osnovni materijal zaštititi od prekomjernog trošenja.

### 3.1.1. Sustavi za APS i HVOF naštrcavanje

Korišteni APS sustav za naštrcavanje se sastoji od:

- izvora električne energije,
- dovoda plinova,
- kompresora za dobavu komprimiranog zraka,
- upravljačko - kontrolne jedinice,
- plazma pištolja,
- dozatora praha,
- robota za upravljanje plazma pištoljem,
- manipulacijskog stola za obratke,
- izmjenjivača topline za hlađenje rashladne vode,
- kabine za naštrcavanje s ugrađenim ventilacijskim sustavom.

Dijelovi HVOF sustava:

- HVOF pištolj,
- jedinica za kontrolu naštrcavanja,
- upravljačka jedinica,
- dozator praha,
- dovod kisika,
- dovod goriva (kerozin),
- robot za manipulaciju HVOF pištolja,
- manipulacijski stol za obratke,
- izmjenjivač topline za hlađenje rashladne vode,
- kabina za naštrcavanje s ugrađenim ventilacijskim sustavom.

### 3.1.2. Primjena industrijskog robota kod APS i HVOF postupaka naštrcavanja

Vođenjem i automatizacijom procesa toplinskog naštrcavanja moguće je postići odličnu ravnomjernost i jednolikost naštrcane prevlake. Kod izrade uzoraka korišten je višenamjenski industrijski robot koji je automatski upravljani (programabilan) s otvorenim kinematičkim lancem sa 6 stupnjeva slobode gibanja tipa Yaskawa Motoman MC2000 s pripadajućim kontrolerom NX 100 [slika 21.].



**Slika 21. Industrijski robot Yaskawa Motoman MC2000 s pripadajućim kontrolerom NX 100 koji je korišten za manipulaciju pištolja kod toplinskog naštrcavanja [36]**

### 3.1.3. Osnovni i dodatni materijal

#### 3.1.3.1. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal u oba slučaja je korištena superlegura Inconel IN617 kemijskog sastava (cca):

- Ni
- Cr 20 – 24 %
- Co 10 – 15 %
- Fe do 3 %
- Al 0,8 – 1,5 %
- Ti do 0,6 %
- Si do 0,5 %
- Mg do 0,5 %
- Cu do 0,5 %
- C 0,05 – 0,15 %
- B do 0,006 %
- P do 0,015 %
- S do 0,015 %.

#### 3.1.3.2. Dodatni materijal

Dodatni materijal kod naštrcavanja TBC prevlake APS postupkom je dan u tablici 5.:

**Tablica 5. Korišteni materijal praha za naštrcavanje TBC prevlake APS postupkom**

TBC prevlaka	Prah	Komercijalno ime	Proizvođač	Specifikacija
Vezni međusloj	SL20 (MCrAlY)	Amperit 418.115	H.C. STARCK	-
Gornji sloj	Cirkonijev dioksid (ZrO <sub>2</sub> )	Amperit 827.006	H.C. STARCK	-

Dodatni materijal kod naštrcavanja Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> prevlake otporne na trošenje HVOF postupkom je dan u tablici 6.:


**Tablica 6. Korišteni materijal praha za naštrcavanje sloja otpornog na trošenje HVOF postupkom**

Prevlaka otporna na trošenje	Prah	Komercijalno ime	Proizvođač	Specifikacija
	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Amperit 584.054	H.C. STARCK	HTCT 650563

### 3.1.3.3. Karakteristike praha za naštrcavanje

U tablici 7. je prikazana analiza kemijskog sastava i veličine čestica praha za naštrcavanje veznog međusloja SL-20 (NiCrAlSiTaY) kod APS naštrcavanja TBC prevlake:

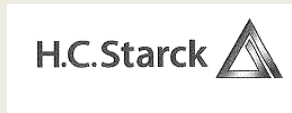
**Tablica 7. Karakteristike SL-20 praha za naštrcavanje**

Proizvođač: 	Karakteristike (kemijski sastav i veličine čestica) praha	Jedinica	Vrijednost	Donja granična vrijednost	Gornja granična vrijednost
Materijal 1020500, AMPERIT ® 418.115 NiCrAlSiTaY, SL-20, - plinski atomiziran, PE boca 2,5 l / CB 40	Cr	%	25,2	24,0	26,0
	Al	%	5,7	5,0	6,0
	Si	%	2,5	2,4	3,0
	Y	%	0,57	0,45	0,8
	Ta	%	0,9	0,8	1,2
	C	%	0,02	-	0,03
	O	ppm	110	-	400
	N	ppm	100	-	100
	ROTAP > 75 µm	%	0	-	5
	ROTAP ≤ 75 µm > 45 µm	%	94	90	-
	ROTAP ≤ 45 µm	%	5	-	5
	Ni = balans				

Laboratorijska analiza uzorka praha SL-20 pokazuje da su vrijednosti kemijskog sastava i veličine čestica praha unutar traženih vrijednosti navedenih u specifikaciji praha. Ovu analizu je priložio proizvođač kao dokaz kvalitete praha za naštrcavanje, a laboratorijska ispitivanja je izradio ovlaštenu i neovisnu laboratoriju.

