

Plinsko naštrcavanje aluminija

Brtan, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2010

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:235:148025>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

NIKOLA BRTAN

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

**PLINSKO NAŠTRCAVANJE
ALUMINIJA**

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada:
Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

NIKOLA BRTAN

Zagreb, 2010.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio potpuno samostalno na temelju znanja koje sam stekao tijekom dosadašnjeg školovanja i prikupljene literature.

Nikola Brtan

ZAHVALA

Zahvaljujem se svima koji su mi pomogli u pripremi diplomskog rada: mentoru prof.dr.sc. Zoranu Kožuhu, dr.sc. Zlatku Glogoviću na vođenju, rješavanju problema i pomoći pri izradi rada, laborantima Laboratorija za zavarivanje: g. Batiniću, g. Sukobljeviću i g. Šokičiću, te ostalom osoblju Katedre za zavarene konstrukcije na savjetima tijekom izrade. Zahvaljujem se i djelatnicima Katedre za alatne strojeve, prof.dr.sc. Udiljaku, prof.dr.sc. Ciglaru, na ustupanju SCARA robota za eksperimentalne potrebe diplomskog rada, dipl.ing. Staroveškom na svesrdnoj pomoći pri puštanju robota u pogon, te g. Damiru Švecu. Zahvaljujem se prof.dr.sc. Ivanu Juragi što mi je omogućio ispitivanje korozijske postojanosti uzoraka, prof.dr.sc. Vesni Alar na vođenju te dipl.ing. Ivanu Stojanoviću na savjetima tijekom ispitivanja korozijske postojanosti naštrcanih slojeva. Također se zahvaljujem i prof.dr.sc. Željku Alaru, voditelju Laboratoriju za mehanička ispitivanja na omogućavanju izvođenja vlačnih pokusa potrebnih za diplomski rad kao i g. Alanu Jankoviću na njihovom obavljanju.

SAŽETAK RADA

U uvodnom dijelu rada dana je definicija postupka toplinskog naštrecavanja, njegov značaj u pojedinim granama industrije, a zatim i njegova podjela. Posebna pozornost posvećena je postupku plinskog naštrecavanja kao i pripremnih radnji potrebnih za njegovo efikasno izvršavanje, a objašnjeno je i djelovanje naštrecanog sloja u svrhu antikorozivne zaštite.

U eksperimentalnom dijelu rada opisuje se oprema potrebna za izvođenje robotiziranog, ali isto tako i ručnog naštrecavanja, plan pokusa naštrecavanja, kao i parametri specifični pri procesu plinskog naštrecavanja. Navedene su i analizirane tehničke mogućnosti korištenog SCARA robota. Razmotrene su također i karakteristike osnovnog i dodatnog materijala.

U završnom dijelu rada provedena su ispitivanja debljine, prionljivosti i korozijske postojanosti naštrecanih slojeva aluminijske na čeličnoj podlozi. Spomenuta ispitivanja poslužila su za uspoređivanje robotiziranog i ručnog plinskog postupka naštrecavanja i davanja ocjene kvalitete za svaki pojedini način.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
1. Uvod	1
2. Toplinsko naštrecavanje	3
2.1 Definicija toplinskog naštrecavanja	3
2.2 Podjela postupaka toplinskog naštrecavanja	4
2.3 Plinsko naštrecavanje, princip i parametri postupka	5
2.4 Način nastanka toplinsko naštrecanog sloja	8
2.5 Postupci pripreme površine obradka	10
2.5.1 Čišćenje površine.....	10
2.5.2 Hrapavljenje površine.....	11
2.5.3 Predgrijavanje obradka	12
3. Toplinsko naštrecavanje aluminijski (TSA naštrecavanje)	15
3.1 Princip djelovanja TSA slojeva	17
3.2 Primjena aluminijski naštrecanih slojeva (TSA).....	19
4. Eksperimentalni dio	21
4.1 Oprema za robotizirano plinsko naštrecavanje	22
4.2 Opis i operativne karakteristike pištolja za naštrecavanje.....	23
4.3 Robot SCARA	27
4.4 Osnovni materijal	30
4.5 Dodatni materijal	30
4.6 Tehnologija naštrecavanja	31
4.6.1 Parametri robotiziranog naštrecavanja	31
4.6.2 Oprema i parametri pri ručnom izvođenju plinskog naštrecavanja.....	34
4.6.3 Priprema površine obradka.....	35
4.7 Mjerenje glavnih svojstava sloja	38
4.7.1 Mjerenje debljine naštrecanog sloja	41
4.7.2 Mjerenje prionljivosti naštrecanog sloja	42
4.7.3 Mjerenje korozijske postojanosti prema Tafelovoj metodi	47

5.	Analiza rezultata dobivenih mjerenjem svojstava naštrcanog sloja	52
5.1	Analiza rezultata mjerenja debljina naštrcanog sloja za robotizirano naštrcavanje	52
5.2	Analiza rezultata mjerenja debljina naštrcanog sloja za ručno naštrcavanje.....	54
5.3	Usporedba debljina naštrcanih slojeva za ručno i robotizirano naštrcavanje	56
5.4	Prikaz rezultata mjerenja prionljivosti naštrcanog sloja za robotizirano i ručno naštrcavanje.....	57
5.5	Usporedba rezultata mjerenja prionljivosti naštrcanog sloja za ručno i robotizirano naštrcavanje.....	60
5.6	Prikaz rezultata korozijske postojanosti naštrcanog sloja za robotizirano i ručno naštrcavanje.....	61
5.7	Usporedba rezultata mjerenja korozijske postojanosti naštrcanog sloja za ručno i robotizirano naštrcavanje	62
6.	Zaključak	63
7.	Literatura	65

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Podjela postupaka toplinskog naštrecavanja i njihove podvarijante	4
Slika 2.2 Shema postupka plinskog naštrecavanja praškom.....	5
Slika 2.3 Prikaz parametara postupka plinskog naštrecavanja	7
Slika 2.4 Tipičan poprečni presjek toplinski naštrecanog sloja	8
Slika 2.5 Naprezanja u graničnom sloju: a) preveliko naprezanje na glatkoj površini; b) smanjeno naprezanje zbog hrapavosti osnovnog materijala	12
Slika 2.6 Utjecaj sekundarnog naprezanja u sustavu sloj/podloga.....	14
Slika 3.1 Katodna zaštita čelika aluminijskim slojem u morskoj vodi	17
Slika 4.1 Sustav za robotizirano plinsko naštrecavanje aluminijskih slojeva	22
Slika 4.2 Prikaz sastavljenog pištolja s komponentama CastoDyn DS8000.....	23
Slika 4.3 Shematski prikaz pištolja za naštrecavanje CastoDyn DS8000.....	26
Slika 4.4 3D model 4-osne inačice robotske ruke SCARA s prikazom neovisnih gibanja.....	27
Slika 4.5 Putanja pri naštrecavanja obradka	29
Slika 4.6 SCARA robot s pripadajućim napravama za prihvat obradka	29
Slika 4.7 Prikaz varijabilnih parametara	33
Slika 4.8 Postupak ručnog izvođenja plinskog naštrecavanja	34
Slika 4.9 Dimenzije obradka	36
Slika 4.10 Električna peć za predgrijavanje obradaka	37
Slika 4.11 Obradak umetnut u grijač učvršćen na prihvat robota	37
Slika 4.12 Plan izrezivanja epruveta iz naštrecanih pločica	39
Slika 4.13 Pregled pozicija mjerenja debljine naštrecanog sloja	41
Slika 4.14 Uređaj Quanix 1500 pri mjerenju debljine sloja.....	42
Slika 4.15 Dimenzije (a) i izgled (b) epruvete tipa B za ispitivanje prionljivosti	43
Slika 4.16 Oprema za lijepljenje epruvete u svrhu ispitivanja prionljivosti	44
Slika 4.17 Zaljepljene epruvete u fazi sušenja	45
Slika 4.18 Epruveta pripremljena za vlačni pokus	45
Slika 4.19 Oprema za kidanje epruvete	46
Slika 4.20 Polarizacijska krivulja čelika S 235 JR u 3.5% NaCl vodenoj otopini u odnosu na zasićenu kalomel elektrodu	48

Slika 4.21 Oprema za elektrokemijsko ispitivanje	49
Slika 4.22 Izgled (a) i dimenzije (b) radne elektrode	50
Slika 4.23 Ispitna ćelija	50
Slika 5.1 Dijagramski prikaz debljina robotizirano naštrcanog sloja u ovisnosti o broju mjerjenja	52
Slika 5.2 Prikaz izmjerenih rezultata	52
Slika 5.3 Dijagramski prikaz debljina ručno naštrcanog sloja u ovisnosti o broju mjerjenja	54
Slika 5.4 Prikaz izmjerenih rezultata	54

POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Usporedba korozijskih potencijala pojedinih materijala u odnosu na vodikovu elektrodu u morskoj vodi	17
Tablica 3.2 Primjeri primjene naštrcanih aluminijskih slojeva	19
Tablica 4.1 Tehnički podaci pištolja Castolin za plinsko naštrcavanje	24
Tablica 4.2 Komercijalni nazivi i primjeri vrste praškova za plinsko naštrcavanje	25
Tablica 4.3 Tehnički podaci prototipa robota SCARA tvrtke HSTec	28
Tablica 4.4 Mehanička svojstva osnovnog materijala S 235 JR.....	30
Tablica 4.5 Tehničke značajke dodatnog materijala ROTOTEC 29220.....	30
Tablica 4.6 Konstantni parametri u toku plinskog naštrcavanja aluminija.....	32
Tablica 4.7 Varijabilni parametri	33
Tablica 4.8 Parametri pjeskarenja.....	35
Tablica 5.1 Statistički podaci dobiveni obradom podataka u programskom paketu QuaNix 6,2.....	52
Tablica 5.2 Rezultati mjerenja debljine naštrcanih slojeva za robotizirano naštrcavanje	53
Tablica 5.3 Statistički podaci dobiveni obradom podataka u programskom paketu QuaNix 6,2.....	54
Tablica 5.4 Rezultati mjerenja debljine naštrcanih slojeva pri ručnom naštrcavanju	55
Tablica 5.5 Usporedba srednjih vrijednosti debljine sloja za robotizirano i ručno naštrcavanje	56
Tablica 5.6 Rezultati mjerenja prionljivosti pri robotiziranom naštrcavanju	57
Tablica 5.7 Rezultati mjerenja prionljivosti pri ručnom naštrcavanju	57
Tablica 5.8 Prikaz čeonih površina epruveta nakon kidanja naštrcanih robotiziranim naštrcavanjem	58
Tablica 5.9 Prikaz čeonih površina epruveta nakon kidanja naštrcanih ručnim naštrcavanjem	59
Tablica 5.10 Usporedba aritmetičkih sredina prionljivosti sloja za robotizirano i ručno naštrcavanje	60
Tablica 5.11 Rezultati mjerenja parametara korozijske postojanosti za robotizirano naštrcavanje	61
Tablica 5.12 Rezultati mjerenja parametara korozijske postojanosti za ručno naštrcavanje	61

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis oznake
α_d	$\mu\text{m/K}$	koeficijent toplinskog širenja sloja
α_s	$\mu\text{m/K}$	koeficijent toplinskog širenja podloge
T_d	$^{\circ}\text{C}$	temperatura podloge
T_o	$^{\circ}\text{C}$	temperatura okoline
E_d	MPa	modul elastičnosti sloja
h	μm	debljina naštrcanog sloja
H	mm	debljina obradka
b	mm	dužina obradka
$\Delta\alpha$	$\mu\text{m/K}$	razlika koeficijenata toplinske rastezljivosti
ΔT	$^{\circ}\text{C}$	razlika temperature u sustavu sloj/podloga
F_{CTE}	N	sile naprezanja u sustavu sloj/podlogu
M_{CTE}	Nmm	moment u sustavu sloj/podloga
k		konstanta za određeni proces korozije
S_a	mm^2	površina anode
$(E_k - E_a)$	V	efektivni napon strujnog kruga
R	Ω	otpor elektrolita
i_{anode}	$\mu\text{A/mm}^2$	gustoća anodne struje
Rp_z	μm	hrapavost površine osnovnog materijala
p_a	bar	pretlak acetilena
p_k	bar	pretlak kisika
q_a	l/h	protok acetilena
q_k	l/h	protok kisika
T_p	$^{\circ}\text{C}$	temperatura površine osnovnog materijala
T_{sob}	$^{\circ}\text{C}$	sobna temperatura laboratorija
v_{pl}	m/min	brzina gibanja u odnosu pištolj - obradak
s	mm	posmak
l	mm	udaljenost pištolja od obradka

p_z	bar	tlak stlačenog zraka
q_{pr}	kg/h	protok praška
R_{mi}	N/mm ²	prionljivost sloja za stanje pokusa m epruvete i
F_{mi}	N	maksimalna sila pri kidanju epruvete i
S_0	mm ²	površina poprečnog presjeka epruvete
R_m	N/mm ²	prosječna prionljivost sloja
n		broj ispitivanja
d	mm	promjer epruvete
v	mm/god	brzina korozije
E	mV	korozijski potencijal
i_{corr}	μA/cm ²	gustoća korozijske struje

1. Uvod

Korodiranje različitih vrsta konstrukcija ili njihovih elemenata kao i plovila predstavlja veliki problem u obliku troškova održavanja, a zbog korozivskih procesa moguće su i havarije. Atmosferska korozija je najrašireniji oblik korozije, a rezultat je djelovanja kisika i vlage. Konstrukcije u industrijskom okruženju, u blizini morske obale ili one koje se nalaze na otvorenom moru posebno su ugrožene jer je atmosferska korozija upravo u takvim okolišima najizraženija.

Usporiti ili zaustaviti proces korozije moguće je djelovanjem na unutrašnje ili vanjske korozivske čimbenike. Jedan od načina zaštite od korozije je nanošenje zaštitnih prevlaka/slojeva.

Opći princip djelovanja prevlaka/sloja je izolacija podloge od agresivne okolišnje atmosfere uz mogućnost katodne zaštite manje oštećenih površina. Primjena metalnih prevlaka/slojeva značajna je zbog toga što prevlake/slojevi mogu djelovati na način da izoliraju konstrukcijski element od negativnog utjecaja okolne atmosfere kao fizička barijera što je odlika katodnih prevlaka/slojeva, i da osim fizičke barijere mogu elektrokemijski zaštititi konstrukcijski element, što je odlika anodnih prevlaka/slojeva. Jedan od načina zaštita prevlakama je i nanošenje aluminijskih slojeva naštrcavanjem.

Aluminij i legure s većim sadržajem aluminijskog pokazuju tendenciju prema pasivizaciji u atmosferama koje ne sadrže mnogo klorida, a razlog tome je inertan zaštitni sloj aluminijskog oksida koji nastaje na površini metala. U takvom stanju se aluminij i legure s većim sadržajem aluminijskog ponašaju kao plemenite prevlake, zbog čega nisu u stanju pružiti katodnu zaštitu čeliku. Pa ipak, primjena aluminijski naštrcanih slojeva u svrhu zaštite od korozije preporuča se u atmosferama koje sadrže mnogo klorida jer se zbog prisustva kloridovih iona gubi pasivnost sloja od aluminijskog pa aluminijski sloj može poslužiti u zaštiti od korozije i kao anodni sloj.

