

Toplinsko naštrcavanje materijala

Juričić, Matko

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:540366>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-09**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

MATKO JURIČIĆ
TOPLINSKO NAŠTRCAVANJE MATERIJALA

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, Srpanj 2021.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

TOPLINSKO NAŠTRCAVANJE MATERIJALA
THERMAL SPRAYING OF MATERIALS

ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Korozija i zaštita materijala

Mentor: dr. sc. Nikola Tomac

Student: Matko Juričić

Studijski smjer: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112065292

Rijeka, Srpanj 2021.

Student/studentica: **Matko Juričić**

Studijski program: **Brodostrojarstvo**

JMBAG: **0112065292**

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom

TOPLINSKO NAŠTRCAVANJE MATERIJALA

(naslov završnog rada)

izradio/la samostalno pod mentorstvom

dr.sc. Nikole Tomca

(prof. dr. sc. / izv. prof. dr. sc. / doc dr. sc Ime i Prezime)

te komentorstvom _____

stručnjaka/stručjakinje iz tvrtke _____

(naziv tvrtke).

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezao/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasan/na sam s trajnom pohranom završnog rada u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci te Nacionalnom repozitoriju Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

Za navedeni rad dozvoljavam sljedeće pravo i razinu pristupa mrežnog objavljivanja:

(zaokružiti jedan ponuđeni odgovor)

- a) rad u otvorenom pristupu
- b) pristup svim korisnicima sustava znanosti i visokog obrazovanja RH
- c) pristup korisnicima matične ustanove
- d) rad nije dostupan

Student/studentica

Matko Juričić

(potpis)

Ime i prezime studenta/studentice

MATKO JURČIĆ

SAŽETAK

Materijali koje smatramo kao konstrukcijske materijale u bilo kakvom obliku tvorevina, izloženi su slučajnim promjenama koje su štetne odnosno procesima i pojavama koje umanjuju njihovu vrijednost uporabe. Od konstrukcijskih materijala želimo izvući ono najbolje, a to je da imaju nisku cijenu, odlična svojstva obrade i dobra mehanička svojstva, te da istovremeno štite od korozije. Takve promjene zahvaćaju konstrukcijske materijale od trenutka njihovog dobivanja pa sve do otpreme na otpad ili recikliranje. Takvo oštećivanje konstrukcijskih materijala nastoji se usporiti ili spriječiti mjerama i postupcima posebne tehnološke discipline, zaštite materijala koja se obično naziva površinskom zaštitom u koju spada i tema ovog rada, a to je toplinsko naštrcavanje materijala.

Korozija je nenamjerni proces trošenja konstrukcijskih materijala uz pomoć kemijskog i biološkog djelovanja okoliša. Korozija je prirodni „namet“ na metalu koja uništava njega i njegove osobine. Ona može biti kemijska ili elektrokemijska, te može se pojaviti na jednom dijelu površine nekog metala ili čak cijelu njegovu površinu. Svi postupci koji se primjenjuju za zaštitu od korozije su veliki zagađivači okoliša. U današnje vrijeme mnogi postupci zaštite od korozije su zabranjeni zakonom zbog toga jer se u njima nalaze toksične tvari.

U uvodnom dijelu pobliže je objašnjena sama definicija toplinskog naštrcavanja. Detaljno su opisani značaji toplinskog naštrcavanja u nekima od grana industrije gdje se i primjenjuje spomenuti postupak. Navedene su podjele toplinskog naštrcavanja i njegove međusobne usporedbe s obzirom na korištenu opremu, a onda prema vrsti dodanog materijala i naposljetku prema korištenom toplinskom izvoru.

Ključne riječi: promjene konstrukcijskih materijala, korozija, toplinsko naštrcavanje materijala

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. NAMJENA TOPLINSKI NAŠTRCANIH SLOJEVA.....	2
3. OSNOVNI MATERIJALI	5
3.1. PRIKLADNI OSNOVNI MATERIJALI	5
3.2. POŽELJNO TOPLINSKI OBRAĐENO STANJE PRIJE OBRADJE.....	5
3.3. PRIPREMA POVRŠINE METALA ZA ZAŠTITU PREMAZIMA	5
4. MATERIJALI PREVLAKA.....	13
4.1. SAMOTEKUĆE LEGURE	13
4.2. ČISTI METALI	14
4.3. METALNI KARBIDI.....	16
4.4. METALNI OKSIDI.....	18
4.5. METALNE LEGURE.....	20
4.5.1. Metalne legure na osnovi željeza	20
4.5.2. Metalne legure na osnovi nikla i kobalta	21
4.5.3. Metalne legure na osnovi aluminijsa i bakra	24
4.6. POSEBNI MATERIJALI – SAMOPRILAGODLJIVI SLOJEVI	26
5. POSTUPCI MODIFICIRANJA POVRŠINE MEHANIČKOM OBRADBOM – PJESKARENJE	29
6. TOPLINSKO NAŠTRCAVANJE	34
6.1. VRSTE TOPLINSKOG NAŠTRCAVANJA	37
6.1.1. Plinsko naštrcavanje.....	37
6.1.2. Elektrolučno naštrcavanje	40

6.1.3. Plazma naštrcavanje	42
6.1.4. HVOF (High Velocity Oxy Fuel) naštrcavanje	44
7. ZAKLJUČAK	47
8. LITERATURA.....	48
9. POPIS SLIKA I TABLICA	49

1. UVOD

Zaustaviti ili usporiti proces korozije ili habanja jedino je moguće utjecanjem na faktore koji budu uzrok takvih djelovanja, a jedan od načina je zaštita naštrcavanja slojeva koje štite ili prevlaka. Takvim se načinom podloga zaštićuje od lošeg djelovanja atmosfere i okoliša.

Toplinsko naštrcavanje obuhvaćeno je postupcima kod kojih dodatke za naštrcavanje (žica ili prah) rastapaju u uređaju ili van njega za naštrcavanje i naštrcavaju se na radne površine obradaka. Pri tome neće doći do rastapanja površine obratka.

Sve postupke toplinskog naštrcavanja možemo razdijeliti prema vrsti dodataka za naštrcavanje, prema vrsti provođenja postupaka ili obično prema vrsti prenošenja energije (DIN 32530). Najveći značaj danas imaju plameno naštrcavanje (plameno naštrcavanje žicom ili prahom), visokobrzinsko plameno naštrcavanje, elektrolučno i plazmatsko naštrcavanje (atmosfersko plazmatsko naštrcavanje, plazmatsko naštrcavanje visoke snage, vakuumsko plazmatsko naštrcavanje).

Slojevi koji su toplinski naštrcani razlikovani su od slojeva koje se naštrcava drugačijim postupcima, prema strukturi, vezanja mehanizma i mogućnost naknadne obradbe. Stupanj koliko su porozni slojevi naštrcavanja ovisi o materijalima koji su prerađeni i po kakvim su postupcima provedena naštrcavanja. Debljine proizvodnih slojeva su u području od 10 μm pa do nekoliko milimetara. Prianjanje toplinski naštrcanih slojeva uglavnom je mehaničko, pri čemu čvrstoća prianjanja ovisi i o procesu te može biti više od 100 MPa. Opterećenje toplinskog obradka za vrijeme naštrcavanja slojeva ovisi o raznim postupcima i parametrima. Zagrijavanje materijala koji će se obrađivati može se zaustaviti na 100 °C uz pomoć naprava za hlađenje. Ponekad se materijali koje obrađujemo pregrijavaju zbog povećanja čvrstoće prianjanja. Naknadna obrada toplinski naštrcanih slojeva uz stezanje često je potrebna radi održanja mjera ili definirane kvalitete površine.

2. NAMJENA TOPLINSKI NAŠTRCANIH SLOJEVA

Postupci naštrcavanja prevlaka toplinskim nanošenjem proširili su se u daleku industrijsku tehnologiju.

Toplinski naštrcani slojevi upotrebljavaju se skoro u svim područjima industrije (zrakoplovna industrija, termoelektrane i hidroelektrane, postrojenja za spaljivanje otpada, auto industrija, strojogradnja, kemijska industrija, industrija stakla, papirna i tiskarska industriji i biotehnologija).

Slojevi koji su naštrcani toplinskim putem ispunjavaju zavisno o vrsti prevlake, strukture prevlake i postupku naštrcavanja sloja, a to je:

- Povećana otpornost na habanje (mehanizam abrazivnosti i adhezivnosti, odnosno protiv sljedećih vrsta trošenja: klizanjem, brazdanjem, mlazom i erozijom zbog djelovanja plina i tekućina);
- Korozivna zaštita (katodna zaštita protiv korozije Zn, Al i pasivna zaštita od korozije u određenim plinovima i tekućinama, kao što je upotrebom Inconel¹, Hastelloy² i čelika otpornih na koroziju i djelovanja kiselina);
- Visokotemperaturna oksidacija i korozivna zaštita
- Biokompatibilnost (zglobovi i proteze);
- Električna provodljivost ili izoliranost;
- Izolacija od topline
- Dobro ponašanje pri učenju na stroju
- Reparacija strojnih dijelova

Neke odabrane primjene prikazane su u tablici 1.

¹ Inconel je registrirani zaštitni znak tvrtke Special Metals Corporation za obitelj austenitnih super – legura na bazi nikla i kroma. Inconel legure su materijali otporni na oksidaciju i koroziju koji su pogodni za uporabu u ekstremnim uvjetima pod utjecajem pritiska i topline. Kada se zagrijava, Inconel formira gusti, postojani pasivni sloj oksida koji zaštićuje površinu od daljnjeg propadanja. Inconel zadržava čvrstoću u širokom temperaturnom rasponu, atraktivan za primjenu na visokim temperaturama gdje bi aluminij i čelik podlegli pužanju kao rezultat termički induciranih praznih mjesta kristala.

² Haynes International, Inc. sa sjedištem u Kokomo, Indiana, jedan je od najvećih proizvođača legura otpornih na koroziju i visoke temperature.

Tablica 1. Primjeri za upotrebu toplinskog naštrcavanja

Industrijsko područje	Dio
Auto industrija	Karike klipova Sinkroni prsten Vilice viljuškara Kućište alternatora Ventil
Avio industrija	Lopatice turbine Disk ventilatora Komora za izgaranje Štitnik topline Kućište
Opskrbe energijom	Cijev za toplinsku izmjenu Kotlovi Ventilatorska kola Lopatice plinske turbine Igla mlaznica Kaplanove turbine
Tiskovna industrija	Anilox valjci Transportni valjci i valjkaste preše
Industrija stakla	Kalupi za staklo Pokazivači od stakla
Industrija kućanskih aparata	Tava za pečenje Pegle – ploča
Strojogradnja	Pneumatski dijelovi Kućišta pumpi Hidraulični dijelovi
Kemijska i farmaceutska industrija	Kuglasti ventili Klizači Cijevi Spremnici

Izvor: [2]

Slika 1. Primjena toplinskog naštrcavanja u automobilskoj industriji



Izvor: [1]

Na slici 1. prikazana je turbina koja se koristi za prednabijanje zraka kod dizelskih i benzinskih motora. Kod takvih turbina toplinskim naštrcavanjem se naštrcava osovina zato jer se turbina vrti na jako visokim okretajima (preko 20 000 o/min).

Karakteristike nekih vrsta slojeva mogu se popraviti naknadnim obrađivanjem (rastaljivanje, užarivanje ili ispunjavanje pora).

Od manjih dijelova (isključeni rasuti dijelovi) pa sve valjaka čija je masa nekoliko tona, naštrcani slojevi mogu se naštrcavati na dijelove raznih dimenzija ako se dijelovi mogu pričvrstiti u odgovarajući prihvat.

Pri naštrcavanju materijala kod unutarnjih površina potrebno je zaključiti koji je najmanji unutrašnji promjer koji ovisi o postupku kao i omjere između promjera i dužine. Geometrija obradivog materijala mora biti pristupna za naštrcavanje sloja. Potrebno je pridržavati se pravila za konstruiranje dijelova na koje će se nanositi prevlake (DVS Merkblatt 2308³).

³ DVS Merkblatt 2308 su propisana pravila za oblikovanje dijelova i konstrukcijski preduvjeti za obradu tehničkim naštrcavanjem.

3. OSNOVNI MATERIJALI

3.1. PRIKLADNI OSNOVNI MATERIJALI

Svi su tehnički važni osnovni materijali prikladni, ukoliko su provedene odgovarajuće prethodne obrade. Najčešće se naštrcavaju čelici, lijevovi od željeza, titan i njegove legure, aluminijski materijali, nikal i njegove legure, materijali koji su izrađeni na osnovi kobalta i bakra, ali i keramika, a pod uvjetom drvo, staklo i plastika.

Ograničenja se odnose na opterećenje toplinskog osnovnog materijala i na vezu između naštrcanog sloja i materijala koji je osnovan u tome.

3.2. POŽELJNO TOPLINSKI OBRAĐENO STANJE PRIJE OBRADJE

Ne zahtijeva se određeno toplinski obrađeno stanje. Ipak, treba voditi računa o tome da je loše prethodno poboljšavati čelik ako se nakon toga još rastaljuje naštrcani sloj od samotekućeg. Izbor osnovnog materijala, njegovu toplinsku obradu i sloj koji se naštrcavanjem nanosi treba međusobno uskladiti. Nanošenje prevlaka na toplinsko – kemijski obrađeni osnovni materijal (nitriran, cementiran, boriran, itd.) samo je uvjetno moguće i treba ga izbjegavati.

3.3. PRIPREMA POVRŠINE METALA ZA ZAŠTITU PREMAZIMA

Priprema metalne površine sastoji se od uklanjanja sa nje onečišćenosti, masti, okaline, korozivnih produkata, premaza koji su zastarjeli, soli, kao i u neutralizaciji i uklanjanju baza i kiselina te svega ostalog što bi onemogućavalo vezivanje na površinu. Za učinkovitu zaštitu pomoću premaza nije dovoljno primijeniti kvalitetna premazna sredstva već se treba površina dobro pripremiti površina koja će se zaštićivati.

Mnogo puta se dogodi da je kvalitetnije kada je nanešeno manje premaza na dobro pripremljenu površinu nego više premaza naneseno na površinu koja nije pripremljena kako treba.