Tablica 8. prikazuje analizu kemijskog sastava i veličine čestica praha  $ZrO_2$  koji je korišten pri APS naštrcavanju gornjeg sloja TBC prevlake:

**Tablica 8. Karakteristike  $ZrO_2$  praha za naštrcavanje**


<b>Proizvođač:</b> 	<b>Karakteristike (kemijski sastav i veličine čestica) praha</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Vrijednost</b>	<b>Donja granična vrijednost</b>	<b>Gornja granična vrijednost</b>
Materijal 1021118, AMPERIT® 827.006 $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ 93-7, - sinteriran aglomerizacijom, PE boca 2,5 l / CB 40, Ugovorena specifikacija PD5242/00	$Y_2O_3$	%	8	7	9
	$HfO_2$	%	1,8	-	2,0
	$SiO_2$	%	0,0	-	0,5
	$TiO_2$	%	0,1	-	0,4
	$Al_2O_3$	%	0,1	-	0,2
	$Fe_2O_3$	%	0,0	-	0,3
	MICROTR.SRA ≤ 176 μm	%	100	100	-
	MICROTR.SRA vol.distri. 90 %	μm	118	107	125
	MICROTR.SRA vol.distri. 50 %	μm	75	68	77
	MICROTR.SRA vol.distri. 10 %	μm	43	39	49
	Gustoća, Hall	$g/cm^3$	2,4	2,2	2,4
$ZrO_2$ mono. (prema PWA)	% (V)	< 1	-	6	



Prah za naštrcavanje na bazi  $ZrO_2$  ima karakteristične veličine kemijskog sastava i volumnih udjela unutar traženih vrijednosti specifikacije.

Tablica 9. prikazuje karakteristike praha  $Cr_3C_2-NiCr$  koji se koristio za prevlačenje uzoraka HVOF postupkom kako bi se dobila prevlaka s povišenom otpornošću na trošenje:

**Tablica 9. Karakteristike  $Cr_3C_2$  praha za naštrcavanje**

<b>Proizvođač:</b> 	<b>Karakteristike (kemijski sastav i veličine čestica) praha</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Vrijednost</b>	<b>Donja granična vrijednost</b>	<b>Gornja granična vrijednost</b>
Materijal 1021070, AMPERIT® 584.054 $Cr_3C_2-NiCr$ 75-25, - sinteriran aglomerizacijom, PE boca 2,5 l / CB 40, Ugovorena specifikacija PD4036/05	Ni	%	19,4	18,0	22,0
	C total	%	9,5	9,0	11,0
	O	%	0,14	-	0,60
	Fe	%	0,14	-	0,50
	MICROTR.SSRA $\leq 176 \mu m$	%	100	100	-
	MICROTR.SSRA vol.distri. 90 %	$\mu m$	53	53	61
	MICROTR.SSRA vol.distri. 50 %	$\mu m$	35	30	38
	MICROTR.SSRA vol.distri. 10 %	$\mu m$	22	18	22
	AIRJET $> 45 \mu m$	%	2	-	5
	AIRJET $\leq 10 \mu m$	%	1	-	2
	Gustoća, Hall	$g/cm^3$	2,7	2,3	3,0
Cr = balans					

Sve karakteristične veličine analiziranog uzorka praha odgovaraju specifikaciji i certifikatu kojim proizvođač garantira kemijski sastav i morfologiju određenog praha za naštrcavanje.

## 3.2. Tehnologija naštrcavanja

Tehnologijama APS i HVOF naštrcavanja su odgovarajućim tehnološkim parametrima naštrcani uzorci koji su zatim laboratorijski analizirani i mjereni. Kod analize i mjerenja su korištene normirane i općeprihvaćene metode laboratorijskih ispitivanja prema kojima su i izrađeni standardizirani uzorci. Prije samog naštrcavanja je potrebna temeljita i ispravna priprema površine kako bi se postiglo poželjno stanje površine koje bi omogućilo dobro prianjanje sloja na osnovni materijal.

### 3.2.1. Priprema podloge za naštrcavanje

#### 3.2.1.1. Pjeskarenje ili sačmarenje

Kako bi se postiglo određeno povoljno ohrapavljenje površine i skinuli eventualni korozijski produkti i druge nečistoće provodi se postupak sačmarenja. Parametre sačmarenja i sredstva za sačmarenje je potrebno uskladiti sa zahtjevima pojedinog postupka toplinskog naštrcavanja.

Prije samog sačmarenja se provelo odmašćivanje acetonom kako bi se smanjila mogućnost utiskivanja masnoća ili drugih nečistoća u površinu te se zatim provelo sačmarenje površine. Svi uzorci su sačmareni istim parametrima i na isti način kako bi se izbjegle razlike u pripremljenosti površine pojedinih uzoraka.

#### 3.2.1.2. Odmašćivanje

Radni komadi su prije i poslije postupka sačmarenja podvrgnuti odmašćivanju kako bi se površina očistila od masnoća koje bi mogle kasnije loše utjecati na prionljivost same prevlake na osnovni materijal. Postoji puno sredstava za odmašćivanje [tablica 10.], a u konkretnom slučaju se koristio aceton koji ima dobru sposobnost odmašćivanja te je jeftin i lako nabavljiv.