Svoju primjenu toplinski naštrcani slojevi aluminijskog pronašli su u zaštiti konstrukcijskih čelika od korozije u različitim vrstama korozivskih agresivnih atmosfera, od industrijskih do morskih. Takvi slojevi najčešće se nanose plinskim i elektrolučnim naštrcavanjem. Navedenim postupcima se dobivaju slojevi ujednačenih kvaliteta uz niže troškove u odnosu na ostale postupke naštrcavanja, a mogu ostvariti dugoročnu zaštitu konstrukcijskih elemenata, koja može trajati i više od 20 godina.

U praksi se toplinski naštrcavaju najčešće cilindrični predmeti. U tom slučaju, cilindrični predmet postavlja se u napravu (npr. tokarski stroj) koja okreće radni komad i postiže brzinu glavnog gibanja. Operater koji obavlja postupak naštrcavanja zadužen je za održavanje propisane udaljenosti između površine radnog komada i vrha pištolja. Ujedno pomiče pištolj od jednog ruba obradka prema drugom i na taj način obavlja posmično gibanje. Poznata je i primjena automatskih uređaja kada se radi o naštrcavanju velikih cilindričnih predmeta (npr. stupova platformi). Primjena takvih naprava opravdana je za masivne konstrukcije u većim proizvodnim serijama. U ovom slučaju glavno gibanje se obavlja na vretenu, a posmično gibanje i udaljenost vrha pištolja od površine obradka regulirano je automatskom napravom.

Kada se radi o naštrcavanju predmeta koji nisu cilindričnog oblika i nije ih moguće jednostavno okretati i tako obavljati glavno gibanje, način obavljanja naštrcavanja se dodatno komplicira jer je na operateru sada i zadaća obavljanja glavnog gibanja. Ručno naštrcavanje bez primjene naprava koje izvede glavno gibanje u praksi se najčešće odvija na konstrukcijama koje se nalaze na mjestu eksploatacije, tj. na terenu ili na konstrukcijama koje su takvog oblika i gabarita da ih je nužno ručno naštrcavati.

Dijelove konstrukcija koje je moguće smjestiti u određeni radionički prostor, a koji su nepravilnih oblika, moguće je naštrcavati i pomoću robota. Robotizacijom procesa naštrcavanja moguće je ostvariti bolju kontrolu kvalitete i veću ponovljivost. Primjenom robota također je moguće smanjiti širinu raspona parametara i tako utjecati na kvalitetu i na željena svojstva naštrcanog sloja.

Ovaj diplomski rad bavi se usporedbom svojstava plinski naštrcanih slojeva aluminija na čeliku dobivenih robotiziranim i ručnim načinom naštrcavanja.

Za potrebe diplomskog rada primjenjen je postupak plinskog naštrcavanja praškom. U eksperimentalnom dijelu pomoću opreme za plinsko naštrcavanje praškom korištena je oprema Castolin Castodyn DS 8000. Naštrcavanje je izvedeno u dvije varijante: ručnim izvođenjem i obavljanjem naštrcavanja na SCARA robotu. Usporedbom ta dva načina naštrcavanja moći će se donijeti zaključci o kvaliteti i primjenjivosti aluminijski naštrcanog sloja na čeličnoj podlozi u slučaju naštrcavanja ravne površine. Posebna pozornost pri ispitivanju svojstava posvetiti će se ravnomjernosti debljina, prionljivosti i korozivskoj postojanosti sloja.

2. Toplinsko naštrcavanje

2.1 Definicija toplinskog naštrcavanja

Toplinsko naštrcavanje obuhvaća postupke kod kojih se dodatni materijali za naštrcavanje (uglavnom žice ili praškovi) rastaljuju u ili izvan uređaja za naštrcavanje i nanose na površine obradka. Pri tome ne dolazi do rastaljivanja površine obradka [1].

Jedna od glavnih karakteristika postupka toplinskog naštrcavanja je da rastaljene ili djelomično rastaljene čestice materijala sloja ne tale materijal podloge prilikom dodira, nego dolazi samo do zagrijavanja površine. Zbog toga ovaj postupak obično ne utječe na promjenu mikrostrukture ili kemijski sastav podloge [2].

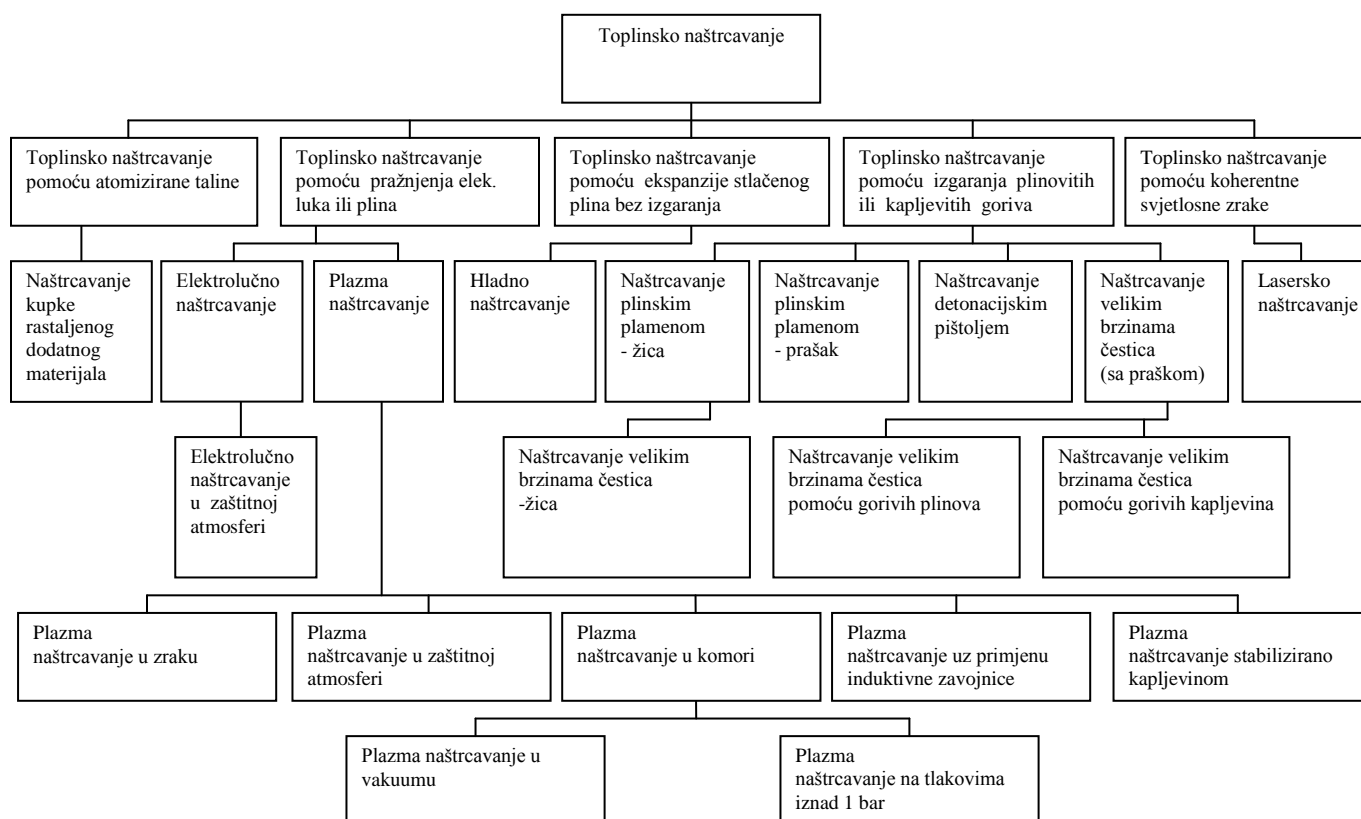
Najveća prednost postupaka toplinskog naštrcavanja je u tome da se svojstva sloja mogu prilagoditi za određenu primjenu. Razni postupci toplinskog naštrcavanja omogućuju nanošenje raznih vrsta dodatnog materijala. U primjeni, svojstva naštrcanih slojeva moraju ispunjavati razne kriterije vezane za eksploatacijske uvjete u kojima će se koristiti.

Uporabna svojstva slojeva se određuju u skladu s potrebama određenog konstrukcijskog elementa i tako se relativne važnosti traženih uporabnih svojstava mogu rangirati prema svrsi, a u proizvodnji neka od najvažnijih svojstava najčešće se rangiraju po redoslijedu: prionljivost, debljina slojeva, korozijska postojanost, hrapavost, otpornost trošenju, tvrdoća, poroznost, kemijski sastav prevlake, unutarnja naprezanja i dr. [3].

Postupci toplinskog naštrcavanja su vrlo značajni zbog toga što je, zbog velikog broja mogućih materijala od kojih se slojevi izrađuju i podloga na koje se ti slojevi mogu nanositi, primjena izuzetno raširena te se može govoriti o njihovoj prisutnosti u gotovo svim granama industrije. Prednost postupaka toplinskog naštrcavanja je isto tako mogućnost nanošenja na mjestu eksploatacije dijelova te nepostojanja ograničenja veličine podloge, odnosno radnog komada [3].

2.2 Podjela postupaka toplinskog naštrcavanja

Tehnologija naštrcavanja može se podijeliti na pet glavnih skupina postupaka koji se razlikuju po izvoru energije i pri tome postignutoj toplinskoj i kinetičkoj energiji naštrcanih čestica. Podjela postupaka toplinskog naštrcavanja prikazana je na **slici 2.1**.



Slika 2.1 Podjela postupaka toplinskog naštrcavanja i njihove podvarijante [4]

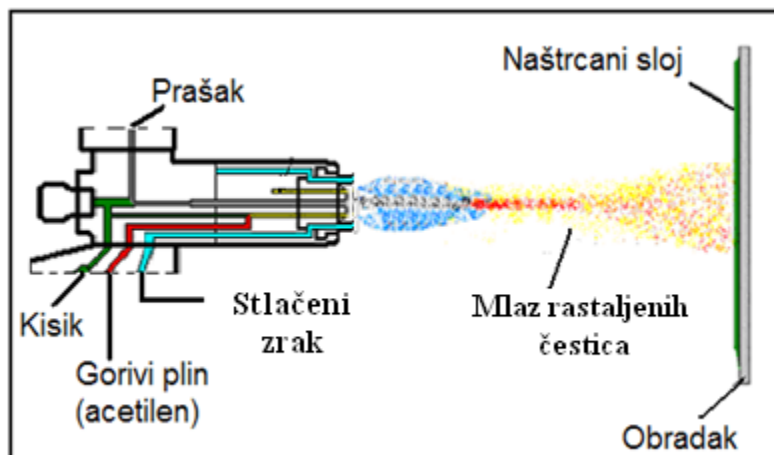
Najveće značenje danas imaju plinsko, elektrolučno, plazma naštrcavanje te visokobrzinsko plinsko naštrcavanje (HVOF). Kod manjih i srednjih zahtjeva na sloj upotrebljava se elektrolučno i plinsko naštrcavanje, a za najveće zahtjeve visokobrzinsko plinsko naštrcavanje i plazma naštrcavanje. S vremenom se intenzivirao razvoj i niza novih podvarijanti postupaka toplinskog naštrcavanja. Samim time razvija se i opseg proizvodnje raznih dodatnih materijala koji se mogu nanositi na velik broj podloga, a nanešeni slojevi mogu poslužiti u različite svrhe.

Pojedine se vrste postupaka razlikuju prema primijenjenoj vrsti energije, prema toplinskoj i kinetičkoj energiji rastaljenog materijala i postizivim kvalitetama sloja. Svaki postupak ima svoje područje upotrebe te se postupci tako međusobno nadopunjuju. Zbog važnosti primjene u nastavku najviše pažnje posvetiti će se postupku plinskog naštrcavanja praška.

2.3 Plinsko naštrcavanje, princip i parametri postupka

Kod plinskog se naštrcavanja razlikuju plinsko naštrcavanje žice i praška. Kod plinskog naštrcavanja dodatni materijal se rastaljuje plinskim plamenom dobivenim izgaranjem gorivog plina u struji čistog kisika. Kao gorivi plinovi koriste se acetilen, propan i vodik [2]. Temperature plinskog plamena navedenih plinova su različite. Acetilen pri izgaranju u kisiku daje plinski plamen više temperature od ostalih plinova. Također daje najkoncentriraniji izvor topline, te je kao plin najpovoljniji za prijenos kinetičke i toplinske energije na čestice što se zbiva u vrlo kratkom vremenu. Zbog svojih prednosti acetilen će se koristiti u praktičnom dijelu ovog rada.

U procesu plinskog naštrcavanja, nosivi plin (kisik) pod tlakom dovodi prašak u direktan kontakt s plinskim plamenom. Prašak se rastaljuje u središtu plinskog plamena gdje su temperature najviše, a time i efikasnost taljenja najveća. Stlačeni zrak ubrzava rastaljene čestice dodatnog materijala, a ujedno i fokusira plamen. Na **slici 2.2** prikazan je princip postupka plinskog naštrcavanja praškom.



Slika 2.2 Shema postupka plinskog naštrcavanja praškom [2]

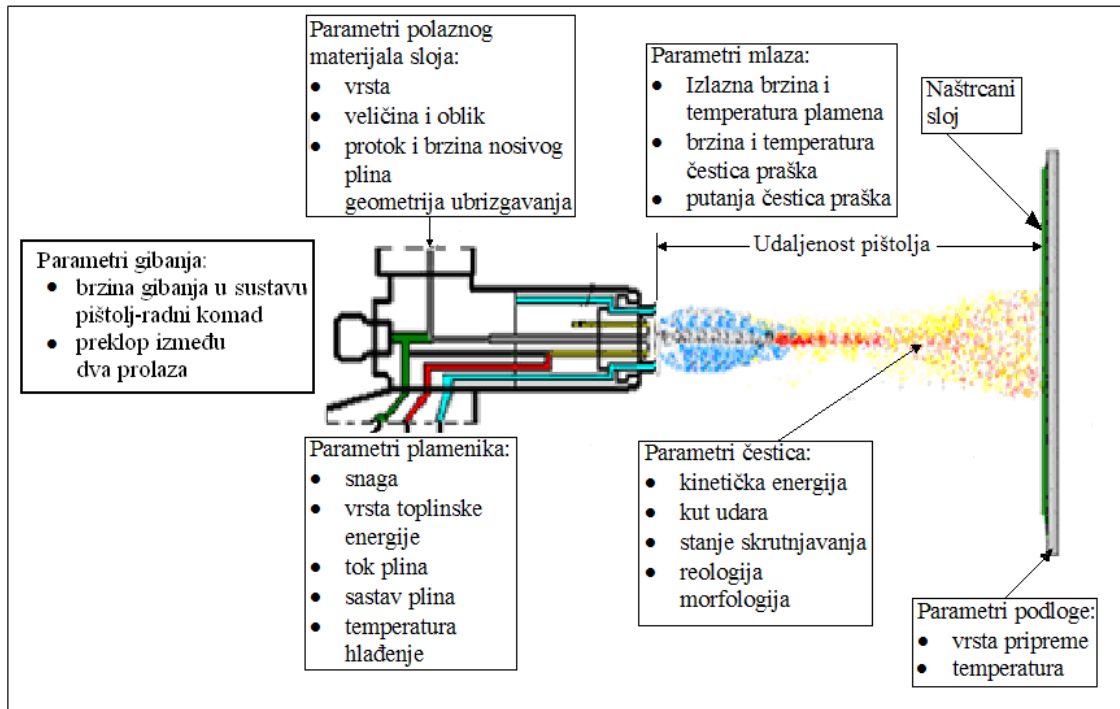
Ovisno o izvedbi opreme tj. pištolja, miješanje gorivog plina i kisika provodi se pomoću jednog ili više regulatora protoka plinova. U konkretnom slučaju vezanom uz ovaj rad pretlak kisika i acetilena definirani su od proizvođača i iznose 0.7 bar za acetilen i 4 bar za kisik da bi se postigao stehiometrijski omjer 1:1. Pretlak, odnosno protoci se za svaki pojedini plin reguliraju ventilom koji se nalazi na boci. Stlačeni zrak dobavlja se iz kompresora koji omogućava konstantan željeni tlak zraka koji se uobičajeno kreće u granicama od 1 do 2 bar.