Pripremanje metalne površine može se izvoditi na tri osnovna načina:

- mehaničkim putem
- termičkom obradom
- kemijskim putem

Mehaničko putem možemo ostvariti:

- abrazivnim mlazom
- mehaničkim alatom
- ručnim alatom

Termičko čišćenje se sastoji u uklanjanju kovarine i produkata plamenom korozije

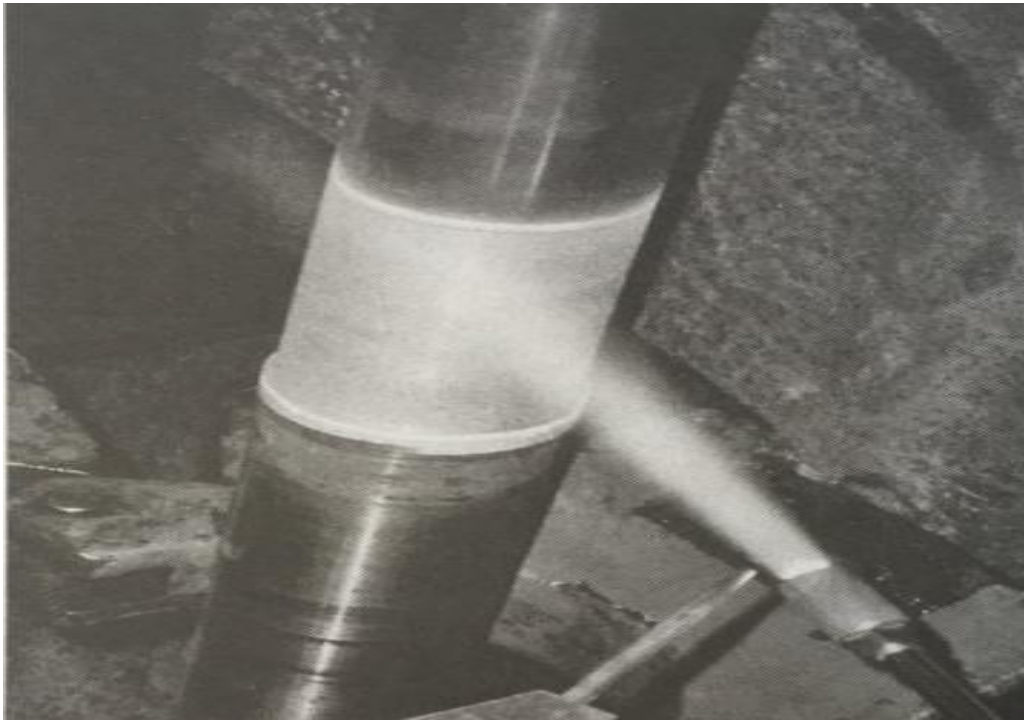
Kemijskim putem površinu možemo očistiti na sljedeće načine:

- odmašćivanjem
- fosfatiranjem
- nagrivanjem
- uklanjanjem starih premaza
- pripremanjem površine bez uklanjanja korozije
- izlaganjem pomoću djelovanja atmosfere

Zone zavara se pripremaju na poseban način.

Uz ove metode pripreme površine metala za zaštitu premazima mogla bi se svrstati privremena zaštita kao među operacija između pripreme za nanošenje i nanošenje premaza.

Slika 2. Prikaz pripreme površine predgrijavanjem prije toplinskog naštrcavanja



Izvor: [6]

Prije pripremanja površine radi zaštite premazima, najprije moramo ocijeniti kakvo je stanje površine tj. koje je njezino stanje korozivnosti.

Zависи od vrste i dimenzije objekta kojeg će se štiti, te od vrste premaza koji će se nanositi na nju. Kod objektivnih mogućnosti, treba pretpostaviti kvalitetu pripreme kojom će se površina zaštićivati. Nakon izvršene pripreme treba vidjeti da li je dobra kvaliteta pripremljene površine.

Stupanj zahrđalosti čelične površine i kvaliteta njene pripremljenosti za premazivanje zaštitnih premaza u svijetu su regulirani standardima kao što su:

- Svensk Standard SIS 055900,
- Deutsche Industrie – Norme DIN 18364,
- Deutsche Industrie – Norme DIN 55928, Teil 4,
- British Standard Specification BS 4232,
- ASTM D2200 – 67,
- SSPC Surface Preparation Specifications.

Među ovim standardima nema bitnih razlika, a neki se čak međusobno nadopunjuju.

Većina standarda se odnosi na toplo valjani čelik:

- Površine četiri stupnja zahrđalosti (A, B, C, D),
- Svake očišćene do drugog stupnja kvalitete (St 2 i St 3) ručnim ili mehaničkim alatom,
- Svake očišćene do četvrtog stupnja kvalitete (Sa 1, Sa 2, Sa 2 ½ i Sa 3) različitim abrazivnih mlazova.

Tablica 2. Stupnjevi zahrđalosti površine čelika

Stupanj zahrđalosti	Izgled površine čelika
A	Čelična površina je potpuno pokrivena okalinom koja prijanja i sa hrđom u ostacima- odgovara stanju čelične površine nakon valjanja
B	Čelična površina koja je krenula korodirati i sa koje je krenula otpadati okalina, paše stanju površine čelične površine koja je na otvorenom prostoru i nije zaštićena, te je 2-3 mjeseca bila izložena procesu relativno loše atmosfere
C	Čelična površina sa koje se okalina odvaja pod utjecajem hrđe nastale ispod nje, ili se može sastrugati, a malo pittinga vidi se i golim okom- agresivna atmosfera
D	Čelična površina sa koje se okalina počela odvajati nakon djelovanja hrđe i pitting se vidi golim okom- agresivna atmosfera

Izvor: [5]

Tablica 3. Kvaliteta pripreme površine čelika (stupnjevi očišćenosti)

Stupanj očišćenosti	Postupak čišćenja
St 2 ⁴	Detaljno struganje i mehaničko čišćenje; ovim postupkom se uklanjaju rastresita okalina, hrđa i strane tvorevine; na kraju, površina se čisti usisivačem, čistim, suhim komprimiranim zrakom ili čistom četkom; nakon toga čelik bi trebao dobiti blijedi metalni sjaj
St 3	Vrlo detaljno struganje i mehaničko čišćenje; poslije uklanjanja prašine površina bi trebala dobiti izraziti metalni sjaj
Sa 1	Lako čišćenje abrazivom; uklanja se rastresita okalina, hrđa i strane tvorevine
Sa 2	Detaljno čišćenje abrazivom sve dok se ne ukloni skoro sva okalina, hrđa, strane tvorevine; na kraju, površina se čisti usisivačem, čistim suhim komprimiranim zrakom ili čistom četkom; tada dobije sivkastu boju
Sa 2 ½ ⁵	Vrlo detaljno čišćenje abrazivom. Okalina, hrđa i strane tvorevine uklanjaju se do te mjere da preostali tragovi poslije uklanjanja prašine imaju izgled blagih zasjenčenja u obliku mrlja ili pruga
Sa 3	Čišćenje abrazivom do čistog metala; okalina, hrđa i strane tvorevine se pri tome potpuno uklanjaju; poslije uklanjanja prašine površina dobije jednoobraznu metalnu boju
PSa 2 ½	Primjenjuje se u slučajevima kada je dozvoljeno da djelomično ostanu premazi koji čvrsto prijanjaju za podlogu; izgled metalne površine poslije čišćenja abrazivom i uklanjanja prašine odgovara izgledu poslije čišćenja do Sa 2 ½
Fl	Čišćenje plamenom sve dok od stranih premaza, okaline i hrđe ne ostanu samo zasjenčenja različitih tonova; rastresiti ostaci se zatim uklanjaju ručno ili mehanički
Be	Prije kemijskog čišćenja stari premazi se moraju ukloniti; nagrizanjem se ostaci starih premaza, okaline i hrđe u potpunosti uklanjaju

Izvor: [5]

⁴ Stupanj očišćenosti St 1 nije opisan jer je od malog praktičnog značaja.

⁵ Iskustvo je pokazalo da često nije neophodno uklanjati okalinu, hrđu itd. onako detaljno kako je propisano Sa 3 stupnjem. Stupanj Sa 2 ½ u mnogim slučajevima sasvim zadovoljava te je ekonomičniji od Sa 3.

Kao mjerilo i ilustracija kvalitete očišćenosti površine čelika može se poslužiti sa prijelaznom otpornošću. Što je stupanj očišćenosti veći to je vrijednost otpornosti niža što je prikazano u tablici 4.

Tablica 4. Zavisnost između stupnja očišćenosti površine čelika i prijelazne otpornosti

Stupanj očišćenosti	Srednja vrijednost prijelazne električne otpornosti, Ω
Sa 1	1,0
Sa 1 do Sa 2	0,5
Sa 2	0,1
Sa 2 ½	0,05
Sa 3	0,05

Izvor: [5]

Tijekom skladištenja nezaštićenog čelika na otvorenom prostoru dolazi do zagađenja njegove površine agensima korozije, npr. SO₂, čija koncentracija s vremenom postaje sve veća.

Materijali sa izlaganjem djelovanju atmosfere pokazuju da je vijek trajanja zaštitnih premaza pri istim stupnjevima očišćenosti površine duži za početne stupnjeve zahrđalosti A i B, nego za C, a mnogo duži nego za D. Razlog tome je što se i najkvalitetnijom pripremom površine agensi korozije ne mogu iz nje potpuno ukloniti.

Stupanj zahrđalosti površine metala ispod premaza i kvaliteta premaza ocjenjuju se i mjere na različite načine. Osnovni kriteriji za ocjenu su postotak vidljive korozijom oštećene površine ili opći izgled premaza.

U tabelama 5 i 6 prikazana je usporedni pregled najčešće primjenjivih skala stupnjeva zahrđalosti ispod premaza i skale kvalitete premaza.

Linearna brojčana skala stupnjeva zahrđalosti SSPC – Vis 2-68T je ekspancijalna funkcija veličine zahrđale površine tako da mali početni postotak

zahrđalosti najviše utječe na snižavanje stupnja zahrđalosti, odnosno zaštitnog djelovanja premaza.

Tablica 5. Američka skala stupnja zahrđalosti površine čelika ispod premaza

Stupanj zahrđalosti	Opis
10	Zahrđalo manje od 0,01% površine
9	Tragovi hrđe, zahrđalo manje od 0,03% površine
8	Nekoliko izoliranih mjesta hrđanja, zahrđalo manje od 0,1% površine
7	Zahrđalo manje od 0,3% površine
6	Više mjesta hrđanja, zahrđalo manje od 1% površine
5	Zahrđalo manje od 3% površine
4	Zahrđalo manje od 10% površine
3	Zahrđalo manje od ¼ površine
2	Zahrđalo manje od ⅓ površine
1	Zahrđalo manje od ½ površine
0	Zahrđalo približno 100% površine

Izvor: [5]

Kvaliteta premaza je obrnuto razmjerna stupnju zahrđalosti (po DIN – u): što je manji stupanj zahrđalosti, premaz je kvalitetniji. U praksi, ako stupanj zahrđalosti prelazi Re 5 (ili je manji od 4 po ASTM – u), zaštita praktički više nije pouzdana. Period vremena dok kvaliteta premaza ne otpadne do PPE 5 smatra se vijekom zaštite premaza što je i prikazano u tablici 6.

Tablica 6. Europska i njemačka skala stupnja zahrđalosti površine i skala kvalitete premaza

Europska skala (1961)		Njemačka skala DIN 53210		Kvaliteta premaza
Stupanj zahrđalosti	Vidljiva zahrđala površina, %	Stupanj zahrđalosti	Vidljiva zahrđala površina, %	Stupanj PPE (Paint Protection Efficiency)
Re 0	0	Ri 0	0	10 (max.)
Re 1	0,05	Ri 1	0,05	9
Re 2	0,5	Ri 2	0,5	8
Re 3	1	-	-	7
Re 4	3	Ri 3	3	6
Re 5	8	Ri 4	8	5
Re 6	15 – 20	-	-	4
Re 7	40 – 50	Ri 5	40	3
Re 8	75 – 85	-	-	2
Re 9	95	-	-	1
Re 10	100	-	-	0 (min)

Izvor: [5]

Stanje premaza može se ocijeniti i na temelju broja i veličine plikova što je ujedno i jedan od najčešćih defekata u premazima.

Ocjena stanja premaza prema ovom kriteriju regulirana je vizualnim standardima DIN 53209 i ASTM D714 – 56.

4. MATERIJALI PREVLAKA

Dodatci koji su prikladni za naštrcavanje (postupak neovisan), prije svega prah i žica. Za dodatke kod toplinskog naštrcavanja, koriste se svi materijali koji su u tekućem rastopljenom stanju pri normalnim uvjetima tlaka.

Materijali koji nisu u tekućem rastopljenom stanju, kao npr. SiC, mogu se obrađivati u prikladnoj kombinaciji s drugim materijalima s rastaljenim tekućim stanjem koji stvaraju matricu..

Podjela žica je u skladu s DIN 8566. Tipični žičani dodaci za naštrcavanje su masivne žice (od nelegiranog, niskolegiranog ili visokolegiranog čelika ili od materijala koji nisu željezni kao: aluminij, bakar, cink, nikal i molibden, te njihove legure) kao i žice koje su punjene.

4.1. SAMOTEKUĆE LEGURE

Samotekuće legure (EN ISO 14920) su prihvaćene kao slojevi za zaštitu od trošenja u području proizvodnja motora, strojogradnja i proizvodnja postrojenja, kao i u području reparatura i imaju razne primjene u industriji. Ove legure imaju visoku otpornost na habanje, kao što je na abraziju i eroziju u kombinaciji sa dobrom otpornosti na koroziju.

Tehničko naštrcavanje samotekućih legura provodi se konvencionalnim plamenim postupcima, čiji su investicijski troškovi i troškovi procesa mali. Zbog poboljšanja tehnoloških svojstvi, prevlačenje se obavlja rastalnim procesom, čija temperatura leži između likvidus i solidus temperature legure. Radi takvog stanja, ovisno o temperaturama i vremenu držanja, u sloju dolazi do reakcija koje povoljno utječu na karakteristike sloja (prianjanje, porozivnost, tvrdoću, otpornost na trošenje i gustoću). Poboljšano prijanjanje sloja uz materijal koji je osnovan rezultat difuzije elemenata, čime nastaje metalurški spoj.

Primjenjiva se visokoabrazivno plameno naštrcavanje, pri čemu je izbjegljivo rastapanje. Prednost visokoabrazivnog plamenog naštrcavanja su ravnomjerna debljina nanosa i veća brzina nanošenja.

Prijašnja toplinska obrada materijal koji je osnovan smisljena je samo u nekim slučajevima, jer se toplinsko obrađeno stanje tijekom rastapanja izgubi. Kod primjenjivanja induktivnih procesa topljenja, samo u površinskim područjima zbog skin – efekta, dolazi do promjene toplinskog obrađenog stanja, zato kod primjene većih obradaka toplinski obrađeno stanje u unutrašnjosti ostane nepromijenjivo. Predgrijavanje površina koje se prevlače izvodi se malo prije prevlačenja. Temperatura se odabire ovisno o vrsti materijala sa kojim radimo, s time da treba izbjeći lokalno pregrijavanje.

Površinu koja se prevlači treba ju ohrapaviti prije prevlačenja. To se izvodi pjeskarenjem za to predviđenim strojem. Uvođenje međusloja moguće je, i treba izbjeći. Kod procesa rastapanja u sučeljenim zonama dolazi do dezoksidiranja, zbog čega se poboljšava prionljivost. Također je prisutna difuzija između sloja i osnovnog materijala, što također povećava prionljivost.