Tablica 10. Značajke važnijih otapala za odmašćivanje [4]

Nazivi	Formula ili sastav	Vrelište (°C)	Gustoća (g / cm <sup>3</sup> )	Napomena
Aceton (propanon, dimetilketon)	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	56	0,79	Lako zapaljiv, miješa se s vodom
Alkohol (etanol, etilni alkohol)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	79	0,79	Lako zapaljiv, miješa se s vodom
Benzin za čišćenje (ekstrakcijski benzin)	Smjesa alifatskih ugljikovodika	80 do 130	0,68 do 0,71	Lako zapaljiv
Perkloretlen (per, tetrakloretlen, tetrakloretan)	CCl <sub>2</sub> =CCl <sub>2</sub>	121	1,59	Nezapaljiv, slab narkotik, prikladan za Al, ekološki štetan
Petrolej (parafinsko ulje, kerozin)	Smjesa alifatskih ugljikovodika	150 do 250	0,80 do 0,82	Zapaljiv, sporo hlapi
trifluortrikloretan	CCl <sub>2</sub> F×CCl <sub>2</sub> F	48	1,57	Nezapaljiv, neotrovan, ekološki štetan, ugrožava ozonski sloj u atmosferi
trikloretan	CH <sub>3</sub> × CCl <sub>3</sub>	74	1,34	Nezapaljiv, neotrovan, ekološki štetan

### 3.2.1.3. Predgrijavanje

Predgrijavanje radnog komada se izvršilo tako da se robot s pištoljem (s uključenim plamenikom) pustio po definiranoj (isprogramiranoj) putanji s uključenim svim parametrima osim doziranja praha te se tako radni komad zagrijao na dovoljnu temperaturu. U praksi se pokazalo da ovakav način predgrijavanja daje dobre rezultate, te je moguće ostvariti željeni raspon temperatura koje su se u ovom slučaju kretale između 200 °C i 250 °C.

### 3.2.2. Parametri naštrcavanja

Tablica 11. prikazuje tehnološke parametre koji su korišteni kod APS postupka naštrcavanja uzoraka toplinskim barijernim slojem (TBC).

Tablica 11. Tehnološki parametri korišteni kod APS naštrcavanja TBC prevlake

TBC (Thermal Barrier Coating) prevlaka		
<b>Kemijski sastav:</b>	ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 93-07	
<b>Veličina čestica praha:</b>	45 ≤ 125 μm	
	<b>Značajka</b>	<b>Vrijednost i jedinica</b>
<b>Primarni plin (dušik):</b>	Pritisak:	6 ± 1 bar
	Protok:	40 ± 2 l/min
<b>Sekundarni plin (vodik):</b>	Pritisak:	5 ± 1 bar
	Protok:	4 ± 2 l/min
<b>Dozator praha:</b>	Pritisak plina nosioca:	2 ± 0,5 bar
	Protok praška:	100 ± 5 g/min
<b>Strujni parametri:</b>	Strujni intenzitet:	500 ± 10 A
	Napon na konzoli:	80 ± 5 V
	Napon na pištolju:	73 ± 4 V
<b>Zrak za hlađenje:</b>	Pritisak:	5 bar
<b>Učinkovitost nanošenja:</b>	7 g/dm <sup>2</sup> ·0,1 mm	
<b>Udaljenost naštrcavanja:</b>	100 ± 10 mm	

Tehnološki parametri korišteni kod HVOF postupka naštrecavanja su prikazani u tablici 12.:

**Tablica 12. Tehnološki parametri korišteni kod HVOF naštrecavanja  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  prevlake**

<b><math>\text{Cr}_3\text{C}_2</math> prevlaka otporna na trošenje</b>		
<b>Kemijski sastav:</b>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -NiCr 75-25	
<b>Veličina čestica praha:</b>	10 ≤ 45 μm	
	<b>Značajka</b>	<b>Vrijednost i jedinica</b>
<b>Gorivo (kerozin):</b>	Pritisak:	14 - 16 bar
	Protok:	22,7 ± 0,5 l/h
<b>Kisik:</b>	Pritisak:	18 - 22 bar
	Protok:	880 ± 50 l/min
<b>Dozator praha:</b>	Pritisak plina nosioca:	4 ± 0,5 bar
	Protok praška:	60 ± 5 g/min
<b>Zrak za hlađenje:</b>	Pritisak:	5 ± 2 bar
<b>Komora za sagorijevanje:</b>	8,1 +0,5 / -0,7 bar	
<b>Učinkovitost nanošenja:</b>	25 g/dm <sup>2</sup> ·0,1 mm	
<b>Udaljenost naštrecavanja:</b>	350 ± 10 mm	

Ako se parametri uspiju tokom cijelog procesa naštrecavanja zadržavati u okviru navedenih tolerancija, za očekivati je da će se postići željena mikrostruktura prevlake, a samim time i dobra svojstva naštrecanog sloja.

### 3.2.3. Dobiveni uzorci

Slika 22. i slika 23. prikazuju dobivene uzorke koji su zatim laboratorijski analizirani i ispitivani.