Kemijska reakcija izgaranja acetilena u kisiku [5] se odvija prema jednadžbi **(2.1)**:



Nakon izgaranja smjese plinova koji rastaljuju dodatni materijal, kao produkti javljaju se ugljik-dioksid, razvija se toplina koja je nužna za proces, ali javlja se i vodena para. Ona kod naštrcavanja može postati problem jer nepovoljno utječe na kvalitetu sloja. Da bi se taj nepovoljan utjecaj izbjegao, potrebno je zagrijati površinu obradka na temperature od 120 do 140 °C, jer pri doticaju vodene pare nastale izgaranjem s predgrijanom površinom ona brzo ispari i nema utjecaj na prionljivost naštrcanog sloja.

Kod plinskog naštrcavanja postoje brojni parametri koji utječu na svojstva sloja i na njegovu kvalitetu. Na **slici 2.3** prikazan je princip plinskog naštrcavanja zajedno s čitavim nizom pripadajućih parametara.



Slika 2.3 Prikaz parametara postupka plinskog naštrcavanja [3]

Na uređajima za plinsko naštrcavanje moguće je regulirati gotovo sve parametre, ali prije samog izvođenja postupka neki od njih su nam unaprijed određeni bilo od strane proizvođača opreme za naštrcavanje, ili od proizvođača dodatnog materijala. Te parametre ponekad možemo smatrati konstantnima. Pa ipak, određen broj parametara nije moguće jednostavno odrediti već je potrebno iskustvo i poznavanje tehnologije plinskog naštrcavanja, a kao smjernice ponekad mogu poslužiti preporuke proizvođača dodatnog materijala za njihovo određivanje.

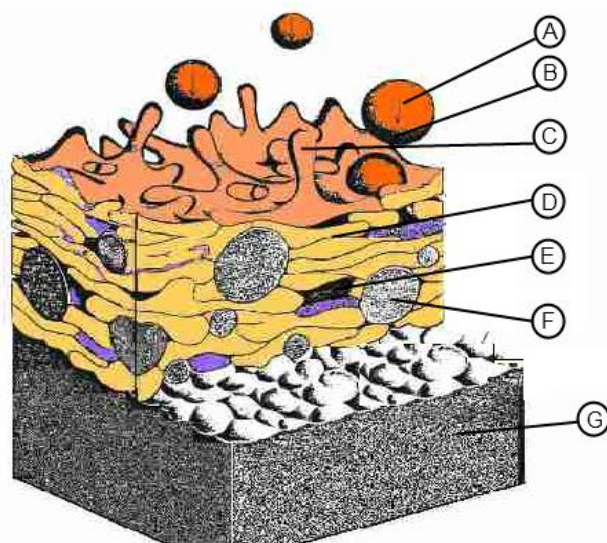
Takvi, varijabilni parametri su [3]:

- udaljenost pištolja od podloge,
- brzina gibanja pištolja u odnosu na obradak,
- posmak pištolja u odnosu na obradak,
- tlak stlačenog zraka,
- protok dodatnog materijala.

Premda bi se u ovisnosti o ponekim varijablama u postupku mogao navesti još neki parametar, vezano za problematiku praktičnog dijela diplomskog rada, ovi parametri su od presudne važnosti za kvalitetu naštrcanog sloja i o njihovim kombinacijama ovisi uspješnost postupka.

2.4 Način nastanka toplinsko naštrcanog sloja

U pištolju za plinsko naštrcavanje praškom čestice praška se dovode u kontakt s plinskim plamenom. Zbog toplinskog djelovanja plamena čestice se rastaljuju i izlažu naglim ubrzanjima. Tako rastaljene čestice udaraju u površinu radnog komada i formiraju naštrcani sloj. Dio manjih čestica u toku leta može ispariti, a dio se može smanjiti. U toku leta, čestice u rastaljenom stanju oksidiraju. Mikrostruktura i svojstva naštrcanih slojeva posljedica su svih pojava u toku leta čestica. Glavni mehanizam vezivanja sloja za podlogu je mehaničko sidrenje, pa je stoga važno da površina radnog komada bude hrapava kako bi se postigla što bolja prionljivost. Primjenom postupaka toplinskih naštrcavanja, moguće je dobiti složenu lamelnaru metastabilnu strukturu sloja, a **slika 2.4** prikazuje tipičan poprečni presjek jednog toplinski naštrcanog sloja.



Slika 2.4 Tipičan poprečni presjek toplinski naštrcanog sloja [6]

- A) poprečni presjek naštrcavane čestice, unutrašnjost još u tekućem stanju,
- B) oksidni sloj formiran na čestici prilikom leta,
- C) udar čestice o podlogu,
- D) interlaminarna adhezija dva sloja, formirana naštrcanim slojevima,
- E) pore ili šupljine formirane zarobljenim plinom,
- F) nerastaljene čestice,
- G) podloga.

Općenito, uspješnost nanošenja toplinski naštrcanih slojeva ovisi o tri glavna faktora [7]:

1. Materijali podloge – materijali podloge na koju se mogu naštrcavati slojevi mogu biti gotovo svi tehnički važni materijali, ukoliko se za njih provede odgovarajuća priprema. Pretežno se naštrcavaju metali, osobito čelici, aluminijski materijali, nikal i njegove legure, legure bakra i dr. Također se mogu prevlačiti keramika, staklo i polimeri. Postupak naštrcavanja, vrstu materijala sloja te materijal podloge treba pravilno odabrati jer se na bilo koju podlogu ne može naštrcati sloj od bilo kojeg dodatnog materijala.
2. Početni, vezni sloj – prionljivost između sloja i podloge uvjetovano je djelovanjem mehanizama adhezije sloja za podlogu koje se uvelike sastoji od mehaničkog sidrenja te u manjoj mjeri kemijskih i metalnih veza. Prionljivost ovisi o brojnim faktorima kao što su: materijal sloja, stanje obradka, stupanj hrapavosti površine obradka, čistoći površine, temperaturi obradka prije, tijekom, i nakon naštrcavanja, o brzini udaranja rastaljenih čestica o podlogu i dr.
3. Mikrostruktura sloja - primjenom postupaka toplinskih naštrcavanja, moguće je dobiti složenu lamelarnu metastabilnu strukturu sloja koja je rezultat mnogih utjecajnih čimbenika koji utječu na proces toplinskog naštrcavanja. Naštrcani sloj ima drugačiju mikrostrukturu i razlikuje se po kemijskom sastavu od dodatnog materijala koji još nije korišten za naštrcavanje. Razlike u mikrostrukturi i kemijskom sastavu nastaju zbog rasta sloja, reakcija s plinovima iz procesa i reakcija s plinovima iz atmosfere koja okružuje nanešeni sloj u rastaljenom stanju. Na primjer, kada se kisik koristi kao procesni plin, u dodiru s rastaljenim česticama formiraju se oksidi koji postaju dio sloja. Metalni slojevi su često porozni i imaju čvrstoću različitu od osnovnog materijala.

2.5 Postupci pripreme površine obradka

Dobra priprema osnova je dobrog vezivanja i zahtijeva se prije svakog postupka toplinskog naštrcavanja. Kvaliteta prijanjanja naštrcanog sloja direktno je povezana sa čistoćom i hrapavošću površine osnovnog materijala. Priprema površine nužna je da bi se osigurala uspješna aplikacija naštrcanog sloja. Dodatni materijal i vrsta osnovnog materijala najvažniji su faktori u izboru ispravne pripreme da bi se postigla zadovoljavajuća prionljivost. Na prionljivost utječe i temperatura površine obradka prije, tokom i nakon naštrcavanja te udarna brzina čestica [7].

Priprema površine sastoji se od tri koraka:

- Čišćenje površine zbog uklanjanja nečistoća koje bi oslabile vezu između sloja i osnovnog materijala.
- Hrapavljenje površine zbog stvaranja malih udubina i nepravilnosti na površini osnovnog materijala u svrhu povećanja mehaničkog sidrenja i efektivne veličine površine.
- Predgrijavanje obradka zbog eliminacije vlage s površine i smanjenja naprezanja u sustavu sloj/podloga.

Na mehanički opterećenim dijelovima nužno je prethodno otkriti eventualne pukotine na osnovnom materijalu. To se najčešće provodi nerazornim metodama ispitivanja. Naime, ako postoje pukotine na površini osnovnog materijala, one će se pojaviti i na naštrcanom sloju. Pukotine na površini osnovnog materijala ne mogu se popraviti naštrcavanjem, jer dodatni materijal ne služi za spajanje osnovnog materijala, već za poboljšavanje svojstava njegove površine [7].

2.5.1 Čišćenje površine

Prvi korak u pripremi površine obradka kod toplinskog naštrcavanja je odstranjivanje svih površinskih nečistoća poput ulja, masti i boje. Način čišćenja ovisi o veličini i stanju površine koja će se naštrcavati. Ručno mehaničko čišćenje se koristi samo za uklanjanje boje, hrđe ili kamenca koji labavo prijanjaju na podlogu. Primarno se zbog svoje sporosti ta metoda koristi za čišćenja na određenim manjim mjestima i nije prikladna za veće plohe. Pod ručnim alatom se podrazumijevaju strugala, žičane četke, dlijeta, abrazivi na raznim podlogama i dr. strojno

mehaničko čišćenje je u prvom redu brže od ručnog. Provodi se korištenjem električnih ili pneumatskih uređaja, a kao alati mogu poslužiti rotirajuće četke, rotacijski brusni alati u obliku ploča, kolutova, valjaka ili profila [1].

Nakon mehaničkog čišćenja uvijek se preporuča odmašćivanje površine i uklanjanje bioloških i mineralnih masnih tvari koje se nakupljaju na površinama čeličnih obradaka, a koje su posljedica rukovanja masnim rukama ili korištenja masnih sredstava u predobradi radnog komada. Ovaj korak vrlo je važan jer daljnjom pripremom, tj. hrapavljenjem ne mogu se ukloniti sve masnoće već ih se možemo još dublje utisnuti u površinu obradka, što može imati negativne posljedice u pogledu prijanjanja sloja za podlogu. Odmašćivanje površine čeličnih pločica najčešće se izvodi korištenjem acetona.

Nakon što su nečistoće odstranjene, površina obradka mora ostati potpuno čista do kraja procesa naštrcavanja. Površina treba biti zaštićena od kontaminirajućih čestica iz zraka ili otisaka prstiju [1].

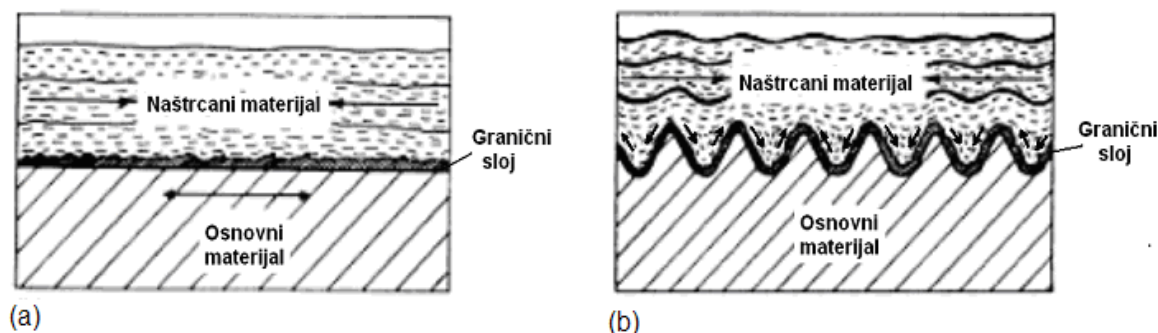
2.5.2 Hrapavljenje površine

Nakon čišćenja i odmašćivanja potrebno je ohrapaviti površinu na koju će se nanositi sloj. Ispravno hrapavljenje jednako je bitno kao i čišćenje. Hrapavljenje se izvodi kako bi se osiguralo dobro prijanjanje sloja na podlozi, da se što više poveća efektivna površina između naštrcanog sloja i obratka i da se očisti površina od nečistoća. Stupanj hrapavosti ovisi o materijalu, procesu i uvjetima u kojima će se konstrukcija koristiti. Postoji nekoliko mogućih postupaka, a najčešće se primjenjuju:

- pjeskarenje i sačmarenje,
- strojna obrada poput tokarenja ili rjeđe glodanja

Kod naštrcavanja ravnih površina može doći do smanjenja prionljivosti naštrcanog sloja, posebno u slučaju većih debljina i masivnog radnog predmeta. Kod glatkih ravnih površina javljaju se prevelike sile kao rezultat unutrašnjih naprezanja u naštrcanom sloju. To naprezanje može uzrokovati deformacije ili odvajanje naštrcanog sloja od obradka (**slika 2.5a**). Da bi se takve

neželjene pojave izbjegle potrebno je naštrcanu površinu ožlijebiti [1]. Na taj se način povećava površina spojnog sloja i znatno se smanjuju naprezanja uzduž naštrcanog sloja (**slika 2.5b**).



Slika 2.5 Naprezanja u graničnom sloju: a) preveliko naprezanje na glatkoj površini; b) smanjeno naprezanje zbog hrapavosti osnovnog materijala [7]

2.5.3 Predgrijavanje obradka

Predgrijavanje osnovnog materijala (obradka) uobičajena je praksa pri toplinskom naštrcavanju.

Razlozi za predgrijavanje obradka:

- eliminacija vlage s površine obradka,
- smanjenje naprezanja između osnovne površine i naštrcanog sloja

Da bi se izbjegli problemi u obliku prevelikog naprezanja u sustavu sloj/podloga, potrebno je razmotriti nekoliko ograničenja. Predgrijavanje eliminira vlagu s površine koju treba naštrcavati i na taj način dobiva se vruća i suha površina na koju udaraju čestice prvog sloja naštrcavanja. Predgrijavanje također pomaže da ne dođe do prebrzog stezanja površine obradka nakon završetka naštrcavanja. Na taj način smanjuju se naprezanja između osnovne površine i naštrcanog sloja tijekom njegovog hlađenja [7].