Za obradu samotekućih legura, radi malih financijskih troškova i malih troškova procesa, primjenjuju se niskoenergetski konvencionalni postupak plamenog naštrcavanja. Radni materijal koji se koristi za naštrcavanje dodava se u praškastom stanju (zrna veličine $< 106 \mu\text{m}$) u plamen koji stvara gorivi kisik/plin. Za gorivi plin se pretežno koristi acetilen (C_2H_2), koji ima najvišu temperaturu plamena ($3160 \text{ }^\circ\text{C}$), kao i najveću brzinu gorenja ($11,6 \text{ m/s}$). Zbog izbjegavanja oksidacije dijelova, plamen je podesiv tako da bude jednodimenzionalan. Može se primijeniti i proces visokobrzinskog plamenog naštrcavanja i tehnika plazmom.

Moguća debljina slojeva se kreće (nekoliko $10 \mu\text{m}$ - $1,6 \text{ mm}$). Samotekuće legure se pretežno primjenjuju u područjima habanja, a najčešće se upotrebljavaju debljine slojeva do 1 mm . Postižne slojevne debljine ovise o odabranoj leguri, zahtijevanoj kvaliteti sloja i dopuštenim zaostalim naprezanjima, koja se smanjuju s debljinom sloja.

4.2. ČISTI METALI

Kod područja čistih metala za toplinsko naštrcavanje bitniji su najprije metali kao što je: titan, aluminij, bakar, i molibden. Aluminij se najčešće upotrebljuje za zaštitu od korozivnosti i za bolju toplinsku provodljivost toplinske. Bakar se primjenjuje u područjima u kojima se zahtijeva električna provodljivost. Titan ima veliku ulogu u

područjima medicine, a molibden se najčešće koristi za zaštitu od habanja. Molibden posjeduje odlična svojstva u slučajevima abrazije, trošenja klizanjem i prisilnog klizanja kod nestanka podmazivanja. To se ne temelji isključivo na činjenici da kod naštrcavanja molibdena dio molibdena oksidira. Pritom poroznost sloja pomaže kao „rezerva sredstvu za podmazivanje“. Molibden je žilav i tvrd, a dalja je njegova prednost dobro prijanjanje uz tvrde površine osnovnog materijala. Ovisno o primjeni može se koristiti do oko 350 – 550 °C, s tim da više temperature treba izbjegavati jer mogu dovesti do uništenja sloja. Prerada molibdena kod toplinskog naštrcavanja odvija se pretežno postupkom konvencionalnog plamenog naštrcavanja žice, pri čemu je velika prednost ovoga postupka u razmjerno niskim investicijama i troškovima postupka. Dalji je postupak koji se primjenjuje plazmatsko naštrcavanje pri čemu se primjenjuje predoksidirani prah. Molibden se koristi kod prepravaka i reparatura te kod izrade novih proizvoda. Glavno područje primjene molibdena su dijelovi pumpi, prsteni cilindara, sinkroni prsteni, ventili, itd.

Kao osnovni materijal mogu se primijeniti svi čelici, nikal, te niklove legure, željezni izljevi, kao magnezij i aluminij odnosno njihove legure. Također se mogu primijeniti kositar i cink te pocinčani čelik. Primjena molibdena na bakru, bronci, staklu, keramici i kromiranim tj. nitriranim površinama je ograničena jer u takvim slučajevima treba provesti prethodna ispitivanja radi utvrđivanja njihove primjenjivosti.

Ne zahtijeva se određeno toplinski obrađeno stanje. Općenito, mogu se prevlačiti kaljene i pojačane površine, ako se iste mogu ohrapaviti. Prevlačenje molibdenom kemijsko-toplinski obrađenih površina, ovisi o vrsti difuzijskog sloja i njegovom nastajanju, nije moguće ili je tek uvjetno moguće.

Površinu pozicije na koju će se nanijeti prevlaka treba prethodno ohrapaviti. To se obično obavlja pjeskarenjem prikladnim sredstvima. Površina na koju se nanosi prevlaka mora biti odmašćena. Ovisno o osnovnom materijalu isti se prije prevlačenja može kratko predgrijati.

Za prerađivanje molibdena pretežno se primjenjuje plameno naštrcavanje žice. Materijal za naštrcavanje se u plamen dodaje u obliku žice. Za gorivi plin se uglavnom koristi acetilen (C_2H_2), a pri usporedbi s alternativnim plinovima on ima najvišu temperaturu plamena (3160 °C) i najveću brzinu gorenja (11,6 m/s). Za naštrcavanje molibdena također se primjenjuje plazmatsko naštrcavanje. Pritom se često upotrebljava

predoksidirani prah. Troškovi procesa su veći nego kod plamenog naštrcavanja žice. Nova istraživanja pokazuju da su visokobrzinska plamena naštrcavanja uvjeto prikladna za naštrcavanje molibdena, pri čemu poteškoću predstavlja rastaljivanje molibdenskog praha zbog njegova visokog tališta. Interesantna alternativa plamenom naštrcavanju žice u budućnosti bi nakon daljeg tehničkog razvoja opreme, moglo biti elektrolyčno naštrcavanje. Troškovi procesa pritom bi bili manji nego kod plamenog naštrcavanja. Moguće područje debljina slojeva kod plazmatskog naštrcavanja nalazi se u području od nekoliko mikrometara do maksimalno 0,7 mm, a mogu se proizvesti čak i još deblji slojevi.

Tijekom procesa prevlačenja, prije svega kod plamenog naštrcavanja žice, ne nastaju poteškoće vezane za održanje mjera i oblika. Kod tankostijenih obradaka i kod primjene plamenog naštrcavanja te posebice kod visokobrzinskog plamenog naštrcavanja treba osigurati dovoljno hlađenje. Naknadnu toplinsku obradu molibdena treba izbjeći. Ako je za postizanje određene hrapavosti potrebna obrada odvajanjem čestica, u pravilu se preporuča brušenje sloja sa SiC pri čemu kod brušenja ne smiju nastati iskre koje oštećuju sloj. Uz automatizirani posmak plamena mogu se uz primjenu prikladnih žica tj. prahova proizvesti debljine slojeva i konture u uskim tolerancijama. Molibden ima vrlo dobru otpornost na trošenje te se odlikuje niskim koeficijentom trošenja, dobrim kliznim svojstvima u slučaju nestanka podmazivanja štiti od zaribavanja i dobroj otpornosti na abraziju. Upravo se zbog spomenutih pozitivnih odlika koristi kod izrade strojnih dijelova koji se troše.

4.3. METALNI KARBIDI

Toplinske naštrcane prevlake s karbidima ugrađene u metalni kalup, su vrste prevlake koje prevladavaju na tržištu za zaštitu od trošenja. Od tehnike tvrdih metala poznati su određeni sustavi metal-karbid, zbog kojeg ograničene raspadljivosti jednog u drugom čine dobar temelj za tvrde faze u kalupu. Kemijski sastav karbida kao i njegov oblik i veličina u značajnoj mjeri određuju ponašanje kao trošenje sloja, a mogu se odabrati sukladno sa zahtjevima. Metalne se matrice odabiru ovisno o pojedinom slučaju, pri čemu su žilavost, otpornost na velike temperature i otpornost sloja na korozivnost u određenim granicama. Područje primjene slojeva od metalnih karbida je široko i zahvaća sva područja zaštite od trošenja klizanjem, abrazijom i erozijom. Za razliku od oksidno – keramičkih slojeva, metalni karbidi se upotrebljuju za dobivanje

debelih slojeva sa značajno povišenom čvrstoćom prijanjanja. Ograničenje primjene je temperatura uporabe, jer poglavito u oksidirajućoj atmosferi karbidi pokazuju ograničenu otpornost na toplinsko opterećenje. Ovakve vrste slojeva primjenjivaju se u gradnji turbina, proizvodnji i preradi čelika, u tiskarskoj i industriji papira kao i u građevinarstvu. Kod naštrcavanja na metalno – karbidne materijale dolazi do topljenja i rastapanja metalnih udjela bez prejakog toplinskog opterećenja karbida. Kod pregrijavanja karbida nastaju krhke faze, zbog kojih može doći do istrgnuća tvrdih djelića iz kalupa i time do loma sloja. Zbog velike kinetičke energije kod iskakanja djelića iz osnovnog materijala može doći do učinka očvrsnuća. Karbidi koji izlaze stvaraju vlastita tlačna naprezanja u plastično oblikovanim metalnim udjelima, tako da kod naštrcavanja nastaje jako gusti tvrdi nanos. Ovisno o materijalu i procesu naštrcavanja, u blizini površine osnovnog materijala može doći do očvrsnuća, a time može doći i do stvaranja međuslojeva između radnog materijala i sloja čija vlačna čvrstoća prijanjanja iznosi više od 100 MPa. Kao povoljan proces za raspršivanje metalnih karbida u zadnjih se pet godina ustalio proces visokobrzinskog plamenog naštrcavanja. Zavisno o vrsti karbida, kod plamenog je naštrcavanja moguće i rastapanje prevlake, pri čemu može doći do manjeg raspadanja karbida. Novi razvoj bavi se elektrolučnim naštrcavanjem metalnih karbida, pri čemu se rabe kombinacije tvrdih metala i spojeva u obliku punjene žice. U najčešće primjenjivane kombinacije materijala danas se ubrajaju kromovi ili volframovi karbidi u kobaltnoj, nikal-krom ili niklovom kalupu.

Kao osnovni materijali mogu se prevlačiti svi materijali i obratci koji su, osim toplinskom, izloženi i mehaničkom opterećenju. Pritom se u ovu grupu u strojogradnji ubrajaju svi tehnički upotrebljivi metali. Uvjetno se procesom naštrcavanja, posebice fokusiranim mlazom naštrcavanja, kod visokobrzinskog plamenog naštrcavanja obradak može ugrijati iznad 100°C. Pritom se utjecaj na osnovni materijal može isključiti odgovarajućim mjerama hlađenja. Kako se sloj metalnih karbida nakon nanošenja više ne rastaljuje, toplinski obrađeno stanje obratka mora u početku odgovarati konačnom željenom stanju. Površinu obratka prije prevlačenja treba očistiti od ulja, masti, hrđe i nečistoća. Dodatno ohrapavljenje tokarenjem ili pjeskarenjem korundnim alatima aktivira površinu i poboljšava prijanjanje sloja i osnovnog materijala.

Ovisno o postupku prevlačenja, moguće debljine slojeva su u području od oko 20 µm do više od 10 mm. S tehničkog gledišta (kao i ekonomskog) opravdane su debljine

slojeva između 100 i 500 μm . Kod debljih slojeva stupanj učinkovitosti nanošenja značajno pada.

4.4. METALNI OKSIDI

U odnosu na druge materijale, keramičko-oksidni nanosi zbog specifičnih svojstava nude niz potencijalnih prednosti za industrijsku upotrebu. Stoga keramički materijali u usporedbi s metalima često imaju bolju otpornost na koroziju, oksidaciju i trošenje. Većina takvih materijala podnosi više procesne temperature te su većinom dobri toplinski i električni izolatori. Značajno područje primjene keramičko-oksidnih materijala jest zaštita zahtjevnih pozicija od trošenja. Otpornost na trošenje oksidno – keramičkih materijala posebice se temelji na visokoj energiji vezanja i kemijskoj otpornosti. Profil karakteristika ovih materijala omogućio je posebno veliku primjenu u tiskarskoj industriji, a također za produljenje životnog vijeka transportnih valjaka.

Vrlo dobra kemijska otpornost oksidnih keramičkih vrsta na djelovanje niza agresivnih tekućina omogućuje primjenu u zaštiti od trošenja u industriji pumpi i armatura. Proces prevlačenja se, kao i svi postupci toplinskog naštrcavanja, odvija rastapanjem praškastih keramičko-oksidnih dodatnih materijala za naštrcavanje (koji se proizvode sinteriranjem ili drobljenjem) izvorom topline i nanošenjem rastopljenih tekućih čestica na površinu obratka. Značajna razlika u vođenju procesa jest u nanošenju tvrdih međuslojeva između oksidno – keramičkog pokrivnog sloja i, u pravilu metalne, gornje površine obradivog materijala. Ovi međuslojevi služe za izjednačavanje razlika u karakteristikama grupa materijala (npr. koeficijenta toplinskog rastezanja). Proizvodnja slojeva iz metanih oksida toplinskim naštrcavanjem u pravilu se odvija plamenim naštrcavanjem praha ili plazmatskim naštrcavanjem. Metalni oksidi se općenito odlikuju vrlo visokim talištima, zbog čega se postupci njihova naštrcavanja moraju odvijati uz uporabu izvora topline visoke temperature. Čvrstoća prijanjanja oksidnokeramičkih slojeva je općenito niža od čvrstoće prijanjanja metalnih slojeva ili slojeva od metalnih karbida. Posebno treba voditi računa o velikoj razlici svojstava između materijala keramičko-oksidnih slojeva i većine osnovnih metalnih materijala.

Tablica 7. Glavna područja primjene oksidno – keramičkih slojeva

Al_2O_3	Zaštita od trošenja, električna izolacija
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$	Zaštita od trošenja
Cr_2O_3	Zaštita od trošenja, zaštita od korozije
$\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$	Zaštita od trošenja, mali faktor trenja
$\text{TiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$	Zaštita od trošenja i korozije, toplinska postojanost
$\text{ZrO}_2\text{-TiO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$	Otpornost na koroziju zbog visokih temperatura i vrućih plinova, otpornost na promjene temperature, izolacija od topline

Izvor: [1]

Kao osnovni materijali se mogu koristiti svi materijali koji se procesom toplinskog naštrcavanja mogu nanositi metalnim ili metalno – karbidnim materijalima. To su u pravilu gotovo svi tehnički upotrebljivi materijali, koji imaju dovoljnu mehaničku i toplinsku stabilnost. Prevlačenje keramičkih i organskih materijala u industrijskoj praksi nije rašireno. Istraživanja prevlačenja takvih materijala utvrđuju da je, uz ispunjenje određenih preduvjeta, moguće provođenje i takvih postupaka. U procesu naštrcavanja može doći do zagrijavanja dijelova koji se prevlače na temperaturu višu od 100 °C. Pritom treba isključiti nedopustive štetne promjene osnovnog materijala (npr. promjenu strukture). Toplinsko obrađeno stanje treba odgovarati željenom toplinskom obrađenom stanju gotovog obratka. Toplinsku obradu obradka koji se naštrcavaju u pravilu treba izbjegavati. Pougličene ili nitrirane površine obradka ne mogu se naštrcavati. Površina obratka koji se prevlači u pravilu čisti se i aktivira pjeskarenjem, poslije toga se u pravilu naštrcava metalni, prijanjajući međusloj, na koji se naštrcava keramičko-oksadni sloj. Kao međuslojevi za bolje prijanjanje većinom se primjenjuju nikal – krom ili nikal – aluminijske legure. Takvi se međuslojevi se često naštrcavaju da bi se zaštitile od korozije površine koje se prevlače, jer keramičko-oksadini pokrivni slojevi, zbog svoje poroznosti, uglavnom pružaju razmjerno nizak stupanj zaštite od korozivnosti.