**Slika 22. Dobiveni uzorak TBC prevlake APS postupkom naštrcavanja**

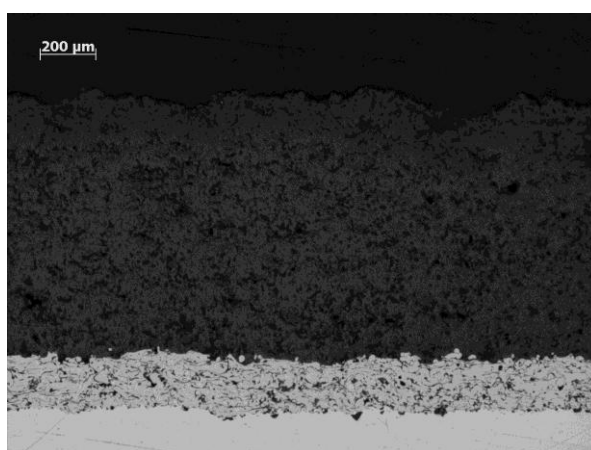


**Slika 23. Dobiveni uzorak Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> prevlake HVOF postupkom naštrcavanja**

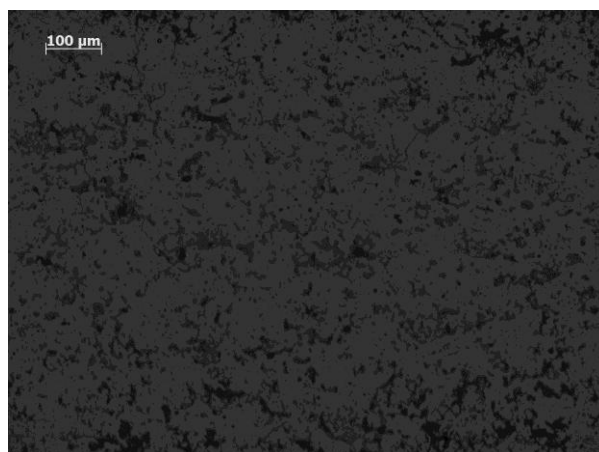
### 3.3. Ispitivanje svojstava naštrcanih slojeva

#### 3.3.1. Ispitivanje svojstava TBC prevlake

Slika 24. prikazuje dobivenu mikrostrukturu TBC prevlake naštrcane APS postupkom naštrcavanja. Daljnja ispitivanja uzoraka su izvršena te je analizom slike određena debljina međusloja i gornjeg sloja, okarakterizirano je sučelje osnovnog materijala i međusloja, određen je sadržaj pora, oksida i nitrida međusloja te je određena poroznost gornjeg sloja [tablica 13.].



a)



b)

**Slika 24. SEM slika poprečnog presjeka uzorka naštrcanog TBC prevlakom**

- a) Povećanje 50x
- b) Povećanje 100x

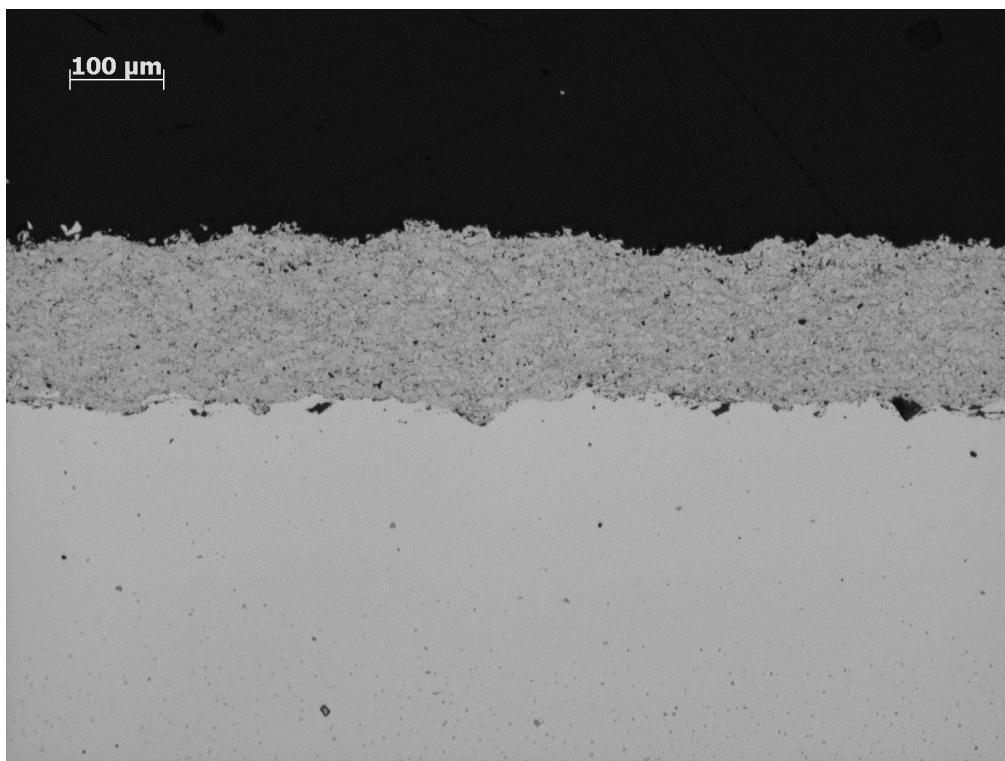
Tablica 13. Ispitivanja TBC prevlake na temelju SEM slike

Značajka	Povećanje	Zahtjevi prema specifikaciji	Vrijednost	U skladu sa zahtjevima
Debljina gornjeg sloja:	50X	700÷1000 $\mu$ m	<b>840</b> $\mu$ m	✓
Debljina veznog međusloja:	50X	100÷250 $\mu$ m	<b>156</b> $\mu$ m	✓
Greške vezanja na sučelju osnovnog materijala i međusloja: mjerena duljina 2 mm	100X	Max 40%	<b>24</b> %	✓
Poroznost, oksidi, nitridi međusloja (%):	100X	≤ 25 %	<b>10</b> %	✓
Poroznost TBC prevlake (%):	100X	10% ÷ 20 %	<b>19</b> %	✓



### 3.3.2. Ispitivanje svojstava $\text{Cr}_3\text{C}_2$ prevlake

Slika 25. i tablica 14. prikazuju mikrostrukturu dobivene prevlake na reprezentativnom uzorku, a na temelju te mikrostrukture su izvršena mjerenja i ispitivanja analizom slike kako bi se odredila određenih svojstva naštrcane prevlake  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  na osnovni materijal.