Predgrijavanje obradka može se provesti na nekoliko načina, a to su:

- predgrijavanje plinskim plamenikom,
- predgrijavanje u pećima za toplinsku obradu,
- predgrijavanje opremom za plinsko naštrcavanje,
- predgrijavanje različitim napravama.

Za predgrijavanje se najčešće koriste plinski plamenici. U nekim slučajevima za predgrijavanje služi i sama oprema za plinsko naštrcavanje, ali naravno, u tom slučaju ne rastaljuje se dodatni materijal, već oprema služi kao izvor topline [7]. Za predgrijavanje također mogu poslužiti i peći za toplinsku obradu kojima je moguće postići točno željenu vrijednost temperature obradka, ali se one rjeđe koriste zbog dimenzijskog ograničenja i cijene.

Tijekom naštrcavanja, rastaljene čestice dodatnog materijala udaraju o površinu podloge, spljošte se i hlade u vrlo kratkom roku. Skupljanje tih čestica ograničeno je površinom obradka ili površinom prethodno naštrcanog sloja, pa zbog toga nastaju naprezanja u tom sloju. Takvo naprezanje, kada se razmatra pojedini sloj naziva se primarno ili unutarnje naprezanje [8].

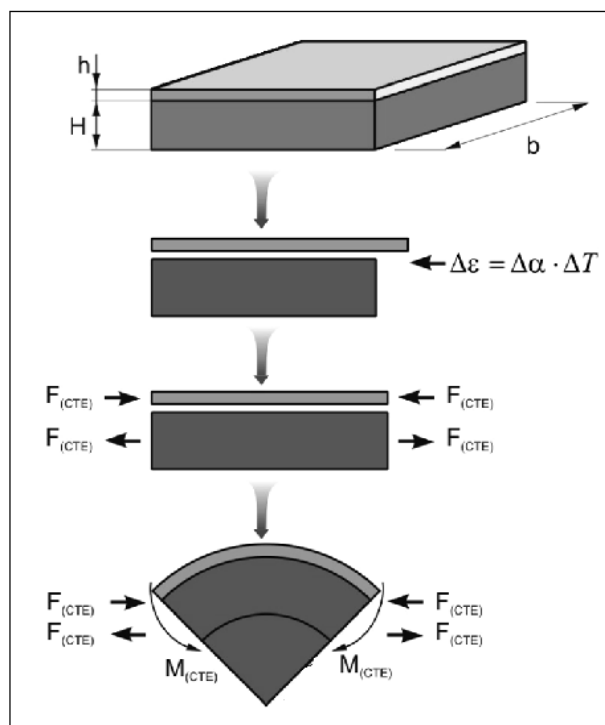
Sekundarno naprezanje, tj. naprezanje tijekom hlađenja, nastaje kada je proces naštrcavanja završen, a sloj i podloga se hlade do sobne temperature. Sekundarno naprezanje se javlja zbog različitih koeficijenata toplinskog širenja između sloja i podloge. Ono ovisi o temperaturi, koeficijentima toplinskog širenja i o modulima elastičnosti. Izraz za izračunavanje sekundarnog naprezanja glasi [8]:

$$\sigma_d(T_o) = (\alpha_d - \alpha_s) (T_d - T_o) E_d(T_o) \quad (2.2)$$

gdje je: α_d – koeficijent toplinskog širenja sloja; α_s – koeficijent toplinskog širenja podloge;
 T_d - temperatura sloja; T_o - temperatura podloge; E_d - modul elastičnosti sloja

Iz izraza (2) vidljivo je da nastalo naprezanje može biti manje ukoliko je razlika između temperatura sloja i podloge, a samim time i toplinskih koeficijenata manja.

U slučaju prevelikog sekundarnog naprezanja u sloju mogu se javiti pukotine ili se čak može dogoditi odljepljivanje sloja od podloge. **Slikom 2.6** prikazan je utjecaj sekundarnog naprezanja na sile i momente u sustavu sloj/podloga.



Slika 2.6 Utjecaj sekundarnog naprezanja u sustavu sloj/podloga [8]

Gdje je: h - debljina naštrcanog sloja; H - debljina obradka; b - dužina obradka; $\Delta\varepsilon$ - razlika linearnih koeficijenata naprezanja; $\Delta\alpha$ - razlika koeficijenata toplinske rastezljivosti; ΔT - razlika temperature u sustavu sloj/podloga; $F_{(CTE)}$ - sile naprezanja jednakih iznosa, ali suprotnih smjerova za sloj i podlogu; $M_{(CTE)}$ - moment u sustavu sloj/podloga

Temperatura predgrijavanja od 120°C do 140°C i njeno održavanje u vremenskom roku od otprilike 60 sekundi uspješno eliminira vlagu s površine. Čestice rastaljenog praška na toploj i suhoj površini se sporije hlade i bolje prijanjaju nego na površini koja je na sobnoj temperaturi. Nakon što se postigne temperatura predgrijavanja, naštrcavanje treba što prije započeti. Nikada ne treba predgrijavati na 150°C i onda predugo održavati temperaturu. Pravilno je s postupkom naštrcavanja započeti u najkraćem roku od kad se dostigla temperatura predgrijavanja [7].

Pojedina istraživanja [9] su pokazala da na površinama koje nisu predgrijane, čestice rastaljenog dodatnog materijala ne formiraju jednoličan sloj. One se tijekom udara u površinu obradka rasprsnu i prijanjaju na nju u obliku kapljice, a rezultat toga je slabija prionljivost između prevlake i podloge. Predgrijavanjem se postiže ravnomjernije naštrcan sloj koji sadržava manje pora. Adhezijske sile u tom slučaju također su znatno veće.

3. Toplinsko naštrcavanje aluminija (TSA naštrcavanje)

Korozija je spontano razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija – plina, kapljevine ili krutih agresivnih čestica, a zbog kemijskih ili elektrokemijskih procesa [10].

Korozija je jedan od glavnih uzroka kvara, oštećenje ili havarija nekog elementa stroja ili dijela postrojenja. Zbog korozijskog djelovanja često dolazi do neplaniranoga djelomičnog zastoja u radu, a ponekad se može dogoditi i obustava čitavoga proizvodnog procesa te prekid u isporukama energenata, roba i dr. Gubici, štete i zastoji često nemjerljivo premašuju vrijednosti samoga oštećenoga dijela. U tim havarijama u spletu okolnosti moguća su još i dodatno velika onečišćenja pa čak i ekološke katastrofe.

U industrijskom i morskom okruženju zbog prisutnosti elektrolita konstrukcije su izvrgnute elektrokemijskim mehanizmima djelovanja korozijskih procesa. Tanki film elektrolita stvara se na metalnoj površini izloženoj atmosferskim uvjetima kada je postignuta određena razina vlažnosti. Oblik korozije koja je rezultat djelovanja kisika i vlage nazivamo atmosferska korozija. To je najrašireniji oblik korozije, a posebno je izražen u industrijskim zonama, priobalju te na otvorenom moru.

Strojarske konstrukcije mogu se zaštititi od procesa korozije različitim metodama. Najčešći načini zaštite su [11]:

- elektrokemijske metode zaštite,
- zaštita od korozije obradom korozivne sredine,
- oblikovanjem i konstrukcijskim mjerama,
- zaštita odabirom korozijski postojanih materijala,
- zaštita prevlakama/slojevima.

Često se neke metode zaštite koriste u kombinaciji te se tako još više povećava korozijska postojanost i trajnost ugroženih konstrukcija.

Jedan od načina zaštite prevlakama/slojevima je plinsko naštrcavanje aluminija. Plinsko naštrcavanje aluminija daje sloj koji vrlo učinkovito štiti čeličnu podlogu, i često puta zbog svoje

efikasnosti i ekonomičnosti zamjenjuje klasičnu zaštitu čelika premazima. Plinsko naštrecani slojevi aluminijskih slojeva imaju predvidljiv vijek trajanja, zaštićuju oštećene dijelove katodno i imaju dobar otpor abrazivnom trošenju. Mogu se primjenjivati bez obzira na veličinu i oblik obradka koji se zaštićuje. Vijek trajanja sloja proporcionalan je njegovoj debljini pa se zato debljina sloja odabire u skladu s potrebnim stupnjem zaštite od korozije [9].

Debljina aluminijskih slojeva je reda veličine 0,10 – 0,25 mm. Aluminij ima vrlo dobru moć prijanjanja na ispjeskarenu čeličnu površinu. Naštrecavanjem ne dolazi do visokih temperatura u osnovnom materijalu, pa se ne mijenjaju njegova mehanička svojstva [9].

Primjena posebnih prevlaka na naštrecanom sloju je preporučljiva radi hermetičkog zatvaranja poroziteta koji postoji u svim prevlakama nastalim postupcima toplinskog naštrecavanja, a posebice je taj porozitet izražen primjenom plinskog naštrecavanja. Taj porozitet je bitno zatvoriti da ne dođe do prodiranja elektrolita do same podloge i pojave galvanske korozije. Prevlaka mora biti dovoljno niske viskoznosti kako bi uspjela prodrijeti u sve otvorene pore i pritom ih zatvoriti.

Glavne prednosti primjene postupaka toplinskog naštrecavanja u odnosu na uobičajeno nanošenje različitih zaštitnih premaza ili galvanski nanešenih zaštitnih prevlaka jesu [12] :

- mogućnost trenutne upotrebe zbog izostanka vremena potrebnog za sušenje ili skrućivanje,
- mogućnost nanošenja u nešto većem rasponu okolišne temperature i vlage,
- veća adhezija i robusnost naštrecane površine u odnosu na premaze nanešene bojanjem,
- mogućnost korištenja naštrecane prevlake kao temelj za naknadno nanošenje premaza bojanjem,
- nanošenje na mjestu eksploatacije dijelova te,
- nepostojanje ograničenja veličine podloge, odnosno radnog komada.

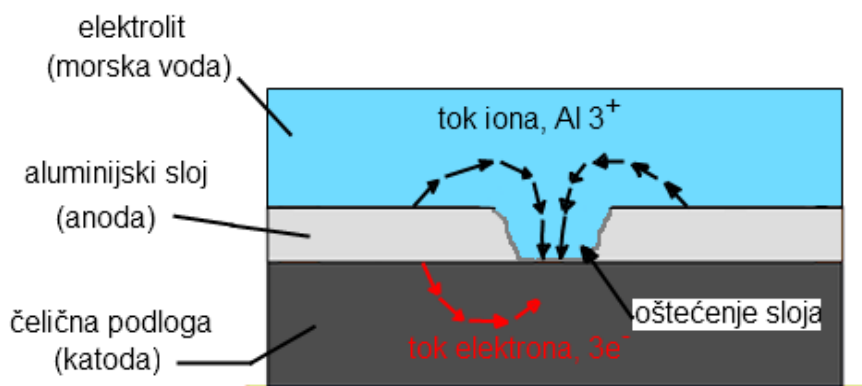
3.1 Princip djelovanja TSA slojeva

Aluminijski sloj naštrcan plinskim postupkom predstavlja fizičku barijeru između čelične podloge i njezinog u korozijskom smislu nepovoljnog okruženja. No, ako se naštrcani sloj ošteti zbog kontakta obaju metala s elektrolitom zatvoriti će se strujni krug između anode (aluminijskog sloja) i katode (čelika). Manje plemeniti metal galvanskog para postat će anoda. Potencijal pojedinih važnijih materijala u morskoj vodi kao elektrolitu prikazan je **tablicom 3.1**.

Tablica 3.1 Usporedba korozijskih potencijala pojedinih materijala u odnosu na vodikovu elektrodu u morskoj vodi [13]

Materijal	Korozijski potencijal E° [V]
cink	-0.83 do -0.76
aluminij	-0.66 do -0.53
ugljični čelik	-0.48 do -0.21
austenitni Cr-Ni čelik u aktivnom stanju	~ -0.10
nikal	~ -0.02
krom	~ 0.23
austenitni Cr-Ni čelik u pasivnom stanju	~ 0.60

Nadalje, na anodi (manje plemenitom metalu) odvijati će se anodna reakcija (oksidacija), tj. metal će davati pozitivno nabijene ione (Al^{3+}) elektrolitu, pritom otpuštajući elektrone ($3e^{-}$) koji odlaze na štice metal čime se zaustavlja korozija. Princip katodne zaštite čelične podloge anodnim slojem aluminija u morskoj vodi kao elektrolitu prikazan je na **slici 3.1**.



Slika 3.1 Katodna zaštita čelika aluminijskim slojem u morskoj vodi [14]

Iako je iz **tablice 3.1** vidljivo da je aluminij manje plemeniti metal i da bi pri pojavi galvanske korozije on trebao korodirati, oksidni film koji se stvara na površini aluminijskog sloja pasivan je prema atmosferama koje ne sadrže puno klorida. U takvom stanju ponaša se kao plemenitiji metal od čelika i nije mu u mogućnosti pružiti katodnu zaštitu. Primjena aluminijskih slojeva u svrhu zaštite od korozije ipak postoji u atmosferama koje sadrže mnogo klorida jer se zbog prisustva kloridovih iona gubi pasivnost aluminijskog sloja.

Primjena plinski naštrcanih aluminijskih slojeva u zaštiti od korozije stoga je prilično ograničena, ali ipak u uvjetima gdje je koncentracija klorida u okolini povišena ($>100 \text{ mg Cl}^- \text{ m}^2/\text{dan}$) zbog prisustva kloridovih iona, aluminij gubi pasivnost i tada pruža potrebnu katodnu zaštitu čeličnoj podlozi [15]. Iz toga se može zaključiti da je korištenje aluminijskih slojeva pogodna za primjenu u morskim sredinama. Za zaštitu čelika u plinskim i kemijskim postrojenjima, ili pri upotrebi gdje temperature iznose od 200 do 600 °C također se koristi aluminij. U slučaju da se aluminij legira sa cinkom, moguće je dobiti veći efekt otpornosti koroziji jer legura ima svojstva obje komponente. Cink pruža povećanu elektrokemijsku aktivnost omogućavajući katodnu zaštitu, a aluminij ojačava naštrcani sloj čini ga otpornijim na abraziju i eroziju [9].

Brzina korozije aluminijskog sloja proporcionalna je gustoći anodne struje galvanskog para [11]. Prosječna brzina korozije anode u galvanskom strujnom krugu prikazana je izrazom (3.1):

$$\bar{v}_{kor} = k \frac{E_k - E_a}{S_a R} \quad (3.1)$$

gdje je: k - konstanta za određeni proces korozije; S_a - površina anode; $(E_k - E_a)$ - efektivni napon strujnog kruga; R - otpor elektrolita

Iz izraza (3.1) možemo primjetiti da je :

$$\frac{E_k - E_a}{R} = I_{kor} \quad (3.2)$$

$$\frac{I_{kor}}{S_a} = i_{anode} \quad (3.3)$$

gdje je: i_{anode} - gustoća anodne struje (najvažniji faktor u procesu korozije)

Pojednostavljeni izraz za brzinu korozije anodnog sloja glasi:

$$\bar{v}_{kor} = k \times i_{anode} \quad (3.4)$$



3.2 Primjena aluminijski naštrcanih slojeva (TSA)



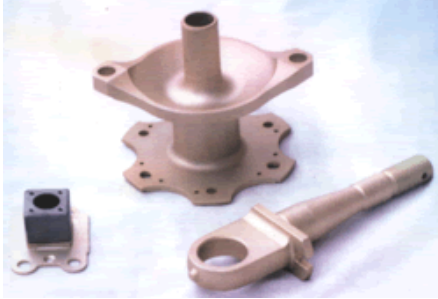


U posljednjih 20 godina, toplinsko naštrcavanje aluminijski slojeva (TSA) postaje sve važnija metoda pri provođenju katodne zaštite čeličnih konstrukcija u morskim sredinama. Primjena se odnosi na cijevi na kojima su postavljene platforme, izmjenjivače topline, mostove, dijelove brodova, spremnike i vjetroturbine smještene na otvorenom moru, **tablica 3.2**.