Postižno područje debljina nanosa nalazi se u redu veličina (10 μm do nekoliko milimetara). Podesive debljine sloja pritom ovise o primijenjenom dodatnom materijalu za naštrcavanje, kao i o primijenjenom postupku naštrcavanja i vođenju procesa.

Tehnički opravdano područje debljine slojeva pritom ovisi o pojedinom profilu zahtjeva. Kod slojeva za toplinsku zaštitu, primjerice, često je zahtjev najdeblji mogući sloj, a u slučaju slojeva za zaštitu od trošenja dovoljan je tanak sloj.

4.5. METALNE LEGURE

4.5.1. Metalne legure na osnovi željeza

Paleta legura na osnovi željeza koje se mogu naštrcavati vrlo je široka i to u obliku prahova i žica.

Od žica na osnovi željeza, primjenjivih za plameno naštrcavanje, odnosno elektrolučno naštrcavanje, prije svega su važne žice s visokim udjelom kroma (>13 % Cr) i krom – nikal žice, kao i žice od nelegiranog čelika. Žice od nelegiranog čelika se prije svega primjenjuju kod niskih zahtjeva na trošenje i u području reparatura dimenzija. Ovi su slojevi dobri za obradu odvajanjem čestica. Čelici s kromom primjenjuju se kod srednjeg do jakog abrazijskog habanja, a odgovarajuće debljine mogu pružiti i zaštitu od trošenja erozijom. Ovi se materijali, primjerice, upotrebljavaju kod reparature strojnih elemenata. Ako se kromni čelici naštrcavaju dovoljno debelo, imaju osrednju otpornost na koroziju, prvenstveno u vodenim medijima. Zbog zaostale poroznosti i oksidacije čestica koje se naštrcavaju, što se javlja kod plamenog i elektrolučnog naštrcavanja, svojstva ovih slojeva ipak nisu usporediva sa svojstvima osnovnog materijala jednakog sastava. Isto vrijedi i za žice od krom – nikal čelika. Stoga je njihovo područje primjene prvenstveno zaštita od korozije i trošenja. Pritom treba imati na umu da kod osnovnih materijala koji nisu otporni na koroziju i malih debljina slojeva (< 0,5 mm) treba provesti popunjavanje pora slojeva radi postizanja otpornosti na koroziju (inače postoji opasnost od korozije donjih slojeva). Prahovi koji su na osnovi željeza nanose se plamenim, plazmatskim ili visokobrzinskim plamenim naštrcavanjem. Pritom se najčešće upotrebljavaju krom – nikal i krom čelici. Postoji čitav niz spojeva: željezo – (krom) – (aluminij) – molibden, željezo – (molibden) – aluminij i željezo – nikal – aluminij. Krom – nikal čelici se uglavnom preporučuju za primjenu kod reparatura, za kavitacije kod niskih temperatura i srednju eroziju. Odabrani proces prevlačenja igra bitnu ulogu upravo kod korozije, jer ima odlučujući utjecaj na udio pora i oksida u sloju. Najbolja otpornost na koroziju krom – nikal čelika dobiva se procesom visokobrzinskog plamenog naštrcavanja. Spojevi željezo –

molibden u pravilu služe za zaštitu od trošenja na tvrdim ležajnim površinama, za zaštitu od abrazije i zaribavanja. Odlikuju se niskim faktorom trenja. Spojevi željezo – molibden – aluminij upotrebljavaju se za reparaciju koljenastih vratila. Spojevi željezo – krom – aluminij – molibden imaju dobru otpornost na djelovanje sumpornih atmosfera i otporni su na oksidaciju. Osim toga, upotrebljuju se u slučajevima kada je potrebna otpornost na abraziju, zaribavanje i kavitaciju, kao i za popravljivanje istrošenih čeličnih dijelova. Spojevi na osnovi nikal – aluminijska kod naštrcavanja reagiraju egzotermno i zbog toga dolazi do dobrog prijanjanja sloja uz osnovni materijal. Osim toga do temperature od 800 °C su otporni na oksidaciju.

Za osnovne materijale u obzir dolaze svi čelici, nikal i niklove legure, sivi i čelični lijevovi. Primjena legura na osnovi željeza na kromiranim, odnosno nitriranim ili lokalno otvrdnutim površinama je ograničena te u vezi s tim treba izvršiti odgovarajuće predpokus. Nije potrebno određeno toplinski obrađeno stanje. U principu, naštrcavati se mogu i zakaljane i poboljšane površine ukoliko se površina može ohrapaviti. Tvrdća osnovnog materijala ipak u većini slučajeva mora biti niža od 54 HRC. Kemijski-toplinsko obrađene površine, ovisno o vrsti difuzijskog sloja i njegovu nastanku, ne mogu se prevlačiti ili je to prevlačenje tek uvjetno moguće. Površinu obratka prije prevlačenja treba ohrapaviti. To se obično obavlja pjeskarenjem prikladnim sredstvima. Površinu obradivog materijala koji se prevlači prethodno treba odmastiti. Ovisno o osnovnom materijalu, prije prevlačenja osnovni materijal se može kratko i zagrijati.

Debljine slojeva kod elektrolučnog i plamenog naštrcavanja žice su nekoliko mikrometara do nekoliko milimetara, odnosno par centimetara. Plazmatskim, a poglavito visokobrzinskim plamenim naštrcavanjem iz ekonomskih se razloga nanose tanki slojevi. Pritom, ovisno o namjeni, područje debljine sloja do 2 mm još može biti opravdano.

4.5.2. Metalne legure na osnovi nikla i kobalta

Materijali za naštrcavanje koji su na osnovi nikla često su u praškastom obliku. Kod niklovog praha posebice se razlikuju materijali „slični Inconel – u“ kao primjerice, Ni-19Cr-18Fe-3Mo-1Co-1Ti ili Ni-21,5 Cr-8,5 Mo-3Fe-0,3 Co, kao i materijali na osnovi nikal – kroma, nikal – aluminijska, odnosno nikal – aluminij – molibdena, i materijali „slični Hastelloy – u“ kao, primjerice, Ni-20-Cr-10W-9Mo-4Cu-1C-1B. Osim toga, postoje materijali na osnovi NiCrAlY, odnosno NiCoCrAlY i samotekuće legure

na osnovi nikla s borom i silicijem. Osim praškastih materijala, od velikog su praktičnog značaja i žice na osnovi nikla, nikal – aluminijski i nikal – željezo – aluminij – kroma. Materijali „slični Inconel – u“ prvenstveno služe za reparaciju dijelova od Inconel – a, kao primjerice, lopatica od Inconel – a stacionarnih plinskih turbina. Takvi slojevi se obrađuju atmosferskim plazmatskim naštrcavanjem ili vakuumskim plazmatskim ili visokobrzinskim plamenim naštrcavanjem, a odlikuju vrlo dobrim ponašanjem u uvjetima oksidacije i korozije, posebice pri povišenim temperaturama. Materijali na osnovi nikal – kroma otporni su na oksidaciju te su, ovisno o kvaliteti slojeva, otporni na korozivne plinove do oko 980 °C. Primjenjuju se, primjerice, za sprečavanje razugljičenja niskolegiranih čelika u vrućoj atmosferi. Glavno područje primjene nikal – krom slojeva ipak jesu prijanjajući slojevi ispod pokrivnih slojeva koji loše prijanjaju, primjerice keramike. Za obradu nikal – krom materijala koriste se atmosferski postupci naštrcavanja praha. Za primjenu u korozivnim uvjetima ipak se preporučuje visokobrzinsko plameno naštrcavanje. Materijali na osnovi nikal – aluminijski isto se uglavnom upotrebljavaju kao prijanjajući slojevi ispod pokrivnih slojeva koji loše prijanjaju, primjerice keramike. Prijanjanje ovih slojeva se odvija uz egzotermnu reakciju kod naštrcavanja pri čemu nastaju niklovi aluminidi. Prah ili žica nikal – aluminijski obrađuje se u svim po stupcima naštrcavanja. Materijali na osnovi nikal – aluminijski upotrebljavaju se za zaštitu od oksidacije na temperaturama do 650 °C. Materijali na osnovi nikal – molibden – aluminijski prikladni su za srednje tvrde slojeve, za otvrdnjavanje ležaja i primjene u uvjetima trošenja. Slojevi su samoprijanjajući, izuzetno žilavi, odlikuju se dobrom otpornošću na eroziju i značajnom otpornošću na udar. Materijali „slični Hastelloy – u“ odlikuju se dobrom otpornošću na trošenje, a prije svega otpornošću na koroziju. Slojevi sadržavaju značajan udio amorfnih faza. Ove amorfne faze u kombinaciji s visokom kemijskom otpornošću elemenata u sloju te niskom poroznošću ovim slojevima daje dobru otpornost na koroziju prema agresivnim kiselinama i lužinama. Najbolje se karakteristike postižu kod postupaka visokobrzinskog plamenog naštrcavanja. NiCrAlY i NiCoCrAlY materijali su koji služe za zaštitu od visokotemperaturne korozije. Samotekuće legure imaju široku primjenu kod plamenog naštrcavanja praha i rastaljenih slojeva, za zaštitu od trošenja i korozije. Materijali za naštrcavanje na osnovi kobalta u pravilu se nanose u obliku praha. Pretežno se radi o CoCrAlY materijalima „sličnima Tribaloy – u⁶“ ili materijalima na

⁶ Tribaloy je trgovački naziv proizvoda firme Deloro Stellite Inc.

osnovi kobalta s visokim udjelom kroma i nikla. Za obradu ovih materijala koriste se atmosfersko, vakuumsko plazmatsko ili visokobrzinsko plameno naštrcavanje. CoCrAlY materijali služe za zaštitu od visokotemperaturne korozije. Materijali „slični Tribaloy – u“ (npr. Co-28Mo-8Cr-2Si ili Co-28Mo-17Cr-3Si) mogu se upotrebljavati do temperature od oko 750 – 800 °C i zbog niskog faktora trenja imaju odličnu otpornost na trošenje klizanjem i dobru otpornost na temperaturnu koroziju i oksidaciju. Ovi se slojevi uz određene preduvjete mogu upotrijebiti i u slučajevima gdje je nedovoljno podmazivanje ili isto uopće ne postoji. Slojevi se, ovisno o kvaliteti sloja, upotrebljavaju u reduktivnim atmosferama kao što su, primjerice, mravlja kiselina, sumporna kiselina, u oksidirajućoj atmosferi kao što je željezni klorid i neoksidirajućoj atmosferi kao što je octena kiselina. Općenito se pritom radi o slabim kiselinama. Za primjenu u korozivnim uvjetima preporuča se visokobrzinsko plameno naštrcavanje. Zatim treba provesti popunjavanje pora slojeva za zaštitu od korozije. Materijali na osnovi kobalta s velikim udjelom nikla i kroma primjenjuju se kod visokih temperatura između 540 i 840 °C, za zaštitu od abrazije, zaribavanja i erozije česticama.

U osnovi, mogu se primijeniti svi tehnički važni osnovni materijali, s time da na njima treba provesti odgovarajuće predobrade. Najčešće se prevlače čelici, nikal i niklove legure, titan i njegove legure i željezni ljevovi, kao i materijali na osnovi kobalta. Ograničenja nastaju radi temperaturnih ograničenja osnovnog materijala i, s druge strane, zbog veze između materijala sloja i osnovnog materijala. Prije prevlačenja nije potrebno nikakvo toplinski određeno stanje. U principu se mogu prevlačiti i kaljene i poboljšane površine ukoliko je moguće ohrapavljenje površine. Ipak, tvrdoća osnovnog materijala bi trebala biti niža od 54 HRC. Kemijski-toplinsko obrađene površine se, ovisi o vrsti difuzijskog sloja i njegovu nastajanju, ne mogu se naštrcavati ili je to naštrcavanje uvjetno moguće. Površina obratka koji se prevlači mora biti odmašćena i prije naštrcavanja treba ju ohrapaviti. To se obavlja pjeskarenjem prikladnim sredstvima.

Moguće debljine slojeva kod plamenog naštrcavanja žice i kod elektrolučnog naštrcavanja kreću se u području od nekoliko mikrometara do više milimetara. Postupkom plazmatskog naštrcavanja, a prije svega visokobrzinskim plamenim naštrcavanjem, iz ekonomskih se razloga nanose tanki slojevi. Područje debljine slojeva do 2 mm može, ovisno o upotrebi, još uvijek biti opravdano.

4.5.3. *Metalne legure na osnovi aluminija i bakra*

Postoji široki izbor materijala na osnovi bakra i aluminija, u obliku žice i praha, prikladnih za tehničko naštrcavanje. Toplinski naštrcani materijali na osnovi bakra i aluminija u pravilu se bez poteškoća mogu naknadno obrađivati odvajanjem čestica. Od bakrenih žica koje se mogu koristiti za plameno, odnosno elektrolučno naštrcavanje, ponajprije treba spomenuti žice od čistog bakra (čistoće 99,8 % Cu) kao i CuAl, CuZn i CuSn žice. Nelegirane bakrene žice pretežno se upotrebljavaju u elektroindustriji kao električni i toplinski provodljivi nanosi, te za reparaciju bakrenih dijelova. Daljnja je primjena kod proizvodnje dekorativnih bakrenih naštrcanih slojeva. Bakrene legure CuAl kao i CuZn koriste se, primjerice, prevlačenje kod kliznih površina. Slojevi dobiveni upotrebom tih žica u postupcima plamenog i elektrolučnog naštrcavanja odlikuju se debljinom i višom otpornošću na trošenje od tehnički čistog bakra, a istovremeno imaju dobra klizna svojstva. Glavna primjena bakrenih slojeva jest upotreba slojeva kao tarnih parova u kombinaciji s tvrdim nasuprotnim parom, npr. košuljicama ležaja. Tvrde čestice koje izazivaju trošenje u mediju za podmazivanje mogu prodrijeti u razmjeno meki bakreni materijal, a time ne izazivaju nikakvo dalje trošenje. Takvi tarni parovi općenito imaju dobra klizna svojstva kod nedostatnog podmazivanja. Klizna svojstva i iznosi tvrdoće toplinski naštrcanih bakrenih materijala u pravilu su bolji od kliznih svojstava i iznosa tvrdoća bakrenih materijala punog volumena. CuAl žice kod dovoljno debelih slojeva odlikuju se visokom otpornošću na koroziju. Na površini materijala stvara se tanki pokrivni sloj aluminijevog oksida (Al_2O_3). Dodani praškasti materijali na osnovi bakra obrađuju se visokobrzinskim plamenim naštrcavanjem, plazmatskim ili plamenim naštrcavanjem. Pritom prvenstveno treba spomenuti bakrene praškaste materijale i praškaste materijale na osnovi bakra i aluminija. Osim toga, postoje praškasti materijali na osnovi legura CuNi te CuNiIn. Područje primjene čistih bakrenih materijala, kao i legura bakra i aluminija, u osnovi je usporedivo s područjem primjene bakrenih žica. Kod plazmatskog naštrcavanja i visokobrzinskog plamenog naštrcavanja nastaju slojevi koji općenito imaju znatno nižu poroznost i posebice znatno niži udio oksida nego kod plamenog i elektrolučnog naštrcavanja. To može poboljšati svojstva materijala, npr. električnu vodljivost ili otpornost na koroziju. Plazmatski naštrcane legure na osnovi bakra i aluminija primjenjuju se u kavitacijskim opterećenim područjima kao što su pumpe, te kao i kod kliznih poluga, kao razmjeno mekani slojevi s dobrim kliznim svojstvima, a njihova je