Slika 25. SEM slika poprečnog presjeka uzorka naštrcanog  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  prevlakom

Tablica 14. Ispitivanje  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  prevlake na temelju SEM slike

Značajka	Povećanje	Zahtjevi prema specifikaciji	Vrijednost	U skladu sa zahtjevima
Ravnomjernost nanošenja prevlake:	<b>100X</b>	Ravnomjernost	<b>Ravnomjerno</b>	✓
Debljina prevlake:	<b>100X</b>	150÷200µm	<b>155 µm</b>	✓
Poroznost (%):	<b>200X</b>	Max. 5%	<b>1 %</b>	✓
Stanje sučelja osnovnog materijala i sloja:	<b>200X</b>	Max. 40%	<b>21 %</b>	✓

Također, izmjerena je mikrotvrdoća prema Vickersu te su rezultati uspoređeni sa zahtjevima prema specifikaciji. Rezultati su dani prema tablici 15.:

**Tablica 15. Mjerenje tvrdoće (prema Vickersu) uzorka naštrcanog Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> prevlakom**

<b>Test tvrdoće prema Vickersu</b>	
Primijenjeno opterećenje:	2,9 N (300 g)
Vrijeme trajanja narinutog opterećenja:	15 s
<b>Značajka</b>	<b>Vrijednost</b>
Mjerenje 1	876 HV 0,3
Mjerenje 2	713 HV 0,3
Mjerenje 3	890 HV 0,3
Mjerenje 4	792 HV 0,3
Mjerenje 5	890 HV 0,3
Mjerenje 6	716 HV 0,3
Mjerenje 7	837 HV 0,3
Mjerenje 8	849 HV 0,3
Mjerenje 9	876 HV 0,3
Mjerenje 10	890 HV 0,3
Izmjerena (tj. izračunata) prosječna tvrdoća prevlake:	832 HV 0,3
Tražena minimalna prosječna tvrdoća prevlake prema specifikaciji:	-
Izmjerena minimalna tvrdoća prevlake:	713 HV 0,3
Tražena minimalna tvrdoća prevlake prema specifikaciji:	700 HV 0,3
Izmjerena maksimalna tvrdoća prevlake:	890 HV 0,3
Tražena maksimalna tvrdoća prevlake prema specifikaciji:	1200 HV 0,3
Rezultat:	✓

### **3.4. Analiza i usporedba naštrcanih slojeva u odnosu na dobivene rezultate ispitivanja**

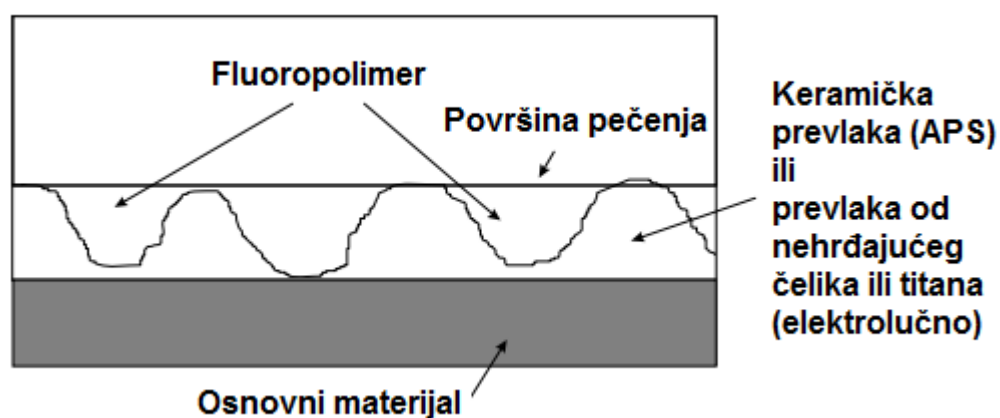
Analiza slika mikrostrukture i ispitivanja dobivenih uzoraka su pokazala da su tehnološki parametri korišteni tijekom naštrcavanja dobro odabrani jer su dobiveni rezultati analiza i ispitivanja usporedivi i u većoj mjeri se podudaraju sa sličnim primjerima iz literature. Tehnološki parametri su odabrani na temelju baze podataka i iskustva operatera. Baza podataka i iskustvo su od velike važnosti jer za svaki od navedenih postupaka toplinskog naštrcavanja postoji veliki broj ulaznih parametara koji direktno utječu na svojstva naštrcanog sloja i koje treba međusobno uskladiti kako bi se dobila upravo željena svojstva kod određene primjene. Također, za pravilan odabir parametara je potrebno teoretsko znanje o načinu formiranja prevlake te njezinoj interakciji s osnovnim materijalom.

Dobiveni naštrcani slojevi imaju mikrostrukturu i svojstva u granicama postavljenih zahtjeva prema specifikaciji. Iako, za cjelokupnu evaluaciju dobivenih uzoraka bi trebalo uzorke podvrgnuti dodatnim ispitivanjima (npr. određivanje otpornosti na trošenje, ispitivanje otpornosti na visoke temperature i koroziju itd.) kako bi se dobili sveobuhvatni rezultati i svojstva.