Toplinski naštrcani aluminijski slojevi imaju brojne prednosti pred zaštitnim sustavom koji se izvodi premazima. Neke od prednosti su [16] :

- troškovi nanošenja sloja mogu biti i do 30 % manji od zaštite premazima,
- podnose temperature i do 480°C,
- dugotrajnost zaštite od korozije može iznositi do 20 godina pri minimalnom održavanju,
- predstavljaju fizičku barijeru između okoline i štice površine, a u slučaju lokalnog oštećenja aluminijski sloj služi kao anodna prevlaka koja, trošeći se, nastavlja štiti podlogu.

Tablica 3.2 Primjeri primjene aluminijski naštrcanih slojeva

Al naštrcani stupovi koji su nosiva konstrukcija platforme na otvorenom moru [17]	 A photograph of an offshore oil platform, showing its complex steel structure and various cranes, situated in the middle of the ocean under a blue sky.
Izmjenjivači topline [18]	 A photograph of a large industrial heat exchanger unit, which is a long, dark-colored metal structure, mounted on a multi-axle trailer. It is parked on a paved area in front of a building.

<p>Naštrcavanje aluminijskih slojeva na potporne stupove u željezničkoj infrastrukturi [19]</p>	
<p>Dijelovi mostova zaštićeni aluminijski naštrcanim slojem [16]</p>	
<p>Elementi strojeva: Školjkasto kućište, Cilindrični kanali izloženi povišenim temperaturama [20]</p>	
<p>Automatizirano naštrcavanje cijevi cjevovoda. [16]</p>	
<p>Nosivi stupovi i elise vjetroelektrana na otvorenom moru [16]</p>	

4. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom radu za postupak robotiziranog naštrcavanja korištena je oprema za plinsko naštrcavanje Castolin Castodyn DS 8000 i SCARA robot. Za korektno izvođenje naštrcavanja robotom prethodno je bilo potrebno izraditi i niz nestandardnih dijelova.

Obradak koji je naštrcan je pločica dimenzija 100 x 100 x 7 mm od općeg konstrukcijskog čelika oznake S 235 JR. Broj uzoraka (pločica) koji se naštrcavaju je 20, od toga 10 za slučaj robotiziranog naštrcavanja, i 10 za slučaj ručnog naštrcavanja. Dodatni materijal koji se koristio je 99%-tni aluminijski prašak komercijalnog naziva Rototec 29220.

Pri robotiziranom naštrcavanju obradak je pomoću posebno izrađenih naprava pričvršćen na glavu robota. Robot obavlja sva gibanja, a pištolj je fiksiran na radnom stolu na određenoj udaljenosti od površine koju treba naštrcavati.

Za ručno izvođenje naštrcavanja korištena je ista oprema, uz razliku što robot služi samo kao držač obradka i ne vrši nikakva gibanja. Sva navedena oprema nalazi se u Laboratoriju za alatne strojeve FSB-a.

Za potrebe utvrđivanja kvalitete naštrcanih slojeva ispitivana su najvažnija eksploatacijska svojstva aluminijskih slojeva, a to su: prionljivost, debljina i korozijska postojanost.

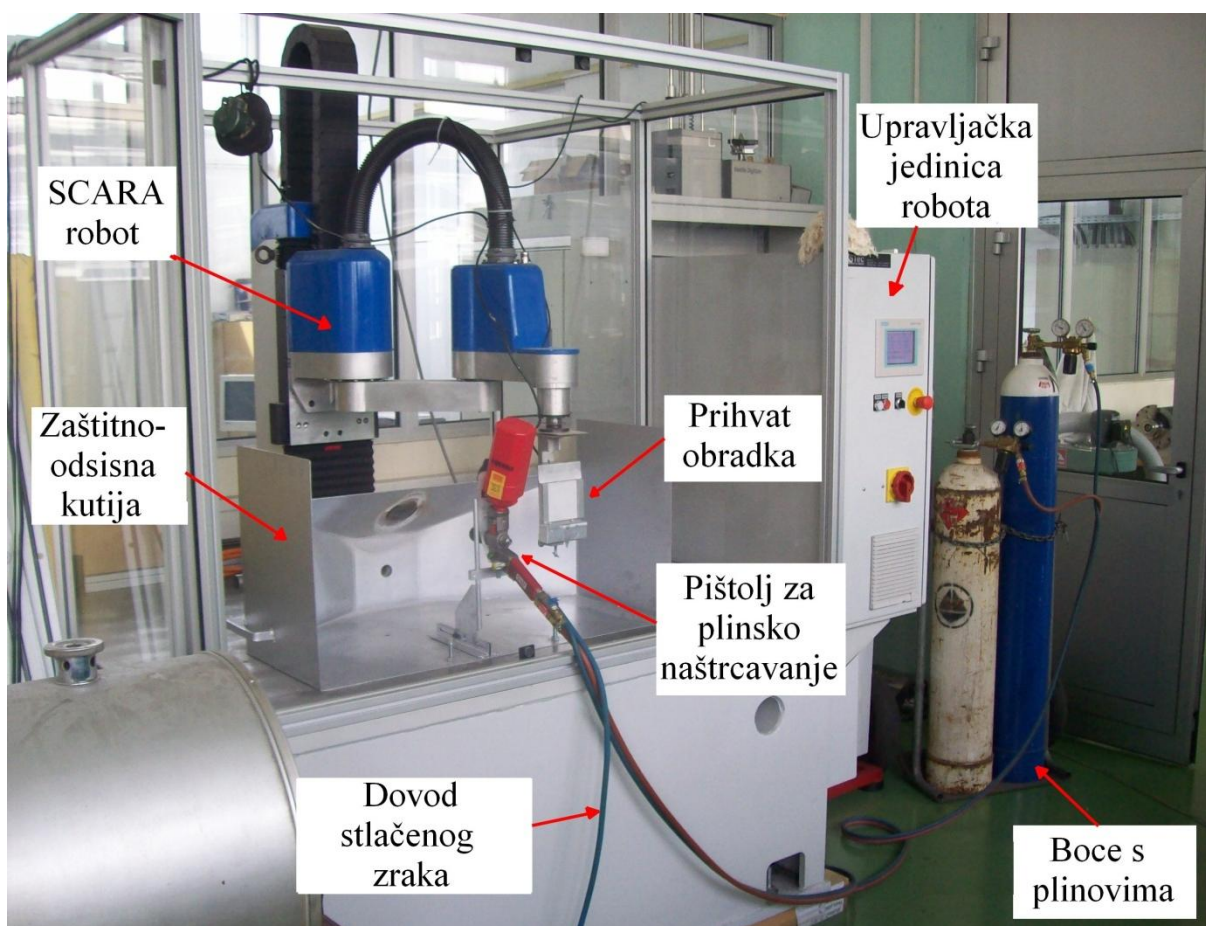
Prionljivost naštrcanog sloja mjerila se u skladu s normom EN 582. Za provedbu navedenog ispitivanja shodno navedenoj normi izrađeni su uzorci tipa B koji su izrezani iz naštrcanih pločica. Njihova debljina je 7 mm, promjer 25 mm, a lijepe se između pomoćnih epruveta.

Prema normi ISO 2064 izvršeno je mjerenje debljine aluminijskih slojeva, a korištena aparatura je uređaj "Quanix" koji mjeri debljinu na principu promjene magnetskog toka.

Elektrokemijska ispitivanja su provedena u skladu s normom DIN 50918 na uređaju Potentiostat/Galvanostat koji omogućuje praćenje promjena općih parametara korozijske E_{kor} , v_{kor} i R_p za vrijeme elektrokemijskih istraživanja.

4.1 Oprema za robotizirano plinsko naštrcavanje

Sustav za robotizirano naštrcavanje aluminija koji je primjenjen za potrebe ovog rada složene je građe, a sastoji se od opreme za plinsko naštrcavanje i SCARA robota. Oprema za naštrcavanje sastoji se od pištolja proizvođača Castolin tip CastoDyn DS8000, boce s gorivim plinom (acetilen), boce s nosivim plinom (kisik), te kompresora kao izvora stlačenog zraka. SCARA robot proizvođača HSTec služi obavljanju glavnog i posmičnog gibanja u procesu naštrcavanja. Od ostale opreme tu je sustav za zaštitu robotske stanice koji ujedno služi i odsisu štetnih plinova i aluminijskih čestica. Kompletna oprema koja je prikazana **slikom 4.1** nalazi se u Laboratoriju za alatne strojeve na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.



Slika 4.1 Sustav za robotizirano plinsko naštrcavanje aluminijskih slojeva

4.2 Opis i operative karakteristike pištolja za naštrecavanje

Pištolj za naštrecavanje CastoDyn DS 8000 i njegove komponente izvedeni su modularno a njihovo sastavljanje je vrlo jednostavno. Pištolj je izrađen modernom tehnologijom i njime možemo naštrecavati gotovo sve vrste praškova. Sadrži četiri modela naštrecavajućih sapnica od kojih je svaka primjenjiva za različitu vrstu materijala. Moduli pištolja se lako mijenjaju bez upotrebe bilo kakvih alata. Pištolj je lagan i samim time prikladan za rukovanje. Ima mogućnost podešavanja protoka praška u 6 razina. Održavanje pištolja nije zahtjevno. Priključivanje plinskih crijeva na pištolj također je jednostavno i brzo. Pištolj sa svim komponentama prikazuje **slika 4.2**, a shemu pištolja za plinsko naštrecavanje prikazuje **slika 4.3**.



Slika 4.2 Prikaz sastavljenog pištolja s komponentama CastoDyn DS8000 [21]

1. Standardni spremnik praška,
2. Prihvat spremnika praška,
3. Membrana za kontrolu protoka praška sa 6 podesivih opcija,

4. Zatvarač. Zatvorena pozicija (žuta) omogućuje da se spremnik praša učvrsti ili skine s pištolja. Otvorena pozicija (zeleno) ne dozvoljava učvršćivanje spremnika praška dok prašak pada.
5. Raspršivač praška. Određuje količinu protoka plina koji prenosi prašak.
6. Ventil stlačenog zraka. Pritisnut crveni gumb: ventil zatvoren; Pritisnut zeleni gumb: ventil otvoren,
7. Ventil za acetilen. Ručica regulira protok acetilena,
8. Ulazni konektor za kisik. Standardni radni tlak: 4 bar,
9. Ulazni konektor za acetilen. Standardni radni tlak: 0,7 bar,
10. Ulazni konektor za stlačeni zrak. Obuhvatni dio konektora je dio standardnog kompleta i prihvaća crijevo stlačenog zraka.
11. Prekidač za kisik i acetilen. Otvorena pozicija: prekidač vertikalno. Zatvorena pozicija: prekidač horizontalno i straga.
12. Šipka za montiranje pištolja na postolje.
13. Štitnik standardne sapnice (SSM). Osigurava sapnici lagano umetanje i siguran spoj sa tijelom pištolja, a da pritom ne curi plin.
14. Sapnica (oblik drugačiji od SSM-a). Služi ubacivanju praša u plamen.
15. Fokusirajuća sapnica sa stlačenim zrakom.
16. Štitnik od topline. Na njemu su označeni potrebni tlakovi plinova.

U **tablici 4.1** prikazani su tehnički podaci pištolja koji je korišten u praktičnom dijelu rada:

Tablica 4.1 Tehnički podaci pištolja Castolin za plinsko naštrcavanje [21]

CastoDyn DS 8000		
Tlak kisika:	4.0 bar	
Tlak acetilena:	0.7 bar	
Moduli naštrcavajuće sapnice:	SSM 10, SSM 20, SSM 40	SSM30
Protok kisika:	1000 l/h	2000 l/h
Protok acetilena:	950 l/h	1800 l/h
Snaga plamena:	14 kW	28 kW

Moduli naštrcavajućih sapnica koriste se u ovisnosti o vrstama praškova koji se primjenjuju [21]:

SSM10 za naštrcavanje praškova vrste RotoTec i ProXon

SSM 20 za naštrcavanje praškova vrste Eutalloy RW

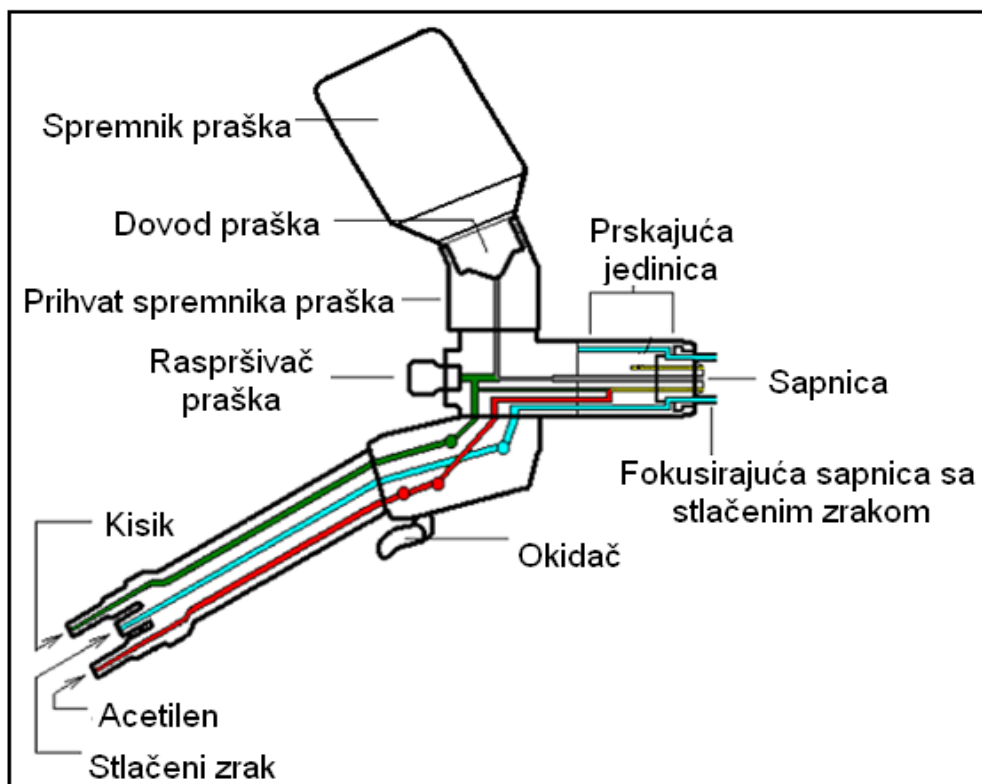
SSM 30 za naštrcavanje praškova vrste MetaCeram

SSM 40 za naštrcavanje praškova vrste RotoTec LT, CastoPlast, CeraTuff

Radi pojašnjenja komercijalnih naziva praškova za naštrcavanje, u **tablici 4.2** navedeni su primjeri iz svake skupine.