primjena moguća i za brtve u kompresorima. Plazmatskim naštrcavanjem obrađene CuNiIn legure odlikuju se dobrom otpornošću na trošenje kao i malom „sklonošću zaribavanju“. Tipična primjena je u području turbina gdje je trošenje veliko, a istovremeno se zahtijeva otpornost na oksidaciju kod niskih temperatura. Praškasti Cu-Ni materijali imaju malu poroznost i općenito niski sadržaj oksida u sloju. Dodaci za naštrcavanje u obliku žice na osnovi aluminijske obuhvaćaju tehnički čisti aluminij (čistoće 99,0 %), ako i aluminijske legure poput AlMg. Glavno područje aluminijskih materijala za naštrcavanje žice, odnosno elektrolučno naštrcavanje, jest zaštita od korozije (katodna zaštita od korozije) dijelova koji su izloženi koroziji, npr. dijelova od nelegiranih čelika. Primjer je otpornost na koroziju u morskoj vodi i industrijskoj atmosferi te kod povišenih temperatura. Ovime se područje primjene jako širi u područje gradnje spremnika kao i pomorska postrojenja (off – shore). Kod upotrebe aluminijskih slojeva za katodnu zaštitu od korozije u pravilu nije potrebno provesti naknadnu obradu za popunjavanje pora. Naknadnim popunjavanjem pora, primjenom posebnih sustava, može se još povećati stupanj zaštite od korozije. U tehničkim primjenama iskorištava se električna i toplinska vodljivost kao i sposobnost refleksije naštrcanih aluminijskih slojeva. Kao praškasti dodatni materijali za naštrcavanje mogu se primjenjivati tehnički čisti tehnički aluminij, kao i AlSi legure eutektičkog sustava. Praškasti aluminijski materijali koji se najčešće obrađuju plazmatskim i visokobrzinskim plamenim naštrcavanjem imaju važnu primjenu u području zaštite od korozivnosti u industrijskim atmosferama i morskoj vodi. Osim toga je značajna električna i toplinska provodljivost nanosa. Uz ove, materijali se upotrebljavaju i za reparaciju legura na osnovi magnezija i aluminijske. AlSi legure se koriste u području turbinskih lopatica.

Kao osnovni materijali u obzir dolaze svi čelici, nikal i niklove legure, željezni lijevovi, aluminijski i bakreni materijali. U posebnim slučajevima koriste se i polimerni materijali, kao i stakla s bakrenim i aluminijskim slojevima. Primjena materijala na osnovi bakra i aluminijske na kromiranim, odnosno nitriranim ili lokalno otvrdnutim površinama moguća je samo uz ograničenja ili se moraju provesti predispitivanja provedbe tog postupka. Ne mora biti određeno obrađeno toplinsko stanje. U principu se mogu prevlačiti i kaljene i pojačane površine, ukoliko je moguće provesti ohrapavljenje površine. Tvrdća osnovnog materijala trebala bi biti niža od 54 HRC. Kemijsko-toplinske obrađene površine, ovisno o vrsti difuzijskog sloja i njegovu nastanku, se ne

mogu naštrcavati ili se mogu naštrcavati uz ograničenja. Prevlačenje plastike i stakla je također ograničeno i može se provesti samo bez ili uz manje ohrapvljenje. Prianjanje sloja na ovim osnovnim materijalima je bitno slabije nego kod konvencionalnih osnovnih materijala – ali ipak može biti zadovoljavajuće za određene namjene. Površina koja se prevlači treba ju ohrapviti prije obrade, a to se provodi pjeskarenjem prikladnim sredstvima. Površina dijela koji će se prevlačiti mora biti odmašćena. Ovisno o osnovnom materijalu, isti se može kratko predgrijati prije prevlačenja.

Debljine slojeva kod elektrolučnog i plamenog naštrcavanja žice su od nekoliko mikrometara do nekoliko milimetara, odnosno centimetara. Plazmatskim, a poglavito visokobrzinskim plamenim naštrcavanjem iz ekonomskih razloga se nanose tanki nanosi, a uz to, područje sloja debljine od nekoliko milimetara, ovisno o namjeni, još može biti svrhovito.

4.6. POSEBNI MATERIJALI – SAMOPRILAGODLJIVI SLOJEVI

Samoprilagodljivi slojevi, koji se posebice ubrajaju u posebne materijale, koriste se pretežno u području energetike i zrakoplovne industrije. Samoprilagodljivi slojevi primjenjuju se, primjerice, stacionarnih plinskih turbina, turbokompresora, radijalnih kompresora, kod zrakoplova, itd. Toplinski naštrcanim samoprilagodljivim slojevima može se minimizirati razmak između dvaju dijelova koji se kreću, imajući u vidu radno stanje ili dana ograničenja. Primjerice, samoprilagodljivi materijali se mogu naštrcati na kućišta rotora i turbina radi ostvarenja najmanje moguće zračnosti između kućišta rotora i vrha lopatica turbine, a time i dobivanja najvećeg mogućeg stupnja učinkovitosti. Samoprilagodljivi slojevi pritom imaju funkciju žrtve. Primjerice, u slučaju različitih toplinskih izduženja ili turbulencija, zbog čega vrhovi turbinskih lopatica dodiruju kućište, turbinske lopatice odnose nanosene slojeve. Pritom se rijetko može potpuno izbjeći oštećenje turbinskih lopatica. Ranije opisane procese uhodavanja ili dodirivanja treba promatrati kao sklop složenog mehanizma. U svakom slučaju ponašanje pri uhodavanju je sustavna karakteristika samoprilagodljivih slojeva i protutijela. Karakteristike protutijela koje utječu na proces su geometrija protutijela, materijal protutijela, kao i brzina dodirivanja i odgovarajući sadržaj energije. Osim protutijela, treba voditi računa o velikom utjecaju okolnog medija i temperature sustava na ponašanje sustava. Struktura toplinski naštrcanih samoprilagodljivih slojeva može se

općenito karakterizirati kao kompozitni materijal, koji se sastoji od čestica različitih svojstava. U klasičnom slučaju, samoprilagodljivi sloj se može predstaviti kao spužvasta struktura od metalnih čestica i otvorene poroznosti. Struktura koja je karakterizirana jednoliko raspodijeljenom poroznošću definirane veličine pora, zbog samih svojstava metalnih čestica i zbog posebnih vezanih međusobnih odnosa metalnih čestica prekinutih poroznošću, omogućuje kontrolirano odnošenje bez uništenja ili oštećenja protutijela kao i same strukture sloja. Otpornost na koroziju, kao i toplinska otpornost samoprilagodljivih slojeva ovisi o uporabljenom materijalu čestica. Dalji razvoj klasičnog sustava doveo je do kompozitnih sustava materijala sastavljenih od spojeva metalnih (ili keramičkih) čestica koje djeluju kao čvrsto mazivo, i nestabilnih čestica koje otplinjuju kod toplinskog djelovanja, a prilikom naštrcavanja osiguravaju homogenu raspodijeljenu poroznost definirane veličine pora, kao i poroznost sloja uvjetovanu procesom naštrcavanja. Takvi samoprilagodljivi slojevi danas se široko primjenjuju. Odabir komponenata materijala pritom se posebice ravna prema željenom ponašanju kod uhodavanja/dodira (ovisno o sustavu površina sloja – protutijelo, uključujući sve faktore koji utječu na ovaj sustav) i drugim uvjetima uporabe, kao što su ponašanje u korozivnim uvjetima i pri povišenim temperaturama. Materijali su, primjerice, AlSi-grafit, AlSi-poliester, AlSi-hBN, CuAl-poliester, Ni-grafit, NiCrAl-betonit, CoNiCrAlY-poliester-hBN vezani sustavi. Ovisno o sastavu materijala i udjelu i raspodjeli faza, ovi sustavi materijala imaju različito ponašanje pri uhodavanju, odnosno ponašanje kod dodira s protutijelom i različito ponašanje u korozivnom mediju ili kod toplinskog opterećenja. Maksimalna temperatura uporabe iznosi 1200 °C, pri čemu se komponente keramičkih materijala posebice primjenjuju pri visokim temperaturama. Nanošenje samoprilagodljivih slojeva naštrcavanjem odvija se, ovisno o materijalu, konvencionalnim plamenim naštrcavanjem ili atmosferskim plazmatskim naštrcavanjem. U pojedinačnim se slučajevima može primijeniti i visokobrzinsko plameno naštrcavanje. Ovisno o namjeni, sustavi slojeva se u pravilu mogu nanijeti u debljini od nekoliko milimetara.

Svi se materijali mogu koristiti kao osnovni materijali, ukoliko su mehanički i toplinski stabilni i ukoliko se mogu aktivirati njihove površine. Samoprilagodljivi slojevi pretežno se nanose na materijale metala, kod kojih se, ovisno o dijelu, često nanose materijali na osnovi Ni. Kako temperature postupka iznose do oko 1200 °C, isključena je mogućnost naknadne transformacije, odnosno, promjene mikrostrukture

osnovnog materijala. Toplinska stabilnost osnovnog materijala stoga ima veliki značaj. Osnovni se materijal može prethodno toplinski obraditi. Predgrijavanje površine koja se prevlači treba obaviti neposredno prije prevlačenja. Temperatura predgrijavanja se odabire ovisno o primijenjenom materijalu tako da se izbjegne lokalno predgrijavanje. Površinu dijela koji se prevlači prije prevlačenja treba aktivirati. To se obavlja pjeskarenjem, uz upotrebu prikladnih sredstava. Često je preporučljivo nanošenje međusloja koji čvrsto prijanja.

Moguće područje debljine slojeva jest od nekoliko mikrometara do nekoliko milimetara. Obično su samoprilagodljivi slojevi debljine nekoliko milimetara. Ograničenje debljine sloja se često ne navodi, stoga jer, primjerice, nema poteškoća sa zaostalim naprezanjima.

5. POSTUPCI MODIFICIRANJA POVRŠINE MEHANIČKOM OBRADBOM – PJEŠKARENJE

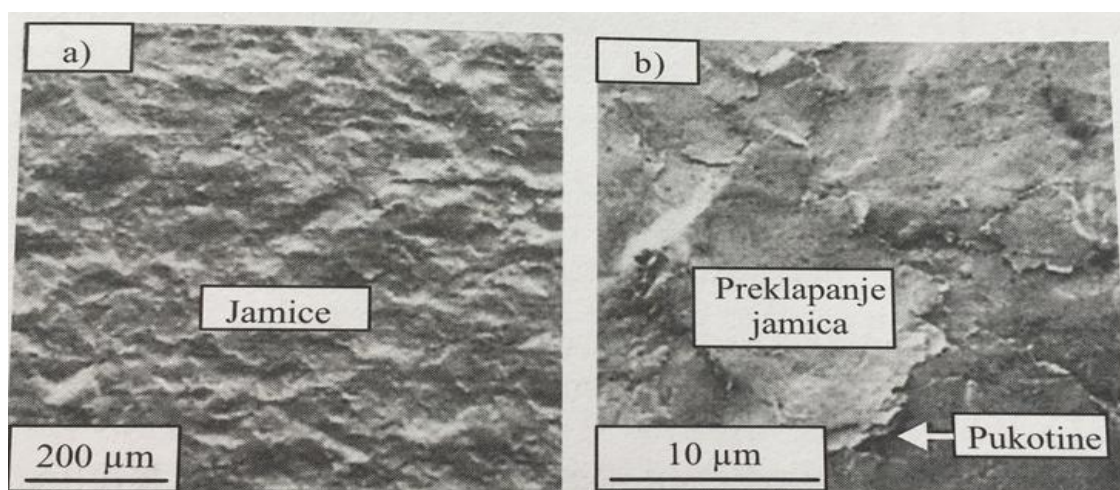
Slika 3. Prikaz pješkarenja sa strojem



Izvor: [5]

Pješkarenje je hladni mehanički postupak obrade materijala kojim se u površinu obrađivanog materijala nekog metala induciraju lokalna tlačna naprezanja. Postupak se izvodi pomoću stroja za pješkarenje koji pod velikom brzinom izbacuje čestice materijala (pijesak, sačma, itd.) kojim se pješkari te tako prodire do zdrave površine materijala, prikazano na slici 3.

Slika 4. Morfologija površine Incoloy 800M poslije pjeskarenja kod različitih povećanja

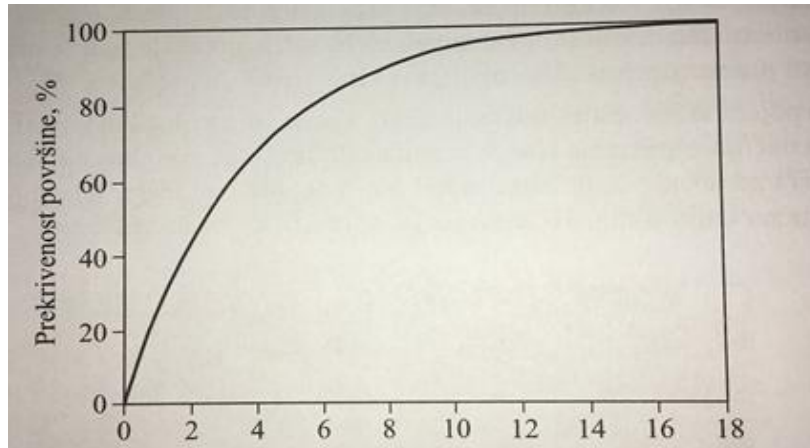


Izvor: [1]

Pjeskarenje čisti obradivu površinu, uz to osnovna mu je funkcija da povećava zamornu čvrstoću jer izazvana površinska tlačna naprezanja smanjuju mogućnost širenja zamorne pukotine, smanjujući intenzitet vlačnog naprezanja. Pjeskarenjem se može postignut i drugi pozitivni učinci kao što je smanjenje vlačnih naprezanja, ravnanje predmeta od metala, itd.

Kada čestice pojedinačno udaraju velikom brzinom o metalnu površinu dolazi do tlačnog naprezanja i lagane plastične deformacije površine na dubini materijala 0,13 – 0,25 mm (nekad i do 0,5 mm) ispod površine materijala. Materijal ispod tih granica ovog sloja nije plastično izdeformiran, a to znači da površinski sloj ima tlačna naprezanja, a sloj koji je ispod njega ima vlačna naprezanja na materijal. Tlačna površinska naprezanja su za par puta veća od tlačnih naprezanja ispod površine. Tlačna naprezanja ako su prisutna, ublažavaju djelovanje vlačnih naprezanja na materijal koji je u primjeni, npr. kod naprezanja savijanjem, što značajno povećava vijek trajanja korištenih materijala s gledišta otpornosti na zamor. Pjeskarenje jednako tako bolje raspoređuje naprezanja u površinama koja su nastala strojnom ili toplinskom obradom materijala. Kad se provodi postupak pjeskarenja jako su bitni sljedeći faktori: prekrivenost površine koja se obrađuje, jačina pjeskarenja, oblik i veličina sredstava kojim se pjeskari. Nakon određenog vremena pjeskarenja prekrivenost površine materijala bliži se broju od 100%, a taj graf je prikazan na slici 5.