#### 4. MOGUĆNOSTI PRIMJENE APS I HVOF POSTUPAKA NAŠTRCAVANJA U PREHRAMBENOJ INDUSTRIJI

Budući da se primjena različitih postupaka toplinskog naštrcavanja proširila u gotovo sve grane industrije potrebno je utvrditi moguće primjene u prehrambenoj industriji u kojoj se dosadašnja primjena ovih postupaka svela tek na nekolicinu.

Kao najpoznatiji primjer toplinskog naštrcavanja u prehrambenoj industriji se može navesti plazmatsko i elektrolučno naštrcavanje različitih slojeva za zaštitu posuđa (npr. tave za pečenje i sl.) [slika 26.]. Plazmatsko naštrcavanje tankih keramičkih prevlaka, na koje se zatim nanosi i sloj fluoropolimera koji penetrira u pore keramičke prevlake, bitno povećava radni vijek korištenja posuđa. Kod elektrolučnog naštrcavanja se kao dodatni materijal za naštrcavanje koristi pretežno nehrđajući čelik ili titan koji se također dodatno impregnira slojem fluoropolimera.



**Slika 26. Primjer korištenja postupaka toplinskog naštrcavanja u prehrambenoj industriji [35]**

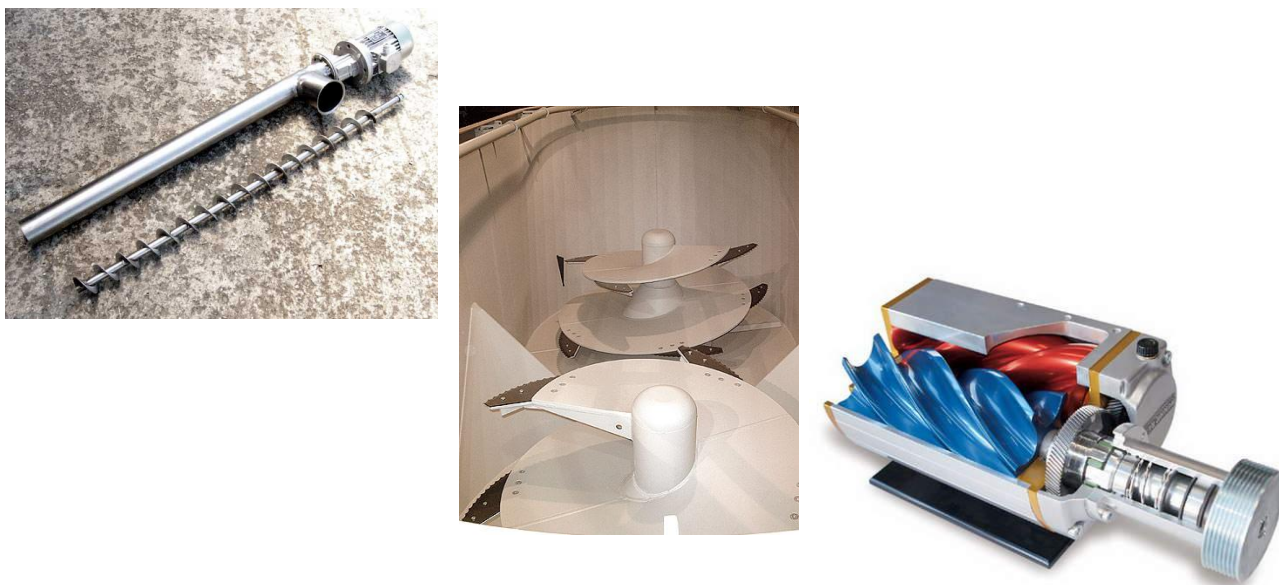
Naravno, kod naštrcavanja slojeva postupcima toplinskog naštrcavanja u prehrambenoj industriji se trebaju koristiti samo materijali koji zadovoljavaju uvjete koje propisuju posebni propisi. U prvom redu, prevlaka mora biti od materijala koji ne ugrožavaju zdravlje i sigurnost ljudi (i životinja) te bi nanešena prevlaka u kontaktu s prehrambenim proizvodima

morala imati vrlo glatku površinu kako bi se maksimalno smanjilo nakupljanje organskih tvari te omogućilo čišćenje i dezinficiranje.

Kod dijelova strojeva koji nisu u direktnom dodiru s prehrambenim proizvodima nema ograničenja za primjenom APS i HVOF postupaka, pa se primjerice za reparaturu tih dijelova mogu koristiti upravo ovi postupci. U obzir treba uzeti samo ekonomsku isplativost kod primjene.

Trebalo bi također ispitati isplativost primjene APS i HVOF postupaka naštrcavanja kod zaštite npr. pužnih transportera, raznih miješalica za hranu (tijesto, stočnu hranu...), dijelova ili kućišta preša ili pumpi koji su u doticaju s agresivnim medijima (prirodnim kiselinama), dijelova konvejera, vijčanih separatora i sl. [slika 27.].

Budući da je kod većine dijelova u prehrambenoj industriji konstrukcijski materijal nehrđajući čelik, potrebno je koristiti dodatne materijale koji uz kompatibilnost za prehrambenu industriju imaju i mogućnost dobre interakcije s nehrđajućim čelikom ili koristiti nehrđajući čelik kao dodatni materijal za naštrcavanje.