Tablica 4.2 Komercijalni nazivi i primjeri vrste praškova [22]

Skupina praška	Opis	Primjeri vrste praška
"RotoTec"	metalni prašak koji se naštrcava uz primjenu veznog sloja	CuSn 8, CuAl 10, Zn 99,5
"ProXon"	metalni prašak koji se naštrcava bez primjene veznog sloja	CuAl 10 Fe, NiAlMo 90 5 5
"Eutalloy RW"	metalni prašak koji se naštrcava s naknadnim utaljivanjem	NiCrBSi 74 15, NiBSi 95, NiCrBSi 80 11
"MetaCeram"	visokotaljivi materijali	Al ₂ O ₃ -TiO ₂ 97 3, Al ₂ O ₃ -TiO ₂ 60 40, Mo 99
"CastoPlast"	plastični materijali	poliamid –PA



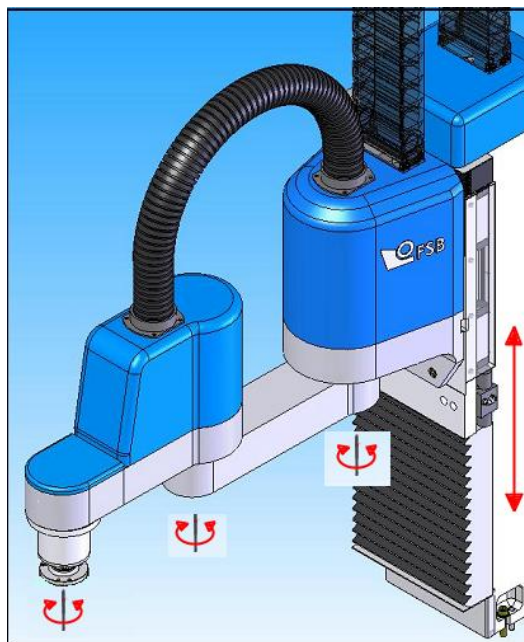
Slika 4.3 Shematski prikaz pištolja za naštrcavanje CastoDyn DS8000 [22]

Dizajn pištolja osigurava vrlo siguran protok obaju plinova. Pretlak plinova preporučen je od strane proizvođača i iznosi 4 bar za kisik i 0.7 bar za acetilen. Podešavanje navedenih tlakova izvodi se ventilima koji se nalaze na bocama. Izvor topline za taljenje dodatnog materijala je neutralni plamen. Metalni prah se nasipava u spremnik praša a trajanje jednog punjenja ovisi o intenzitetu naštrcavanja i o korištenom modelu naštrcavajuće sapnice. Priključivanje pištolja na bocu kisika i acetilena te na izvor stlačenog zraka izvodi crijevima preko sigurnosnih ventila. U slučaju da se želi kontinuirani ili duži rad postavljenog pištolja, boce s kisikom i acetilenom mogu biti spojene u bateriju.

4.3 Robot SCARA

Roboti SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm) tipa su vrlo brojni u zadaćama montaže, ali nisu poznati primjeri primjene ovakve izvedbe robotskih modula za izvedbu gibanja kod toplinskog naštrcavanja. Za razliku od klasičnog SCARA robota translacija po osi Z nije smještena u ručnom zglobu već je u stupu robota. Smještanjem osi Z u “stup” robota povećava se stabilnost i nosivost, a primjenom direktnog pogona osi Z veća brzina.

Kod konkretnog SCARA robota postoje tri kinematička para. Na donjem kraju robotske ruke pričvršćen je završni mehanizam – šaka robota ili prihvatnica. Prihvatnicom robot prihvaća različite predmete ili alat kojim obavlja različite zadaće, a u ovom slučaju se i prihvatnica može gibati oko vertikalne osi, **slika 4.4**.



Slika 4.4 3D model 4-osne inačice robotske ruke SCARA s prikazom neovisnih gibanja [23]

Nadlaktica robotske ruke Scara može se pomicati po vertikali, zglob u ramenu i podlaktica u lakatnom zglobu mogu se okretati oko vertikalne osi, dok je prihvatnica učvršćena na podlakticu, a po potrebi može se i prihvatnica okretati oko vertikalne osi. Dijelovi te robotske ruke mogu dakle izvoditi četiri neovisna gibanja kao što je prikazano na **slici 4.4**. Prostor u kojem se giba

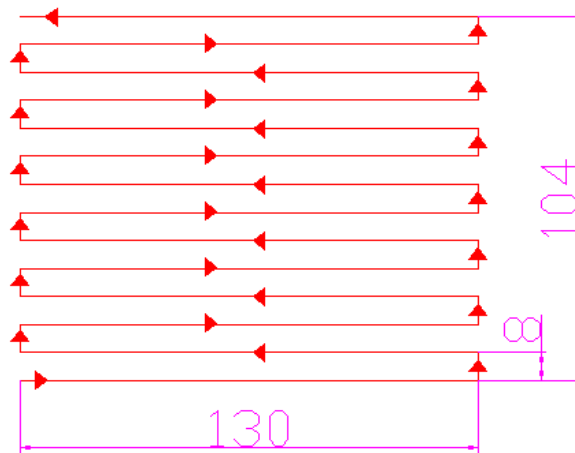
prihvatnica naziva se radni prostor robota. Tehnički podaci konkretnog SCARA robota navedeni su u **tablici 4.3**.

Tablica 4.3 Tehnički podaci prototipa robota SCARA tvrtke HSTec [23]:

Nosivost	15 kg
Maksimalna brzina	50 m/min
Duljina zglobne ruke	650mm
Obuhvatni kut radnog prostora	230°
Duljina gibanja po Z-osi	700mm
Broj osi	4

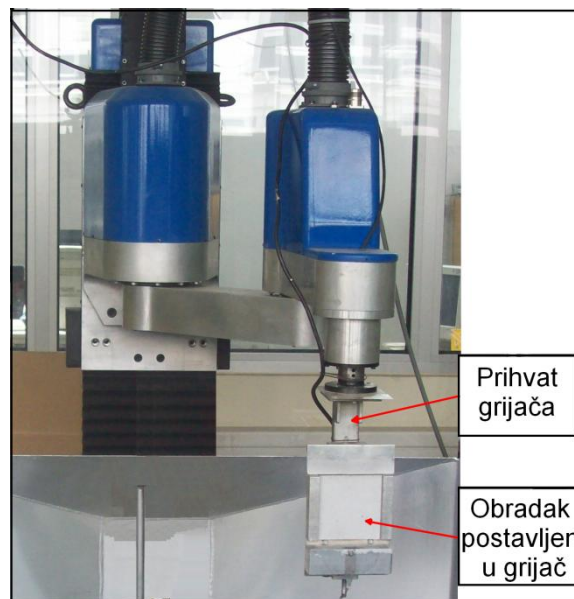
U postupku robotiziranog plinskog naštrcavanja robot SCARA obavlja sva gibanja (i glavno i posmično), a pištolj za naštrcavanje je fiksiran. Da bi se proces korektno izvršio treba biti moguće postići brzine glavnog gibanja od oko 10-20 m/min. Posmična gibanja trebaju se obaviti u što kraćem vremenu, a da bi naštrcavanje bilo korektno izvedeno potrebno je ovisno o veličini naštrcavanog komada i po nekoliko desetaka prolaza.

Budući da su dimenzije površine eksperimentalnog obradka 100 x 100 mm, trebalo je dimenzionirati putanju po kojoj će se gibati robotska ruka, a ona je širine 130 mm, i visine 104 mm. Predviđeno je da naštrcavanje počinje u donjem lijevom uglu obradka. Putujući u desno robot se treba gibati brzinom 12m/min. Kada prevali zadani put, ruka se treba zaustaviti, izvršiti posmak od 8 mm i onda vratiti nazad u lijevo. Potrebno je 13 naglih promjena smjera da bi se pravilno naštrcalo radni komad zadanih dimenzija. Izgled i dimezije putanje kojom se prikazuje proces naštrcavanja prikazani su **slikom 4.5**.



Slika 4.5 Putanja pri naštrcavanja obradka

Zbog učestale i nagle promjene gibanja robota konstrukcija koja nosi obradak mora biti pažljivo projektirana. Za potrebe eksperimentalnog dijela izrađen je poseban prihvat koji omogućava jednostavnu ugradnju i učvršćivanje na standardnu prihvatnicu robota. Prihvat također mora pouzdano držati grijač zajedno s obradkom pri naglim promjenama kretanja. Isto tako izrađeni prihvat zajedno s grijačem u kojem se nalazi obradak moraju težiti što je manje moguće. Upotrebom aluminijskih materijala u izradi prihvata i grijača kao i pažnjom pri dimenzioniranju postigla se masa navedenih komponenti koje zajedno s obradkom teže znatno manje od graničnih 15 kg. Sustav u kojem su SCARA robot, prihvat grijača koji je montiran na šaku robota i obradak umetnut u grijač za održavanje temperature predgrijavanja prikazani su **slikom 4.6**.



Slika 4.6 SCARA robot s pripadajućim napravama za prihvat obradka

4.4 Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten pri toplinskom naštrcavanju je opći konstrukcijski čelik oznake S 235 JR čiji je kemijski sastav negarantiran. U **tablici 4.4** navedena su njegova mehanička svojstva.

Tablica 4.4 Mehanička svojstva osnovnog materijala S 235 JR [10]

-	Mehanička svojstva			
Oznaka čelika	Granica razvlačenja R_e (N/mm ²)	Vlačna čvrstoća R_m (N/mm ²)	Udarna radnja loma na 20 °C KV (J)	Produljenje A(%)
S 235 JR	235	340 - 470	27	21

Dimenzije obradaka nad kojima je izvršeno plinsko naštrcavanje su dimenzija 100 x 100 x 7 mm, a izrezani su laserom iz lima dimenzija 1500 x 1000 x 7 mm.

4.5 Dodatni materijal

Odabir vrste dodatnog materijala ovisi o zahtjevima i funkciji sloja kao i o postupku toplinskog naštrcavanja. Za potrebe eksperimentalnog rada u svrhu antikorozivne zaštite odabran je dodatni materijal u obliku praška na bazi aluminijskog proizvođača Castolin komercijalnog naziva "ROTOTEC 29220". To je aluminijski prašak koji se naštrcava bez veznog međusloja. Niske je razine poroznosti te ima mogućnost impregnacije radi zaštite od korozije u slanoj i slatkoj vodi. Njegova tehnička svojstva dana su u **tablici 4.5**.

Tablica 4.5 Tehničke značajke dodatnog materijala ROTOTEC 29220 [24]

Način proiz.:	Kem. sastav [%]:	Razdioba veličina čestica praška [μm]:	Gustoća [g/cm ³]:
atomiziran	99 Al +Fe+Si+Zn	38-106	2,9

4.6 Tehnologija naštrcavanja

Kada se govori o tehnologiji naštrcavanja treba razlikovati varijabilne od konstantnih parametara. Konstantni parametri važni su da bi se uopće mogao izvršiti proces naštrcavanja, ali su najčešće već unaprijed definirani. Pri izradi tehnologije naštrcavanja bitno su zanimljiviji varijabilni parametri jer o njima ovise svojstva slojeva.

Pri odabiru parametara plinskog naštrcavanja aluminijskog praška na čeličnoj podlozi u fazi predistraživanja razmatralo se korištenje parametara propisanih od strane proizvođača dodatnog materijala, ali su te preporuke bile neprecizne i u fazi predpokusa nisu se pokazale dobre. Zbog toga se pristupilo odabiru parametara iz literature [12] čija je povoljna kombinacija rezultat temeljitog istraživanja u području plinskog naštrcavanja aluminijskog praška.

4.6.1 Parametri robotiziranog naštrcavanja

Kada se govori o plinskom naštrcavanju aluminijskog praška mora se uzeti u obzir čitavi niz parametara koje utječu na kvalitetu izvođenja postupka. Te parametre moguće je podijeliti u dvije važne skupine.

Prva skupina parametara su konstantni parametri. Konstantni parametri unaprijed su zadani ili od strane proizvođača opreme za naštrcavanje ili od tehnologa, a ovise o konstrukcijskim ograničenjima pištolja, uporabi različitih sapnica, veličini i obliku naštrcavanog predmeta i sl. Oni također ovise i o upotrebljenom dodatnom materijalu i njegovim karakteristikama poput geometrijskog oblika čestica praška i njihovoj veličini. Važno je spomenuti da su svi konstantni parametri unaprijed definirani bilo da se do njih došlo po preporuci proizvođača ili temeljem pokusa. U **tablici 4.6** dani su konstantni parametri važni za izvođenje eksperimentalnog rada kao i njihove vrijednosti.