Slika 5. Ovisnost prekrivenosti površine o faktoru vremena izlaganja obrađivanog predmeta

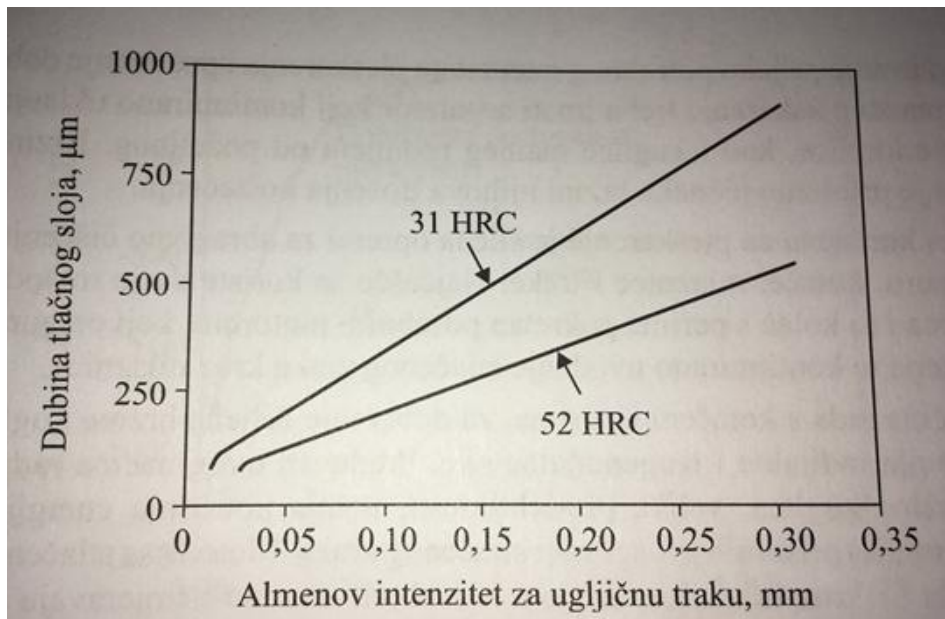


Izvor: [3]

Jačina pjeskarenja ovisi o masi, tvrdoći i jačini kuglica i o kutu pod kojim udaraju u obrađivanu. Odabire se povoljna jačina pjeskarenja kojom se postižu željena tlačna naprezanja uz najnižu moguću cijenu. Kada bi intenzitet pjeskarenja bio jako velik, a posebno kod predmeta tanjih stijenki moglo bi se dogoditi da će vlačna naprezanja jezgre biti veća od tlačnih naprezanja unesenih pjeskarenjem.

Jačina pjeskarenja ovisi i o željenoj dubini sloja, prikazano na slici 6. Na primjer, komponente s debelim stijenkama i djelomično razugljičenom površinom potreban je intenzitet takav da se pjeskarenja induciraju u tlačna naprezanja i u odugljičenom sloju.

Slika 6. Ovisnost dubine tlačnog sloja o Almenovom intenzitetu za ugljičnu traku za čelike različitih tvrdoća



Izvor: [3]

Kuglice koje se koriste za pjeskarenje su od željeza, čelika ili stakla. Metalne kuglice označene su sa brojevima u skladu s njihovim promjerom (0,4 – 4 mm). Staklene kuglice (tvrdoće 46 – 50 HRC – a) primarno se koriste za pjeskarenje obojenih metala i njihovih slitina te nehrđajućih čelika. Razlog je taj zato jer bi ostatci metalnih kuglica mogli onečistiti površinu koja se obrađuje i stvoriti koroziju. Staklene kuglice mogu se koristiti i kod suhog i kod vlažnog pjeskarenja.

Čelične kuglice za pjeskarenje se izrađuju u pojačanom stanju tvrdoće 40 – 50 HRC – a, a za obradbu tvrdih metala koriste se kuglice većih tvrdoća (57 – 62 HRC – a).

Učinkovitost i kvaliteta pjeskarenja ovisi o kontroli svakog utjecaja tijekom pjeskarenja (tvrdoća, površinska prekrivenost, veličina kut udara, brzina kuglica, jačina pjeskarenja, rotiranje obrađivanih predmeta, vrijeme obrade).

Promjena tvrdoće kuglica neće utjecati na jačinu pjeskarenja, jedino ako su kuglice tvrđe od predmeta koji se obrađuje. Slučaju da je tvrdoća kuglica niža od tvrdoće predmeta koji se obrađuje, onda je manja i jačina pjeskarenja. Jačina pjeskarenja raste kako raste i brzina kuglica. U slučaju da se smanji kut udaranja (90° ili

manji) smanjuje se i jačina pjeskarenja. Ako je kut udaranja kuglica mali, onda je nužno povećati brzinu i veličinu kuglica da bi se dobila željena jačina pjeskarenja.

Pjeskarenjem se mogu obrađivati čelici koji su: ugljični, niskolegirani, nehrđajući itd., obojeni metali i njihove slitine, lijevana željeza, tvrdi metali itd. Takav postupak ima i nekoliko ograničenja, od kojih je najvažnija veličina, površinski uvjeti i oblik obrađivanih predmeta, površinska tvrdoća itd. Cijena pjeskarenja može ovisiti o brojnim faktorima (tvrdoća predmeta, ukupna pjeskarena površina, veličina, potrebna jačina, dubina sloja, oblik itd.). Često nakon pjeskarenja nije potrebna nikakva obrada, pa se tako pjeskarenje može smatrati kao završna obrada.

Nehrdajući čelici pjeskare se kuglicama od nehrđajućeg čelika ili korundom. Općenito dubina sloja koja je unesena pomoću tlačnih naprezanja pjeskarenjem je relativno mala, naknadnu obradu brušenjem ili strojnom obradom mora se izbjegavati, a izuzev je kod legura aluminija i magnezija.

Laserska „šok“ obrada osigurava da se povećava zamorna čvrstoća obrađivanih predmeta, prikazano u tablici 8. To je također jedan od postupaka površinske obrade pjeskarenjem kojim se izaziva veća dubina kod tlačnih naprezanja (više od 1 mm kod legura aluminija). Pulsirajući laserski snop uzrokuje „šok valove“ (tlak iznosi od 1 GPa do 1 TPa), koji uzrokuju plastičnu deformaciju na površini predmeta koji se obrađuje.

Tablica 8. Parametri obradbe materijala „šok“ laserskom obradbom

Obrađivani materijal	Vrsta lasera	Energija lasera, J	Gustoća snage, GW/cm ²	Trajanje pulsa, ns	Veličina snopa, mm	Prevlaka, μm	Tlak, GPa
Zn, Al	Nd: staklo	500	1	20 – 40	-	Pb – Zn, 8 – 10	10
Fe – 3 % Si	Nd: staklo	500	0,1 – 1	25 – 200	-	Pb	-
316L čelik	Nd: staklo	80	300	0,6	7,5	Crna boja	18
Al – 12 % Si	Nd: staklo	80	1 – 8	15 – 30	5 – 12	-	2,5
Ugljični čelik	Nd: staklo	5 – 200	120 – 4700	0,6	3 – 3,5	40 – 50	< 2,5

Izvor: [3]

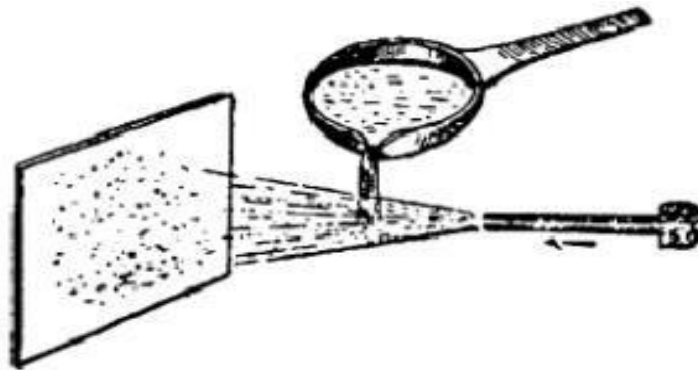
6. TOPLINSKO NAŠTRCAVANJE

Toplinsko naštrcavanje je postupak kojim se prevlače sitne čestice materijala metalnih ili nemetalnih u rastopljenom ili polurastopljenom stanju, prijenos topline i mase.

Toplinsko naštrcavanje ima mnogo prednosti, bitno je da se svojstva svakog sloja mogu prilagođavati za svaku namjenu posebno. Toplinskim naštrcavanjem mogu se nanositi različite vrste materijala za dodavanje.

Tokom toplinskog naštrcavanja rastopljene ili djelomično rastopljene čestice ne tope materijal radne podloge pri dodiru nego samo zagrijevaju površinu obradivog materijala. Zato u ovom procesu ne dolazi do promjene mikrostrukture ili kemijskog sastava podloge koja se naštrcava.

Slika 7. Patent toplinskog naštrcavanja



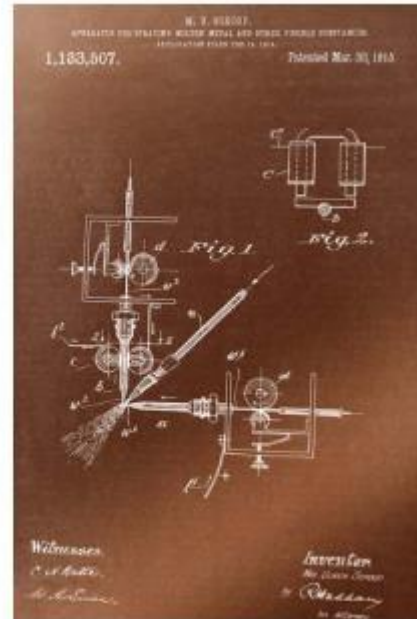
Izvor: [3]

Max Schoop je najprije razvio postupak plinskog naštrcavanja pomoću praška, a nakon toga i pomoću žice. Sa idejom je razradio korištenje električnoga luka koji je već onda bio početak elektrolučnog naštrcavanja. Na slici 8. a) prikazan je originalni patent koji služi za elektrolučni postupak naštrcavanja.

Slika 8. a) Max Schoop u svom istraživačkom laboratoriju, b) Izgled originalnog patenta za elektrolučno naštrcavanje



a)



b)

Izvor: [1]

Toplinsko naštrcavanje najčešće se izvodi sa ciljem da se poveća otpor materijala na trošenje i na zaštitu od korozije te i zbog finansijskih razloga (troškovi, reparature itd.). Neke od ostalih primjena su: povećanje otpornosti na trošenje, korozivna zaštita, električna izolacija i provodljivost, izolacija od topline, reparacija dijelova stroja, upotreba istog trenutka, izvrsno prianjanje na podlogu, služi kao temeljni prijelaz bojom, može biti zaštićena veća površina, može biti nanošena na mjestu eksploatacije dijelova, kvalitetno izvedeno naštrcavanje može trajati i do 20 godina, i otpornost na sve vanjske uvjete.

Naštrcani sloj nastaje zagrijavanjem i topljenjem dodatnog materijala koji se pretvara u ogroman broj čestica koji se u rastopljenom ili polurastopljenom obliku na visokim tlakom usmjerava prema podlozi i udaraju u podlogu. Prilikom udaranja u podlogu se deformiraju i raznim mehanizmima se vežu na podlogu.

Na slici 9. je pojednostavljeni shematski prikaz nastanka sloja toplinskim naštrcavanjem.

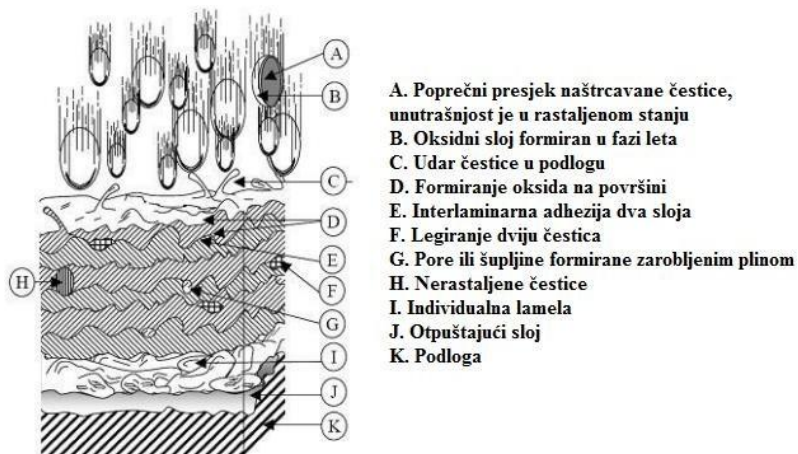
Slika 9. Faze toplinskog naštrcavanja



Izvor: [9]

Na slici 10. je shematski prikaz toplinskog naštrcanog sloja. Tu se vidi koliko je bitno da svi parametri moraju biti usklađeni koje podešavamo pri procesu toplinskog naštrcavanja. Od toga koji plin se koristi kao gorivo i pod kojim tlakom, kolika će biti postignuta temperatura na izlazu te hoće li se dobiti rastaljena ili polurastaljena čestica do toga kako će biti mehanički obrađena i očišćena podloga koja se naštrcava.

Slika 10. Poprečni presjek toplinski naštrcanog sloja



Izvor: [4]

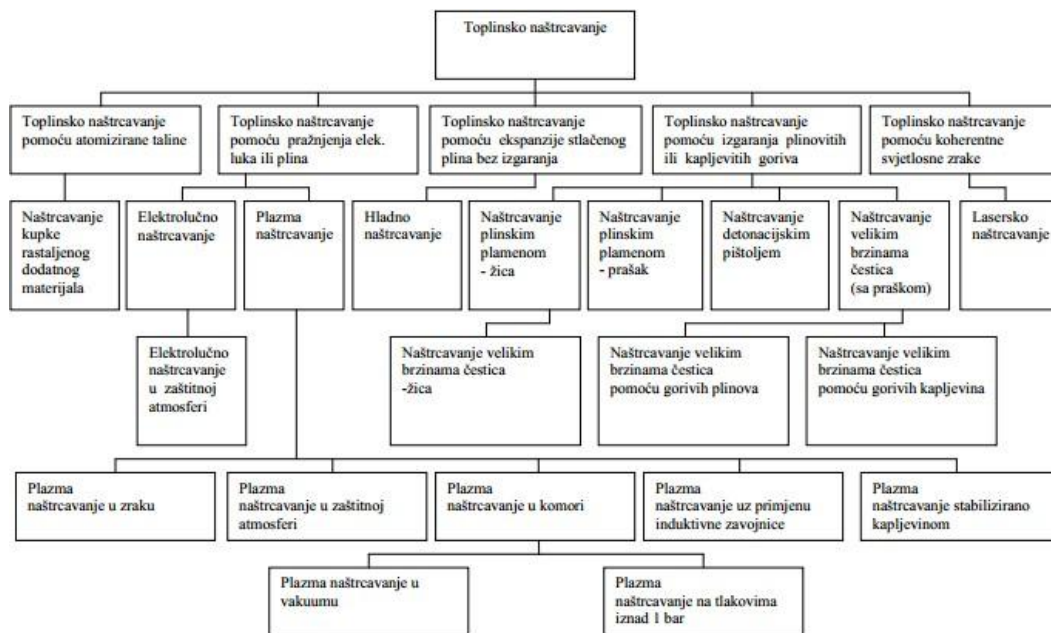
6.1.VRSTE TOPLINSKOG NAŠTRCAVANJA

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

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

Tehnologija naštrcavanja može se razdijeliti na pet glavnih vrsta postupaka koji se razlikuju po izvoru energije i uz to postignutoj toplinskoj i kinetičkoj energiji naštrcanih čestica. Vrste postupaka toplinskog naštrcavanja prikazana su na slici 11.