**Slika 27. Mogući primjeri upotrebe APS i HVOF postupaka naštrcavanja u prehrambenoj industriji**

## 5. ZAKLJUČAK

Jedan od najvažnijih postupaka modificiranja i prevlačenja površina jest toplinsko naštrcavanje materijala. Ovaj postupak možemo definirati kao tehnologiju fizikalne metalizacije kod koje se velikom brzinom na površinu obratka nanose kapljice rastaljenog materijala. Dobiveni slojevi su manje debljine u odnosu na osnovni materijal te poboljšavaju površinska svojstva tog materijala dok sam materijal mora biti sposoban izdržati opterećenja koja se javljaju u realnoj primjeni.

Najčešće se prevlače metalni materijali i keramike, a kao dodaci za naštrcavanje se mogu koristiti svi metali, ali i nemetali koji imaju tekuću rastaljenu fazu pri normalnom tlaku ili nemetali koji u kombinaciji s drugim materijalima koji imaju tekuću fazu stvaraju matricu. Dodatni materijal za naštrcavanje je najčešće u obliku praha i žice, neovisno o postupku naštrcavanja.

Prije toplinskog naštrcavanja je potrebno pripremiti površinu osnovnog materijala kako bi se osigurala dobra adhezija naštrcanog sloja.

Postupci APS i HVOF naštrcavanja se koriste za najzahtjevnije primjene gdje se traži odlična otpornost na trošenje, otpornost na koroziju i visoke temperature, a ovim postupcima se dobivaju prevlake s najboljom mikrostrukturom, a time i svojstvima.

Tehnološke parametre kod APS i HVOF postupaka toplinskog naštrcavanja je potrebno optimizirati kako bi se dobila što bolja svojstva naštrcane prevlake. Kemijski sastav dodatka za naštrcavanje i tehnologija tj. postupak koji se koristi imaju najveći utjecaj na samu strukturu i svojstva dobivene prevlake, a neke od ostalih karakteristika nanešene prevlake koje su vrlo bitne su debljina prevlake, gustoća prevlake, poroznost, čvrstoća prijanjanja prevlake itd.

Glavna prednost APS postupka je njegova univerzalnost odnosno mogu se nanositi gotovo svi materijali, a posebno je ovaj postupak pogodan za naštrcavanje materijala s visokim talištem poput keramičkih i vatrostalnih materijala.

HVOF postupkom se dobivaju izuzetno dobre prevlake koje se odlikuju malom poroznošću i velikom adhezijom naštrcanog sloja na osnovni materijal. Ovim postupkom je moguće postići najbolje karakteristike prevlaka u usporedbi s drugim postupcima toplinskog naštrcavanja.

Utvrđivanjem optimalnih tehnoloških parametara procesa naštrcavanja moguće je postići željena svojstva naštrcanog sloja, a optimalne performanse i svojstva pojedine prevlake ovise o njezinoj mikrostrukturi i samoj interakciji sustava prevlaka/podloga.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada su APS i HVOF postupcima toplinskog naštrcavanja prevučeni uzorci koji su zatim poslani na laboratorijsku analizu i ispitivanja gdje je okarakterizirana mikrostruktura dobivenih prevlaka te su dobiveni rezultati ispitivanja koji su uspoređeni s rezultatima sličnih ispitivanja iz literature. Dobiveni rezultati analiza mikrostrukture i ispitivanja svojstava prevlaka su zadovoljavajući što je dokaz da su korišteni optimalni parametri kod naštrcavanja.

Na kraju je razmotrena mogućnost proširenja područja primjene APS i HVOF postupaka u prehrambenoj industriji budući da je tehnologija ovih postupaka sve više dostupna za najrazličitije primjene.

## LITERATURA

- [1] Grilec, K.; Ivušić, V.: Tribologija, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2011.
- [2] Ivušić, V.: Tribologija, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 1998.
- [3] Filetin, T.: Izbor materijala pri razvoju proizvoda, FSB, Zagreb, 2006.
- [4] Esih, I.: Osnove površinske zaštite, FSB, Zagreb, 2003.
- [5] Filetin, T.; Grilec, K.: Postupci modificiranja i prevlačenja površina, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.
- [6] Gojić, M.: Površinska obradba materijala, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Sisak, 2010.
- [7] Glogović, Z.: Utjecaj parametara plinskog naštrcavanja na svojstva nanešenog sloja, doktorski rad, FSB, Zagreb, 2010.
- [8] Landek, D., Cajner, F.: Vježba – Postupci prevlačenja površina, Kolegij: Proizvodne tehnologije, FSB, Zagreb, ak. 2013./2014.
- [9] Vardelle, A.; Moreau, C.; Themelis, N. J.; Chazelas, C.: A Perspective on Plasma Spray Technology, Plasma Chem Plasma Process, DOI 10.1007/s11090-014-9600-y, Springer Science, 2014.
- [10] Fauchais, P.: Understanding plasma spraying, J. Phys. D: Appl. Phys. 37, 2004., str. 86. – 108.
- [11] Mohamed S. Morsi; Soha A. Abd El Gwad; Madiha. A. Shoeib; Khalid. F. Ahmed: Effect of Air Plasma Sprays Parameters on Coating Performance in Zirconia–Based Thermal Barrier Coatings, Int. J. Electrochem. Sci. 7, 2012., str. 2811 – 2831
- [12] L. Celko; V. Ricánková; L. Klakurková; T. Podrábský; E. Dvoráček; J. Švejcar: Changes in Microstructure of Air Plasma Sprayed M-CrAlY Coatings After Short Thermal Exposure in Argon Atmosphere, Acta Physica Polonica A, Vol. 120, 2011., str. 336. – 339.
- [13] Thomas Gnaeupel-Herold, Henry J. Prask, John Barker, Frank S. Biancaniello, Rodney D. Jiggetts, Jiri Matejcek: Microstructure, mechanical properties, and adhesion in IN625 air plasma sprayed coatings, Materials Science and Engineering A 421, 2006., str. 77–85