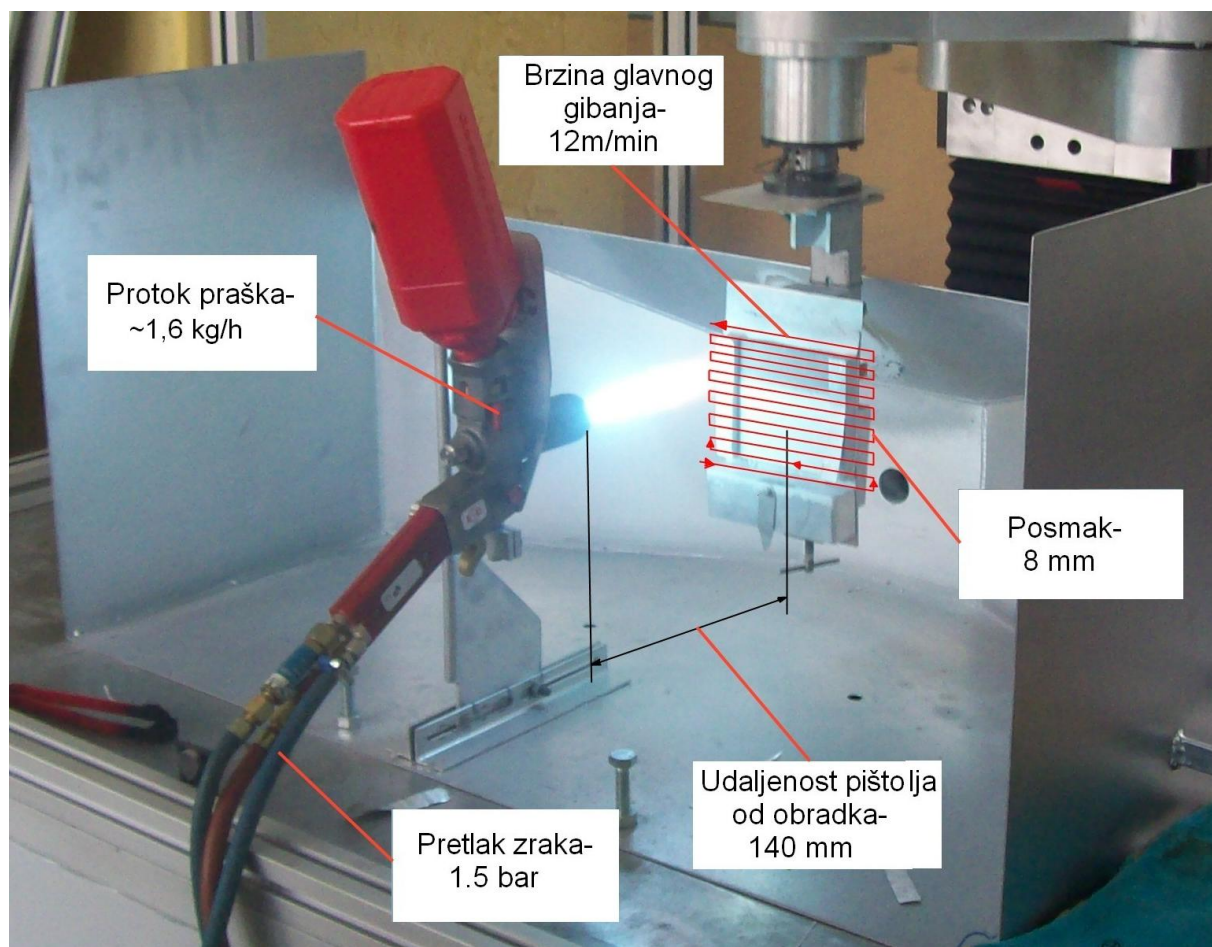
Tablica 4.6 Konstantni parametri u toku plinskog naštrcavanja aluminija [7, 12, 21, 24]

Parametar	Vrijednost parametra	Oznaka
Osnovni materijal	Opći konstrukcijski čelik	S 235 JR
Dimenzije osnovnog materijala	100 x 100 x 7 mm	a * b * c
Hrapavost površine osnovnog materijala	62,5 – 82,5 μm	R_{p_z}
Dodatni materijal (prašak)	antikorozijski (aluminij)	RotoTec 29220
Modul sapnice	SSM20	-
Plinski plamen	14 kW, neutralan	P_{plam}
Pretlak acetilena	0.7 bar	p_a
Pretlak kisika	4 bar	p_k
Protok acetilena	~950 l/h	q_a
Protok kisika	~1000 l/h	q_k
Temperatura površine osnovnog materijala	120-130°C	T_p
Sobna temperatura laboratorija	20 °C	T_{sob}

Druga skupina parametara nije konstantna pa iznos takvih parametara nije moguće jednostavno odrediti, a nazivaju se varijabilni parametri. Njih se odabire na temelju iskustava, preporuka iz literature, te istraživanja. Pravilan odabir parametara za robotizirano naštrcavanje, njihova iznosa i njihovog odgovarajućeg omjera od presudne su važnosti za kvalitetu sloja. Kod odabira parametara robotiziranog naštrcavanja pri izvođenju eksperimenta koristili su se podaci iz literature [12], a odabrana je jedna od kombinacija parametara za koju se pretpostavilo da može dati rezultate vrijedne daljnjeg istraživanja. Isto tako valja istaknuti da kada je riječ o robotiziranom naštrcavanju, te je parametre moguće u potpunosti kontrolirati dok bi za ručno izvođenje to bilo vrlo teško izvedivo. Popis i veličina varijabilnih parametara dani su u **tablici 4.7**, a prikazani **slikom 4.7**.

Tablica 4.7 Varijabilni parametri [12]

Parametar	Oznaka	Iznos
Brzina gibanja u odnosu pištolj - obradak	v_{pl}	12 m/min
Posmak	s	8 mm
Udaljenost pištolja od obradka	l	140 mm
Tlak komprimiranog zraka	p_z	1,5 bar
Protok praška	q_{pr}	~1.6 kg/h



Slika 4.7 Prikaz varijabilnih parametara

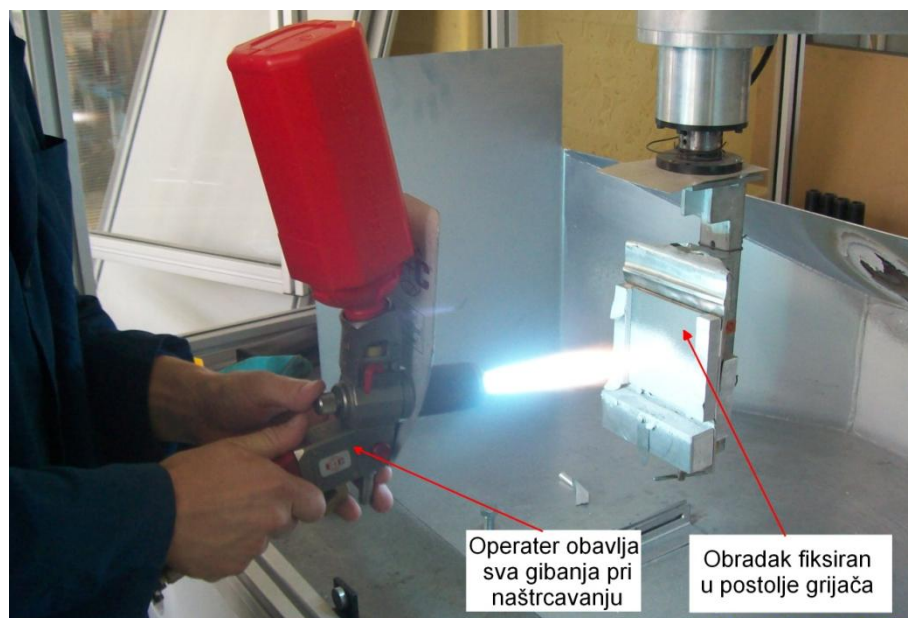
4.6.2 Oprema i parametri pri ručnom izvođenju plinskog naštrcavanja

Cjelokupna oprema korištena pri robotiziranom naštrcavanju koristila se i za ručno naštrcavanje, samo što se promjenila funkcija pojedinih elemenata sustava. Robot je poslužio samo za fiksno pridržavanje obradka, a sva gibanja pri naštrcavanju obavljao je operater koji pomiče pištolj u željenom smjeru.

Kada se radi o ručnom izvođenju plinskog naštrcavanja nije moguće egzaktno odrediti veličinu varijabilnih faktora. Kod ručnog naštrcavanja možemo nabrojiti četiri glavna parametra koji se u izvođenju procesa mijenjaju gotovo svakom trenutku, a to su:

- brzina glavnog gibanja,
- posmak,
- udaljenost pištolja i obradka,
- kut između pištolja i obradka.

U eksperimentalnom dijelu njihov iznos se preporučao izvoditi kao i za robotizirano naštrcavanje, ali u principu točnost njihova usklađivanja ovisi isključivo o vještini, volji i iskustvu čovjeka, tj. o subjektivnim faktorima. Ovdje valja spomenuti i kut između pištolja i obradka koji više ne iznosi uvijek 90° , a najviše se mijenja na kraju svakog glavnog gibanja te tako zbog različitog kuta upada čestica na obradak utječe na debljinu sloja. **Slika 4.8** prikazuje postupak ručnog izvođenja plinskog naštrcavanja aluminijskog aluminija.



Slika 4.8 Postupak ručnog izvođenja plinskog naštrcavanja

4.6.3 Priprema površine obradka

Kao što je već predhodno naglašeno, priprema površine je temeljni preduvjet pri ostvarivanju kvalitetnog naštrcanog sloja. Također je navedeno da se priprema sastoji od čišćenja, hrapavljenja i predgrijavanja. Postoji nekoliko različitih preporuka i mogućnosti za njihovo obavljanje. U pripremi vezanoj za eksperimentalni dio uzeli su se u obzir podaci po preporuci Američke mornarice [25].

Priprema podloge je definirana [25]:

- stupnjem čistoće prema NACE – SA 2,5 ili SA3,
- srednjom hrapavošću R_z od 80 do 100 μm ,
- temperaturom predgrijavanja na 120 - 140 °C.

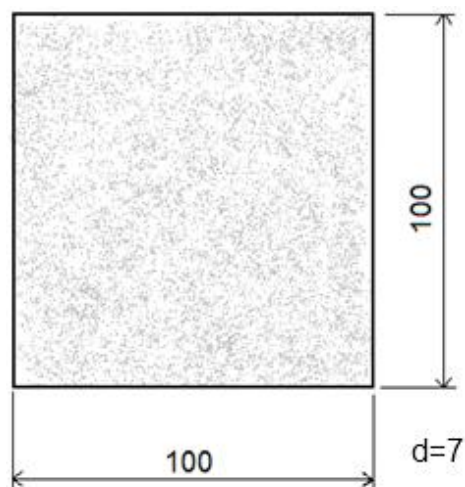
Odmaščivanje površine prije pjeskarenja u eksperimentalnom radu izvodilo se acetonom. Početno čišćenje bitno je jer se njime uklanjaju nečistoće koje bi se uslijed pjeskarenja mogle utisnuti u površinu obradka.

U eksperimentalnom dijelu rada hrapavljenje površine izvršeno je pjeskarenjem. Da bi pjeskarenje bilo učinkovito potrebno je odabrati vrstu i veličinu abraziva, te ostale parametre vezane za pripremu površine. Svi parametri po kojima je moguće postići kvalitetu pripreme SA 3 (ne vide se nečistoće poput ulja, masti, korozivskih produkata...) odabrani su prema preporukama iz literature i prikazani u **tablici 4.8**.

Tablica 4.8 Parametri pjeskarenja [12]

Radni tlak (bar)	6-7
Brzina čestica (m/s)	724
Udaljenost površine (mm)	200
Kut pjeskarenja (°)	80-90
Vrsta abraziva i oblik	Korund, nepravilan i oštih bridova
Granulacija pijeska (mm)	0,20-1,20

Budući da nakon pjeskarenja nije bilo moguće izvesti naštrcavanje u preporučenom roku koji iznosi 4 sata svi obradci zapakirani su u vrećice "Cortec VpCI-126" (Vapor Phase Corrosion Inhibitor) koje imaju funkciju inhibicije korozije. Na taj način spriječila se mogućnost ponovnog pojavljivanja produkata korozije na površini obradka, a samim time i lošije kvalitete naštrcanog sloja. Dimenzije i izgled ohrapavljenog obradka prikazane su **slikom 4.9**.



Slika 4.9 Dimenzije obradka

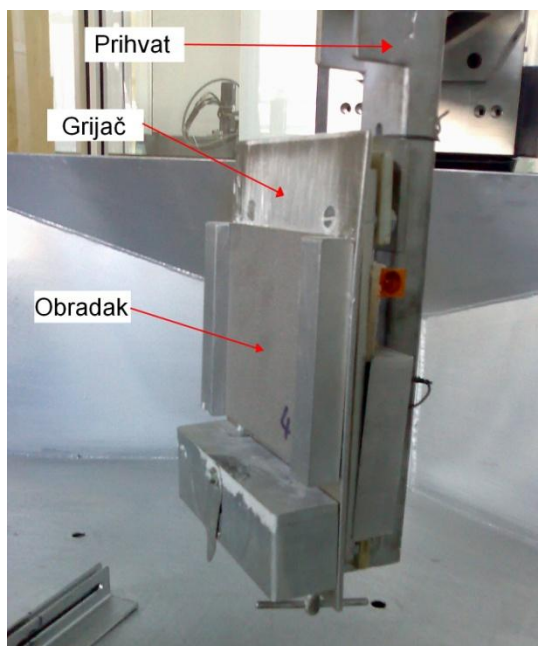
Nakon pjeskarenja, a prije samog naštrcavanja obradak je potrebno još jednom podvrgnuti postupku čišćenja. Ovoga puta to je zbog uklanjanja nečistoća koje nastaju zbog kontakta abraziva i površine. Na površini tako mogu ostati sitni dijelovi abraziva ili se površina može ponovo zamastiti. Čišćenje se ponovo izvodi acetonom jer je njegova efikasnost zadovoljavajuća, a manje je štetan po zdravlje čovjeka od nekih drugih sredstava. Na kraju se površina treba isprati destiliranom vodom i osušiti.

U pripremi eksperimentalnog rada obradci su predgrijavani u peći za sušenje jezgri kalupa. Ovaj način odabran je jer su obradci manjih dimenzija, pa ih se 10 komada može predgrijavati istovremeno, a i temperatura obradka je ujednačena po cijeloj njegovoj površini. **Slika 4.10** prikazuje električnu peć u kojoj se zagrijava 10 obradaka istovremeno.



Slika 4.10 Električna peč za predgrijavanje obradaka

Zagrijani obradak zatim se vadi iz peći, umeće u grijač koji je montiran na prihvat robotske ruke. Taj grijač služi za regulaciju temperature predgrijavanja koja iznosi od 120 do 140°C, a ujedno služi i za održavanje temperature. Nakon postizanja temperature predgrijavanja poželjno je što prije započeti s postupkom naštrcavanja. **Slika 4.11** prikazuje obradak umetnut u grijač spreman za početak izvođenja predgrijavanja.



Slika 4.11 Obradak umetnut u grijač učvršćen na prihvat robota

4.7 Mjerenje glavnih svojstava sloja

Najvažnija svojstva naštrcanog aluminijskog sloja su [1, 12]:

- debljina,
- prionljivost,
- korozijska postojanost,
- poroznost,
- hrapavost.

U eksperimentalnom dijelu rada treba izmjeriti, analizirati rezultate te utvrditi odnos između tri najvažnija svojstva aluminijskog sloja, a to su debljina, prionljivost i korozijska postojanost.

Za potrebe eksperimentalnog rada naštrcano je 20 čeličnih pločica dimenzija 100 x 100 x 7 mm. Od toga 10 u postupku robotiziranog naštrcavanja, i 10 u postupku ručnog naštrcavanja. Naštrcavanje je izvedeno poštujući parametre koji su definirani u poglavlju 4.6. Dobiveni rezultati poslužili su za uspoređivanje ručnog i robotiziranog naštrcavanja, te je utvrđena razlika u kvaliteti, debljini, prionljivosti i korozijskoj postojanosti ručno i robotsko plinski naštrcanih aluminijskih slojeva.