Slika 11. Podjela postupaka toplinskog naštrcavanja i njihove podvrste



Izvor: [4]

6.1.1. Plinsko naštrcavanje

Plinsko naštrcavanje se dijeli na dvije velike grupe, a to su plinsko naštrcavanje pomoću praška i plinsko naštrcavanje uz pomoć žice.

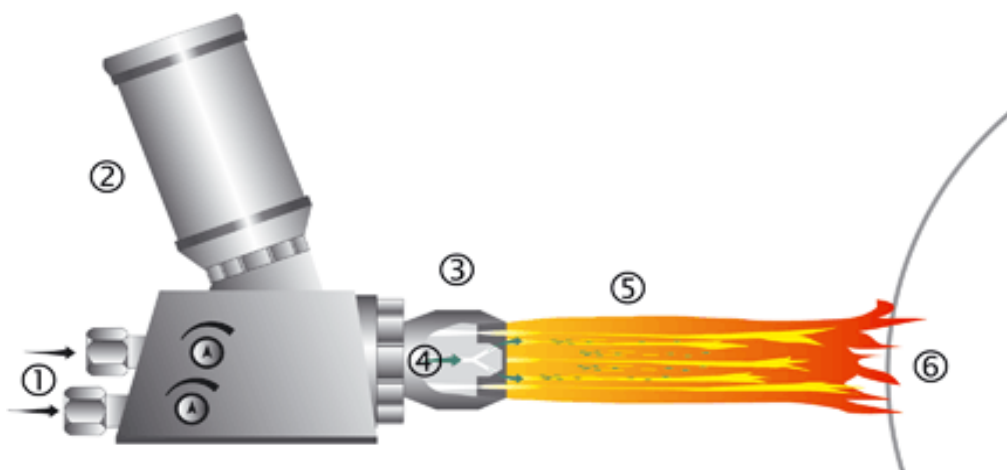
Druga podjela se dijeli prema načinu izvođenja plinskog naštrcavanja. Ovdje su tri skupine, a to su naštrcavanje bez toplinske obrade nakon postupka, naštrcavanje materijala usporedno s toplinskom obradom i naknadna toplinska obrada materijala.

Naštrcavanje pomoću plina ili naštrcavanje plamenom pomoću praška je prvi postupak toplinskog naštrcavanja, prva primjena je izvedena početkom 20. stoljeća. To je temelj svih naknadnih postupaka naštrcavanja, a ovim postupkom može se nanositi gotovo sve vrste materijala (metala, polimera, metalne legure i sve do oksidnih keramika).

Kod naštrcavanja pomoću plina dodatni materijal je prah. On se tali u plamenu plina, komprimirani zrak ubrzava rastopljene čestice od dodatnog materijala i one u obliku plamenog luka slojevito štite materijal.

Poslije izgaranja smjese svih tih plinova kao produkt izgaranja javlja se ugljikov dioksid (CO_2), vodena para i toplina. Nekad vodena para može stvarati problem radi toga što utječe na kvalitetu naštrcanog sloja, ali tada se mora na drugi način izbjeći takav problem, naprimjer tako da zagrijemo površinu obradivog materijala. Takav proces je jako složen, postoji mnogo parametara koji mogu utjecati na kvalitetu i svojstva naštrcanog sloja, zato je potrebno iskustvo ali i upute proizvođača koji proizvode materijal koji se dodaje (prah). Kako se ne bi događali problemi prilikom naštrcavanja pomoću plina, mora se prilagoditi udaljenost mlaznice od radne podloge, odrediti brzina gibanja pištolja u odnosu na obradivi materijal, odrediti posmake pištolja u odnosu na obradivim materijalom, odrediti tlak stlačenog zraka, protok materijala koji dodajemo itd. Na slici 12. je prikazan shematski prikaz plinskog naštrcavanja.

Slika 12. Shematski prikaz plinskog naštrcavanja praškom (1.acetilen i kisik, 2.spremnik dodatnog materijala (prašak), 3.sapnica, 4.aromatizirajući plin i prašak, 5.plinski plamen i čestice praška, 6.podloga-radni komad)



Izvor: [4]

Prilikom odabira plinskog naštrcavanja važno je koristiti gorivi plin, dok su dodatni utjecajni faktori vrsta materijala podloge i materijala koji dodajemo. Sve radne podloge imaju određene temperature na kojima se tale. Zato postoje određena polazišta koja su bitna za odabir plinova kod naštrcavanja:

1. Toplina izgaranja
2. Temperatura
3. Pravilan omjer količine potrebnog kisika za izgaranje

Naštrcani sloj nastaje nakon topljenja dodanog dodatnog materijala u izvoru topline, brzinom ubrzavanja. Sloj koji nastaje naštrcavanjem rezultat je međusobne povezanosti čestica i plamena plina sa česticama i radnom podlogom kod kojeg dolazi do naštrcavanja.. Najčešće pogreške koje dolaze ako nije zadovoljena kvaliteta dodatnog materijala:

1. Preširok raspon promjera praška čestica
2. Nije ujednačen kemijski sastav
3. Deformiranje čestica nakon sudaranja.

Prilikom karakterizacije praška važno je odrediti:

1. Veličinu čestica
2. Fazni i kemijski sastav
3. Vanjsku i unutarnju morfologiju
4. Ponašanje pri visokim temperaturama
5. Aerodinamička svojstva i gustoću

Kod reparacija i manjih proizvodnih serija koristi se pištolj na plin koji ima ugrađeni spremnik praška koji se gravitacijski dobavlja. Na ulazu u dobavni kanal djeluje vakuum uslijed prolaza dobavnog plina. Nedostatak kod ovakve konstrukcije pištolja je velika osjetljivost pri naglim promjenama smjera i kuta naštrcavanja. Posljedica svega toga je veće rasipanje čestica po poprečnom presjeku plamena plina. Postupak kod robotiziranog plinskog naštrcavanja je kvalitetniji jer se radni komad giba, a pištolj miruje.. Plinsko naštrcavanje prahom u industrijskom pogonu, prikazano na slici 13.

Slika 13. Plinsko naštrecavanje praškom

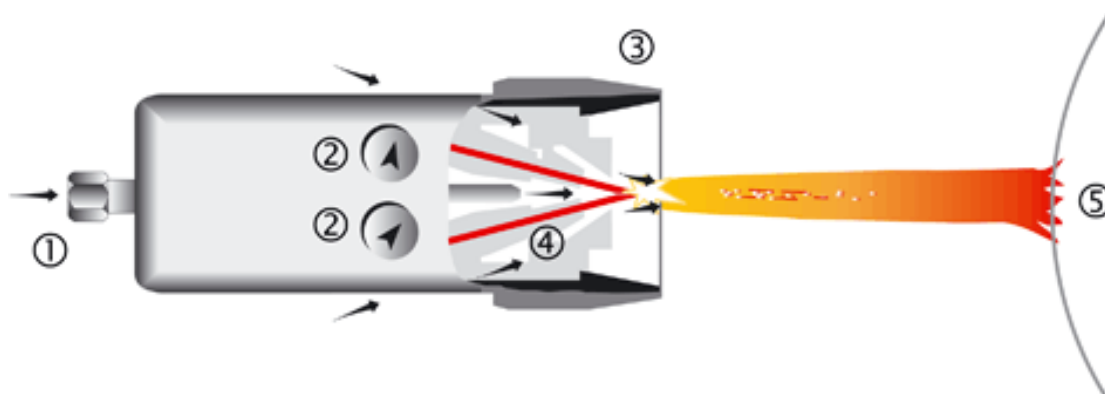


Izvor: [4]

6.1.2. Elektrolučno naštrecavanje

Naštrecavanje električnim lukom je jeftiniji postupak toplinskog naštrecavanja, slojevi koji su dobiveni naštrecavanjem električnim lukom su gušći i imaju dosta dobro svojstvo vezivanja na površinu. Takav postupak zbog malih troškova rada i visoke stope prskanja i učinkovitosti je primjenjiv za naštrecavanje obradivih materijala velikih dimenzija. Ovdje je svrha naštrecavanja kao i kod drugih procesa otpornost na koroziju, habanje, velike temperature itd. Može se naštrecavati više vrsti metala, legura i kompozita. Kod elektrolučnog naštrecavanja električni luk je izvor energije. Prilikom ovakvog naštrecavanja između dvije žice za naštrecavanje koje su spojene sa izvorom istosmjerne struje uspostavlja se električni luk, onda taj luk rastapa krajeve žica i tako rastopljeni materijal u tekućem stanju se atomiziranim plinom ubrzava prema površini radnog dijela. Stabilni proces naštrecavanja materijala održava se neprekidnim dovodom dviju žica istovremeno. Temperatura koja se maksimalno postiže je preko 4000°C , a brzina koju je preko 150 m/s koju poprima rastopljena čestica. Kombinacija brzine i visoke temperature čestica električnom luku koji raspršuje daje premaz i vrhunsku vezu sa podlogom i razinu niže poroznosti. Na slici 14. a) je prikazan shematski prikaz procesa elektrolučnog naštrecavanja.

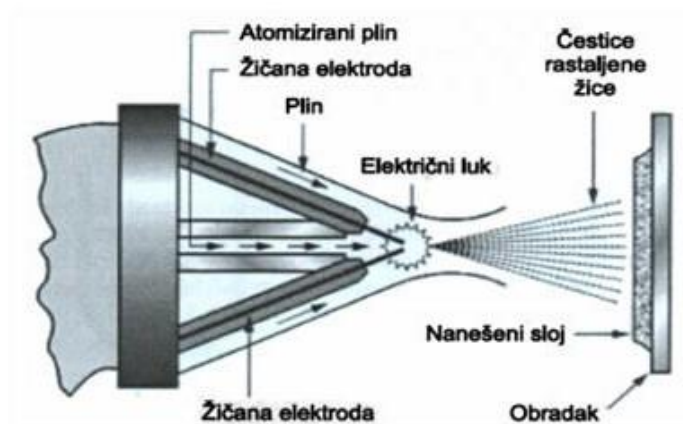
Slika 14. a) Shematski prikaz elektrolučnog naštrcavanja (1.aromatizirajući plin, 2.regulatori brzine dovođenja dodatnog materijala, 3.glava pištolja, 4.dodatni materijal električki vodljiv, u obliku žice, 5.podloga-radni komad)



Izvor: [4]

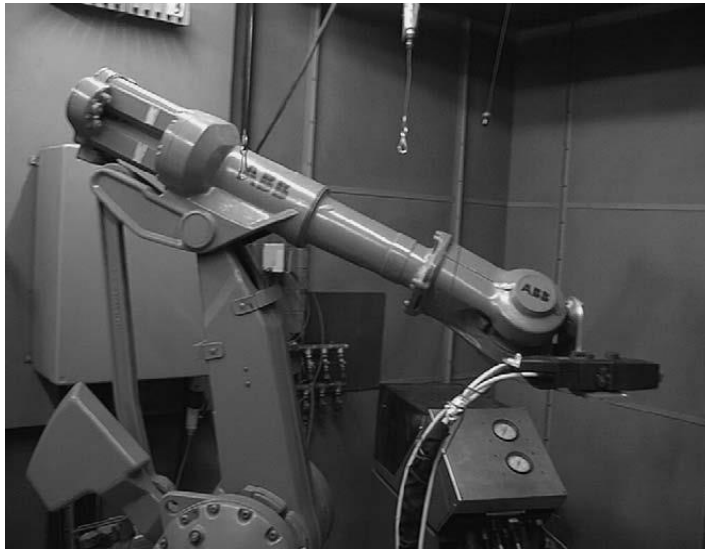
Elektrolučnim naštrcavanjem dobiva se sloj slojevite strukture obradivog materijala. Postupkom sa visokoproduktivnim učinkom omogućuje se naštrcavanje električkim vodljivih materijala. Zbog uporabe argona, dušika i mješavine kisika i dušika kao atomizirajućeg plina, pa je moguće u velikoj mjeri spriječiti oksidiranje. Proces je sam po sebi jako ekonomičan, te je i rukovanje samim procesom jako jednostavno. U zadnje vrijeme je poboljšana kvaliteta opreme i proširen je raspon za toplinsko naštrcavanje premaza, a to sve je potaklo i automatizaciju koju vidimo na slici 15. Na slici 14. b) je malo detaljnije prikazan postupak elektrolučnog naštrcavanja pomoću žice.

Slika 14.b) Shema postupka elektrolučnog naštrcavanja pomoću žice



Izvor: [1]

Slika 15. Pištolj za elektrolučno naštrcavanje na robotskoj ruci



Izvor: [9]

6.1.3. Plazma naštrcavanje

U 20. st. počela su se primjenjivati naštrcavanja pomoću plazme, onda se prvi put počeo koristiti plazma pištolj sa stabilizacijom, tako da plazma strujanjem hladi sapnice pištolja. Ogromnu inačicu s plazma pištoljom napravio je J. Reinecke onda kada je izumio plazma pištolj koji je stabiliziran pomoću plina. Onda se koristila istosmjerna struja i takvim načinom se nanosio sloj metala, ali je trebalo proći još mnogo godina da se plazma upotrijebi u industriji, a prve tvrtke koje su to uvele „UNION CARBIDE“ i „GIANINI CORPORATION“.

Danas od toplinskih postupaka naštrcavanja najčešći je plazma naštrcavanje pri čemu se koristi pištolj za plazmu s induktivnim pobuđivanjem plazme pomoću radiofrekvencije. Vrsta takvog naštrcavanja pomoću plazme koristi se kada se naštrcavanje izvodi za izrađivanje dodatnog materijala u obliku praška, ako se izrađuju slojevi gdje su materijali skloni oksidiranju, onda primjenjujemo plazma naštrcavanje u prostoru smanjenog tlaka (Vacuum Plasma Spraying). Takav postupak potrebno je provoditi u komori radi smanjenog apsolutnog tlaka, a ukoliko se želi smanjiti tlak da se vakuum zadrži, tada se ubacuje inertni plin, (argon). Svi ovi izumi i faktori su utjecali na razvitak novih postupaka plazma naštrcavanja kao što su HPPS (High Power Plasma Spraying) i UWPS (Underwater Plasma Spraying).