- [14] N. Hegazy, M. Shoeib, Sh. Abdel-Samea, H. Abdel-Kader: Effect of Plasma Sprayed Alumina Coating on Corrosion Resistance, Paper: ASAT-13-MS-14, 13th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology, ASAT- 13, 2009.
- [15] L. Swadźba, G. Moskal, B. Mendala, T. Gancarczyk: Characterisation of air plasma sprayed TBC coating during isothermal oxidation at 1100°C, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering - JAMME, Volume 21, 2007., str. 81. – 84.
- [16] Zhe Lu, Sang-Won Myoung, Yeon-Gil Jung, Govindasamy Balakrishnan, Jeongseung Lee, Ungyu Paik: Thermal Fatigue Behavior of Air-Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating with Bond Coat Species in Cyclic Thermal Exposure, Materials 2013, 6, str. 3387-3403
- [17] E.E. Kornienko, E.J. Lapushkina, V.I. Kuzmin, S.P. Vaschenko, I.P. Gulyaev, E.V. Kartaev, D.S. Sergachev, N Kashapov, S Sharifullin, I Fayrushin: Air plasma sprayed coatings of self-fluxing powder materials, Journal of Physics: Conference Series 567, 2014.
- [18] Bradley T. Richards, Haydn N.G. Wadley: Plasma spray deposition of tri-layer environmental barrier coatings, Journal of the European Ceramic Society 34, 2014., str. 3069–3083
- [19] K.W. David Hart, D.H. Harper, M.J. Gill, G.R. Heath: Case Studies in Wear Resistance Using HVOF, PTAW and Spray Fusion Surfacing, Eutectic Corporation Literature, 1997.
- [20] Maria Oksa, Erja Turunen, Tomi Suhonen, Tommi Varis, Simo-Pekka Hannula: Optimization and Characterization of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications, *Coatings* 2011., 1, str. 17-52
- [21] Oerlikon Metco: High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Solutions, Issue 6, <http://www.oerlikon.com/metco>
- [22] Sulzer Metco: High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Solutions, Issue 5, 2013.
- [23] B. Formanek, K. Szymański, A. Beliayev: Composite carbide powders and HVOF sprayed coatings with a plastic matrix, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Volume 18, Issue 1-2, 2006., str. 351 - 354
- [24] Erja Turunen: Diagnostic tools for HVOF process optimization, VTT Publications 583, ESPOO 2005.

- [25] Mingheng Li, Panagiotis D. Christofides: Modeling and Control of High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray: A Tutorial Review, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, Volume 18, Issue 5-6, str. 753-768
- [26] Adnan Al-Bashir, A. K. Abdul Jawwad, Khaleel Abu Shgair: Evaluating the Effects of High Velocity Oxy-Fuel (Hvof) Process Parameters on Wear Resistance of Steel-Shaft Materials, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Volume 3, Number 2, 2009., str. 157 - 160
- [27] Seiji Kuroda, Jin Kawakita, Takeshi Fukushima, Shogo Tobe: Importance of the Adhesion of HVOF Sprayed Coatings for Aqueous Corrosion Resistance, *Materials Transactions*, Vol. 44, No. 3, 2003., str. 381 - 388
- [28] Jit Cheh Tan: Optimisation of the HVOF Thermal Spray Process For Coating, Forming and Repair of Components, *Doktorska disertacija*, Dublin City University, School of Mechanical & Manufacturing Engineering, 1997.
- [29] Josep A. Picas, Miquel Punset, M. Teresa Baile, Enric Martí'n, Antonio Forn: Properties of WC-CoCr Based Coatings Deposited by Different HVOF Thermal Spray Processes, *Plasma Process. Polym.*, 2009, 6, str. 948–953
- [30] Tahar Sahraoui, Nour-Eddine Fenineche, Ghislain Montavon, Christian Coddet: Structure and wear behaviour of HVOF sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr and WC-Co coatings, *Materials and Design* 24, 2003., str. 309–313
- [31] Filetin, T.; Kovačićek, F.; Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, FSB, Zagreb, 2006.
- [32] Landek, D. : *Materijali i proizvodni postupci (autorizirana predavanja)*, FSB, ak. god. 2012./13.
- [33] Prusac, D.: *Otpornost na trošenje keramičkih prevlaka na aluminijskim pjenama*, magistarski rad, FSB, Zagreb, 2007.
- [34] Samardžić, I.; Marić, M.; Konjatić, P.: *Tehnologija naštrcavanja vagonskih osovina postupkom plamena gorivog plina*, Slavonski Brod, 2007.
- [35] <http://www.metallisation.com/applications/>
- [36] <http://www.motoman.com/datasheets/MC2000.pdf>

## **PRILOZI**

I. CD-R disc