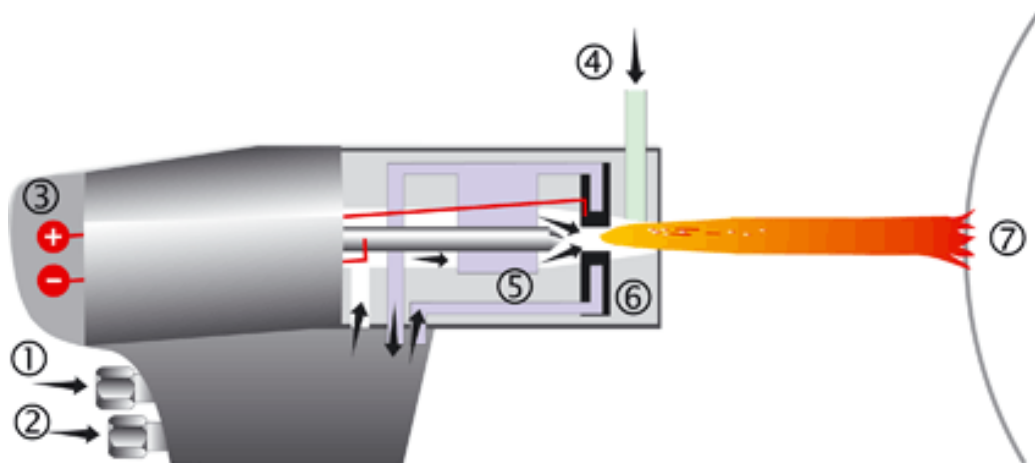
Plazma koja je dobivena lukom bez prijelaza, osim zavarivanja može služiti i za toplnsko naštrcavanje materijala radi zaštite od trošenja i korozije. Temperatura u plazmi je veća elektrolučnog ili plinskog naštrcavanja koja omogućuje nanošenje slojeva materijala koji se teško rastaljuju.

Plazma sa visokom temperaturom trenutno topi materijal i izbacuje ga van prema površini materijala. Zbog visoke radne temperature metalurška i mehanička svojstva sloja koji je naštrcan bolja su od elektrolučnog naštrcavanja i naštrcavanja plinom.

Uz pomoću električnog luka dobiva se plazma, koja izlazi iz posebno izrađenih dizni, kroz koji se kreću plinovi od plazme. Plinovi koje plazma koristi su: helij, dušik, argon, vodik, ili mješavine tih plinova. Kada plinovi prolaze kroz električni luk dolazi do ionizacije i odvajanja plinova, pa zbog takve pojave atmosfera u električnom vrlo je aktivna i postižu se jako visoke temperature plinova, od oko 15000°C, zato se molekularni plinovi raspadaju u atome, a manjim dijelom u ione.

Plazma naštrcavanjem nanašaju se slojevi debljine 10 μm pa do nekoliko mm na čeliku, željeznim ljevovima i legurama aluminijska, bakra, titana i nikla. Površinski sloj koji je nanošen naštrcavanjem plazmom, razlikuje se od ostalih metoda toplinskog naštrcavanja po njegovoj strukturi, prianjanju na radni materijal i po naknadnoj obradi, a na slici 16. je shematski prikaz načina rada naštrcavanjem plazmom.

Slika 16. Shematski prikaz naštrcavanja plazmom (1.inertni plin, 2.rashladne tekućine, 3.istosmjerna struja, 4.dodatni materijal u prahu, 5.katoda (volframova elektroda), 6.anoda (sapnica od legure bakra), 7.podloga-radni komad)



Izvor: [1]

Ogromna je prisutnost nanošenja pomoću plazma naštrcavanja u odnosu na druge metode naštrcavanja materijala. Plazma naštrcavanje se najčešće primjenjuje u avio i u kemijskoj industriji, a potom i u tekstilnoj i grafičkoj industriji. Elektroluk se odvija između elektrode koja je postavljena na mjesto katode i sapnice koje su ohlađivane vodom djeluju na mjesto anode.

Proces se primjenjuje u sasvim normalnoj atmosferi, u atmosferi sa zaštitnim plinom, u atmosferi sa inertnim plinom i u atmosferi gdje se nalazi vakuum. Na slici 17. prikazano je toplinsko naštrcavanje pomoću plazma postupka.

Slika 17. Plazma naštrcavanje



Izvor: [1]

6.1.4. HVOF (High Velocity Oxy Fuel) naštrcavanje

Novi proces toplinskog naštrcavanja, koji je često primjenjivan u avio industriji. Taj proces detonacijskog naštrcavanja je otkriven 50.-ih godina 20. vijeka

HVOF (High Velocity Oxy Fuel) je proces naštrcavanja koji uzima energiju topline koja je nastala eksplozijom plinske smjese. Važno je spomenuti da se takve eksplozije dogode i par puta u jednoj sekundi, što kompenzira pomakom i nepravilnostima, zbog toga je J. A. Browning doradio proces i kao rezultat njegovog doratka, plinska smjesa sad neprestano izgara i sa dodanim materijalom u obliku praha izlazi nadzvučnom brzinom iz uređaja za naštrcavanje.

Veće brzine čestica kod toplinskog naštrcavanja, njezinim osobinama uvjetuje velikim adhezijskim čvrstoćama, smanjenoj porozivnosti, smanjenom vremenu hlađenja i mlazni udar u radni materijal u polurastopljenom stanju nastaje HVOF naštrcavanje. Zato ovakav postupak toplinskog naštrcavanja ima svoje prednosti:

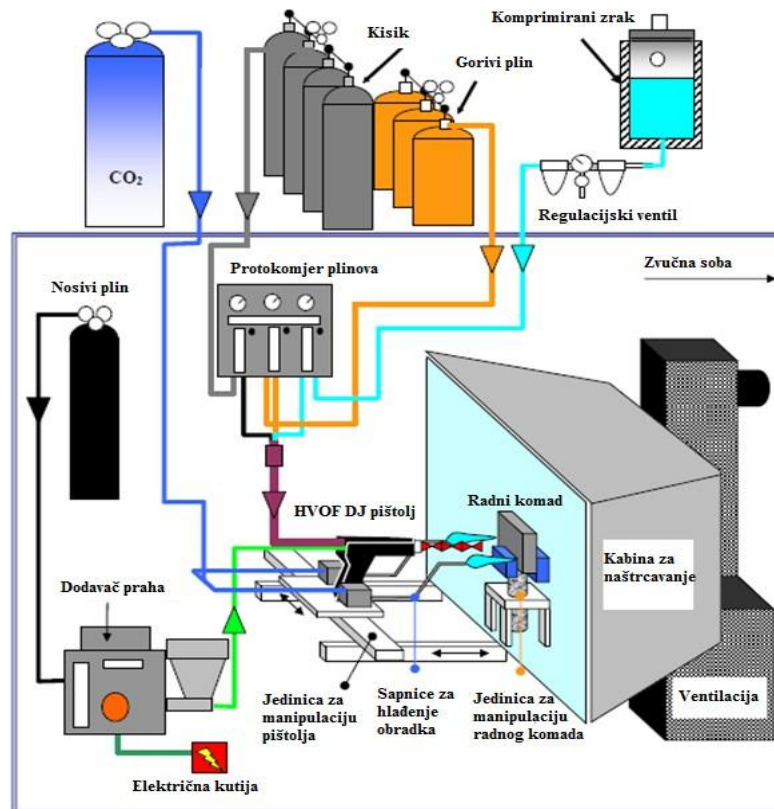
1. Jednako i učinkovito zagrijavanje čestica praha
2. Potrebno je manje vremena za let čestica, zbog velikih brzina mlaza plina
3. Miješanje s okolnim zrakom kojeg smanjuje brzina postupka
4. Temperatura čestica je znatno manja prema ostalim postupcima(oko 3000°C)
5. Niska poroznost (1-2 %);
6. Velika tvrdoća naštrcanog sloja
7. Čestice praha ne mijenjaju se kemijski
8. Velika otpornost na trošenje i dobra otpornost na koroziju
9. Moguće deblje nanošenje naštrcanih slojeva
10. Automatizacija
11. Fleksibilnost

Obično su nedostaci popraćeni sa slabijim poznavanjem opreme i radnih parametara kao:

- visoka cijena opreme
- nemogućnost prevlačenja cilindara malih provrta
- velika potrošnja plina
- dodatna zvučna izolacija i ventilacija koja je potrebna

Najvažniji dio opreme je sustav kojim se prevlači i preko kojeg osiguravamo kvalitetu naštrcanog nanosa i proces kontroliranja medija i kontrole rukovanja procesa. Ispod teksta je slika 18. koja prikazuje shematski prikaz HVOF (High Velocity Oxy Fuel) pogona.

Slika 18. Shematski prikaz stvarnog HVOF sustava



Izvor: [8]

7. ZAKLJUČAK

Pogoršanje materijala djelovanjem korozivskih mehanizama česta je pojava u industriji i svakodnevnoj primjeni. Korozija je proces kojeg ne možemo u potpunosti spriječiti nego ga samo možemo usporiti do normalne razine. Korozija se može razlikovati prema mjestu prodora u materijal i prema obliku. Koroziju možemo sprječavati na razne načine koji se sve češće i češće primjenjuju radi bolje i kvalitetnije zaštite materijala, a jedan od njih je i postupak toplinskog naštrcavanja koji je opisan u ovom završnom radu. Zaštitu od korozije provodimo tako da se na materijale naštrcavaju zaštitni slojevi ili prevlake. Korozija prouzrokuje velike materijalne štete koje nakon toga imaju goleme posljedice na materijalima.

Toplinsko naštrcavanje je postupak koji je nastao zadnje vrijeme u cilju zaštite konstrukcija i nekih strojnih dijelova od raznih faktora kako bi produžio njihov radni vijek. To je postupak koji ima jako široku primjenu u industrijskom području s obzirom na opsežnost materijala koji se mogu naštrcavati. Dobra stvar pri ovom postupku je brzina kojom se izvodi i činjenica da se osnovnom materijalu koji se naštrcava ne mijenja mikrostruktura jer se samo zagrijava površina dok se na primjer kod navarivanja koji je jako sličan postupak toplinske obrade tali dio površine i miješa se sa dodatnim materijalom. Unatoč tome kako bi postupak bio učinkovit, zbog toga je bitno poznavati problematiku materijala kojeg ćemo se naštrcavati, uskladiti kriterije i odlično pripremiti površinu naštrcavanja kako ne bi došlo do odljepljivanja sloja koji smo naštrcali. Kako je to postupak kojeg se i dalje poboljšava i usavršava, trenutno se radi na postupku hladnog naštrcavanja kojim će se postizati nadzvučne brzine čestica, a za pretpostaviti je da će se u budućnosti naći za još širu primjenu u industrijskim i drugim raznim granama industrije.

8. LITERATURA

Filetin Tomislav, Grilec Krešimir, Postupci modificiranja i prevlačenja površina, Zagreb, 2004. [1]

Mladenović Sreten, Petrović Mihailo, Rikovski Georgije, Korozija i zaštita materijala, Beograd, 1985. [2]

Krumes Dragomir, Površinske toplinske obrade i inženjerstvo površina, Slavonski Brod, 2004. [3]

Zbornik radova, Toplinska obrada metala i inženjerstvo površina, Zagreb, 2000. [4]

Gojić Mirko, Površinska obradba materijala, Sisak, 2010. [5]

D. E. Crawmer: Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International and the Thermal Spray Society, 2004 [6]

<http://www.lasercladding.com/Services/ThermalSpray> (18.02.2015.) [7]

Stokes J: Theory and application of the Sulzer Metco HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) thermal spray process, Dublin City University, Dublin 2008, str. 44-78 [8]

Š. Šavar: Obrada odvajanjem čestica, Zagreb, 1987. [9]

9. POPIS SLIKA I TABLICA

Tablica 1. Primjeri za upotrebu toplinskog naštrcavanja	3
Slika 1. Primjena toplinskog naštrcavanja u automobilske industriji	4
Slika 2. Prikaz pripreme površine predgrijavanjem prije toplinskog naštrcavanja	7
Tablica 2. Stupnjevi zahrđalosti površine čelika	8
Tablica 3. Kvaliteta pripreme površine čelika (stupnjevi očišćenosti).....	9
Tablica 4. Zavisnost između stupnja očišćenosti površine čelika i prijelazne otpornosti	10
Tablica 5. Američka skala stupnja zahrđalosti površine čelika ispod premaza.....	11
Tablica 6. Europska i njemačka skala stupnja zahrđalosti površine i skala kvalitete premaza.....	12
Tablica 7. Glavna područja primjene oksidno – keramičkih slojeva.....	19
Slika 3. Prikaz pjeskarenja sa strojem	29
Slika 4. Morfologija površine Incoloy 800M poslije pjeskarenja kod različitih povećanja	30
Slika 6. Ovisnost dubine tlačnog sloja o Almenovom intenzitetu za ugljičnu traku za čelike različitih tvrdoća	32
Tablica 8. Parametri obradbe materijala „šok“ laserskom obradbom	33
Slika 7. Patent toplinskog naštrcavanja	34
Slika 8. a) Max Schoop u svom istraživačkom laboratoriju; b) Izgled originalnog patenta za elektrolučno naštrcavanje	35
Slika 9. Faze toplinskog naštrcavanja.....	36
Slika 10. Poprečni presjek toplinski naštrcanog sloja	36
Slika 11. Podjela postupaka toplinskog naštrcavanja i njihove podvrste	37
Slika 12. Shematski prikaz plinskog naštrcavanja praškom (1.acetilen i kisik, 2.spremnik dodatnog materijala (prašak), 3.sapnica, 4.aromatizirajući plin i prašak, 5.plinski plamen i čestice praška, 6.podloga-radni komad).....	38

Slika 13. Plinsko naštrcavanje praškom	40
Slika 14. a) Shematski prikaz elektrolučnog naštrcavanja (1.aromatizirajući plin, 2.regulatori brzine dovođenja dodatnog materijala, 3.glava pištolja, 4.dodatni materijal električki vodljiv, u obliku žice, 5.podloga-radni komad)	41
Slika 14.b) Shema postupka elektrolučnog naštrcavanja pomoću žice	41
Slika 15. Pištolj za elektrolučno naštrcavanje na robotskoj ruci	42
Slika 16. Shematski prikaz naštrcavanja plazmom (1.inertni plin, 2.rashladne tekućine, 3.istosmjerna struja, 4.dodatni materijal u prahu, 5.katoda (volframova elektroda), 6.anoda (sapnica od legure bakra), 7.podloga-radni komad)	43
Slika 17. Plazma naštrcavanje	44
Slika 18. Shematski prikaz stvarnog HVOF sustava	46