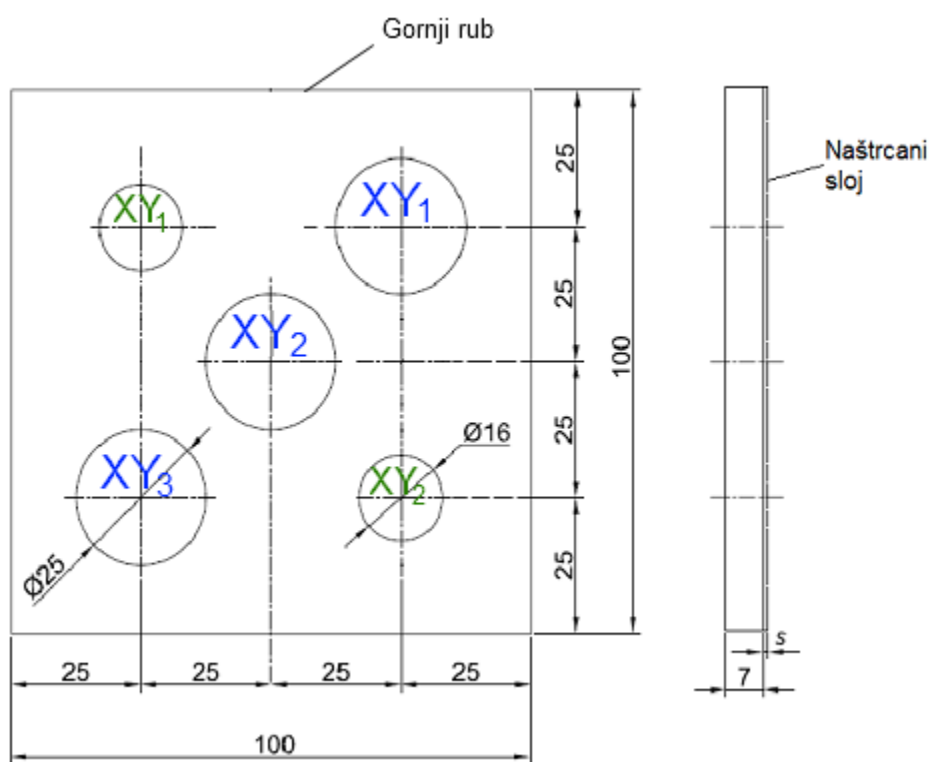
Pri ispitivanju navedenih svojstava izabrane su adekvatne metode i upotrijebljena je mjerna oprema dostupna u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Kada se radi o mjerenju prionljivosti i o mjerenju korozijskog potencijala, postoje standardi po kojima je nužno izraditi propise za provođenje ispitivanja. Nakon provedenog naštrcavanja i mjerenja debljine sloja pristupa se izrezivanju epruveta. Prema preporukama iz literature [12], najpogodnija tehnologija izrezivanja epruveta je pomoću vodenog mlaza s abrazivnim česticama jer je tako najmanja vjerojatnost da će se sloj oštetiti.

Prema normi EN 582 test prionljivosti naštrcanih slojeva izvodi se vlačnim pokusom, a oblik epruvete je tipa B. Promjer epruvete B iznosi 25 mm, a po svakoj naštrcanoj pločici izrezuje se 3 komada. Zbog ograničenih sredstava i prevelikog broja epruveta koji bi se morao ispitivati, broj ispitivanja bilo je potrebno reducirati, tako da su se ispitivala svojstva samo na naštrcanim pločicama koje su imale oznaku neparnog rednog broja. Broj potrebnih ispitivanja tako se prepolovio, a broj epruveta u konačnici je bio 30.

Kod elektrokemijskih ispitivanja dimenzije epruvete zadane su normom DIN 50918. Promjer takve epruvete iznosi 16 mm. Epruveta takve dimenzije odgovara uvjetima ispitne aparature preko koje će površina naštrcanog sloja izložena elektrolitu prilikom ispitivanja iznositi 1 cm². Po svakoj naštrcanoj pločici izrezuju se dvije epruvete, što znači ukupno 20.

Budući da se kod ručnog kao i kod robotiziranog izvođenja postupka počelo naštrcavati odozdo prema gore, svaka pločica je označena na gornjem rubu da prilikom izrezivanja pozicije na kojima su izrezane epruvete budu istovjetne za svaku pločicu. **Slikom 4.12** prikazan je raspored izrezivanja epruveta iz naštrcanih uzoraka.



Slika 4.12 Plan izrezivanja epruveta iz naštrcanih pločica

Kod označavanja pločica vrijedi:

X – redni broj pločice

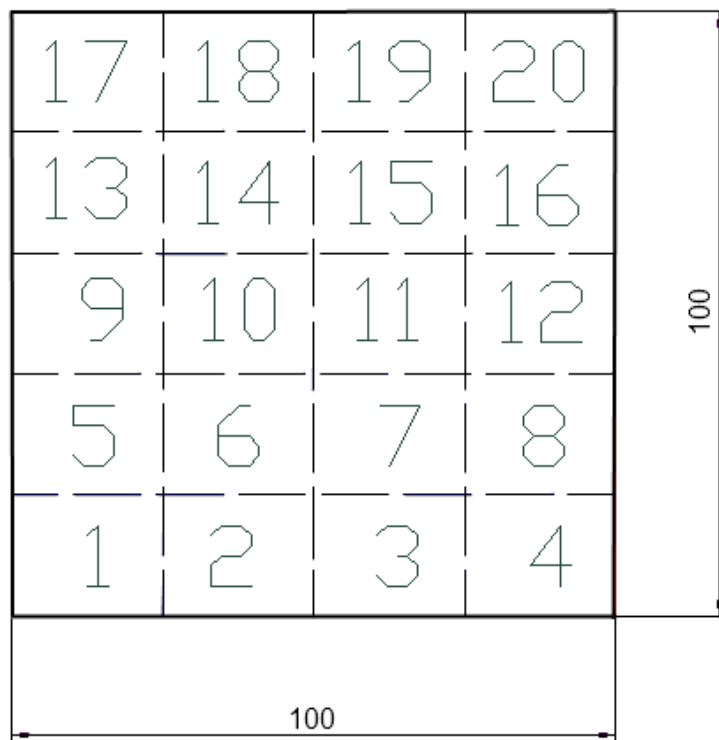
Y – oznaka za način izvođenja naštrcavanja (A – robotizirano; B – ručno)

Nakon naštrcavanja epruvete su se obilježavale voodotpornim markerom sa stražnje strane. Proces je pažljivo obavljen tako da se mogućnost zamjene i pogreške svela na najmanju moguću mjeru. Ovakvom obilježavanju svake pojedine epruvete pristupilo se zbog eventualnih uočavanja ovisnosti svojstava naštrcanog sloja o položaju epruvete na pločici. Položaj izrezivanih epruveta je takav da se one nalaze jedna ispod druge. Obilježavanjem epruveta promjera 25 mm željelo se utvrditi da li se svojstvo prionljivosti u ovisnosti o položaju sustavno povećava ili smanjuje. Kod ispitivanja korozijske postojanosti, kako se radi o jednom ispitivanju po naštrcanoj pločici, nastojalo se uvijek koristiti epruvetu sa iste pozicije, a druga epruveta služila je kao rezerva. Njihovo obilježavanje poslužilo je da ih se ne bi pomiješalo.

4.7.1 Mjerenje debljine naštrcanog sloja

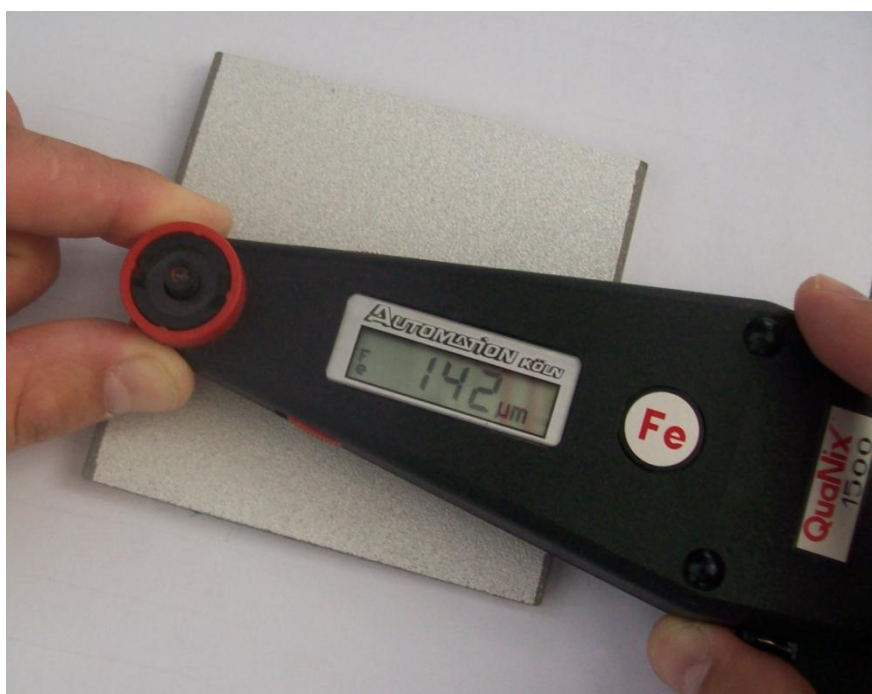
Debljina sloja važna je zato što o njoj ovisi korozivna postojanost aluminijskog sloja. Korozivna postojanost zapravo je proporcionalna debljini. Ipak, važno je napomenuti da iznos srednje debljine sloja može zavarati jer otpornost koroziji veća je što je ujednačenija debljina sloja po cijeloj površini osnovnog materijala. Ujednačena debljina sloja ravnomjerno štiti podlogu na svim pozicijama, dok kod neujednačene debljine sloja pojedina lokalna mjesta mogu biti pretjerano zaštićena, a neka pak premalo što može dovesti do pojave prerane korozije.

Od niza metoda kojima je moguće mjeriti debljinu sloja u praktičnom dijelu rada izabrana je metoda mjerenja debljine bez razaranja koja koristi princip mjerenja promjene magnetskoga toka. Ovakav način mjerenja postiže se upotrebom uređaja Quanax 1500 kojim se mjerilo po 20 točaka na svakom uzorku. Točke nisu stohastički odabirane već je njihov slijed bio po točnom rasporedu kao što prikazuje **slika 4.13**, što znači da su mjerenja izvedena u preddefiniranim kvadrantima. Mjerenja započinju od dna pločice prema vrhu, a tako je započinjalo i naštrcavanje.



Slika 4.13 Pregled pozicija mjerenja debljine naštrcanog sloja

Uređaj Quanix 1500 ispunjava sve uvjete da mjerenje bude korektno izvedeno. Može služiti za mjerenje debljina nemagnetičnih slojeva na feromagnetskim podlogama kao i za mjerenje nemagnetičnih slojeva na ne-feromagnetskim podlogama. Budući da se u ovom primjeru radilo o aluminijskom sloju na čeličnoj (feromagnetskoj) podlozi uređaj se koristi na strani na kojoj je oznaka Fe. Quanix 1500 ima mogućnost pohranjivanja svih izmjerenih podataka koji se kasnije mogu računalno obrađivati, a primjer mjerenja prikazan je na **slici 4.14**.



Slika 4.14 Uređaj Quanix 1500 pri mjerenju debljine sloja.

4.7.2 Mjerenje prionljivosti naštrcanog sloja

Funkcionalnost naštrcanog sloja u velikoj mjeri ovisi o jačini spoja u sustavu sloj/podloga. Točnije, prionljivost između sloja i podloge najvažnije je svojstvo u primjeni naštrcanih slojeva [12, 25]. U slučaju slabog prijanjanja sloja za podlogu postoji velika vjerojatnost da će doći do ljuštenja sloja što je svakako nepoželjno jer podloga u tom slučaju nije zaštićena od korozije koja se progresivno nastavlja i dalje oslabljuje spoj sloj/podloga. Takve posljedice krajnje su nepoželjne, a da se ne govori o slučaju kada bi sustav sloj/podloga bio izložen nekom dinamičkom procesu pri kojem bi moglo nastupiti i potpuno odvajanje sloja od podloge.

Na prionljivost sloja kao što je već objašnjeno bitan utjecaj imaju priprema površine podloge, tj. njena čistoća, hrapavost i temperatura. Također na smanjenje prionljivosti utječu razni uključci, poroznost i oksidi, ali i prevelika debljina sloja.

Metoda koja je korištena u ispitivanju prionljivosti je vlačna proba prema normi EN 582, a po preporuci iz literature [12]. Ova metoda uobičajeno se koristi za mjerenje prionljivosti, a njena prednost je u tome što daje egzaktne kvantitativne vrijednosti.

Prije ispitivanja potrebno je pripremiti epruvete i opremu koja će se koristiti. Iz naštrcanih pločica najprije je potrebno izrezati epruvete čiji su promjeri 25 mm. Prema normi EN 582 najmanji broj epruveta za ispitivanje na jednoj pločici je 3. Prema planu pokusa izrezano je 30 epruveta, po 15 za robotizirano i za ručno naštrcavanje. Pripremljena epruveta prikazana je **slikom 4.15**.



Slika 4.15 Dimenzije (a) i izgled (b) epruvete tipa B za ispitivanje prionljivosti

Oprema za izvođenje ispitivanja sastoji se od dvije pomoćne epruvete, naprave za koaksijalno lijepljenje i vođenje pomoćnih epruveta i milimetarskog vijka. Nabrojena oprema potrebna je za lijepljenje samo jedne epruvete. Oprema za lijepljenje epruvete prikazana je **slikom 4.16**.



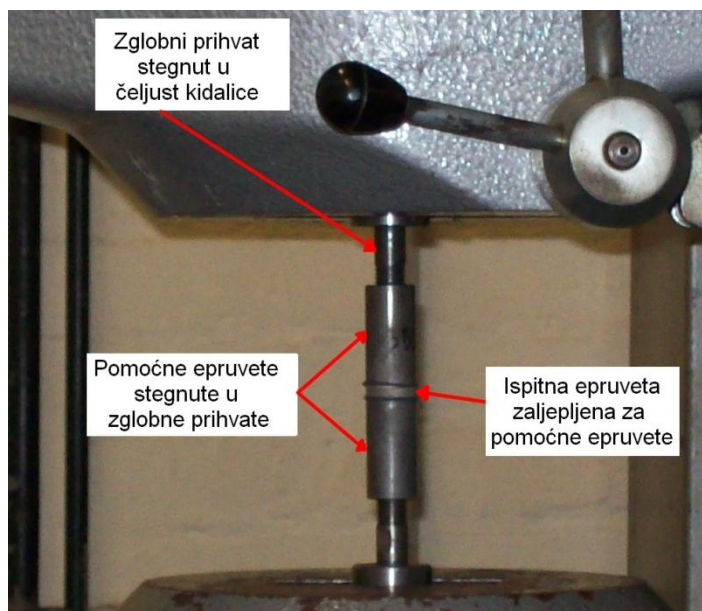
Slika 4.16 Oprema za lijepljenje epruvete u svrhu ispitivanja prionljivosti

Prije samog lijepljenja, čela pomoćnih epruveta bilo je potrebno tokariti da bi se uklonili ostaci prije izvedenih pokusa, a nakon toga ih se pjeskarilo da bi se mogao ostvariti što pouzdaniji lijepljeni spoj. Ljepilo Loctite 9464 koje je korišteno za ispitivanje je dvokomponentnog epoksidnog sastava i ima povišenu čvrstoću na odljepljivanje. Površine ispitne epruvete kao i čela pomoćnih epruveta očišćena su i odmašćena acetonom. Dvokomponentno ljepilo izmješano je prema preporuci proizvođača i nanoseno na željene površine. Zatim su se zaljepljene epruvete umetnute u napravu s posebnim uležištenjem koje odgovara zadanim dimenzijama pomoćnih epruveta. Milimetarskim vijkom ostvarila se regulacija debljine sloja ljepila. Epruvete su na kraju stegnute u napravu i ostavljene na sušenju u trajanju najmanje 4h po preporuci proizvođača ljepila, **slika 4.17**.



Slika 4.17 Zaljepljene epruvete u fazi sušenja

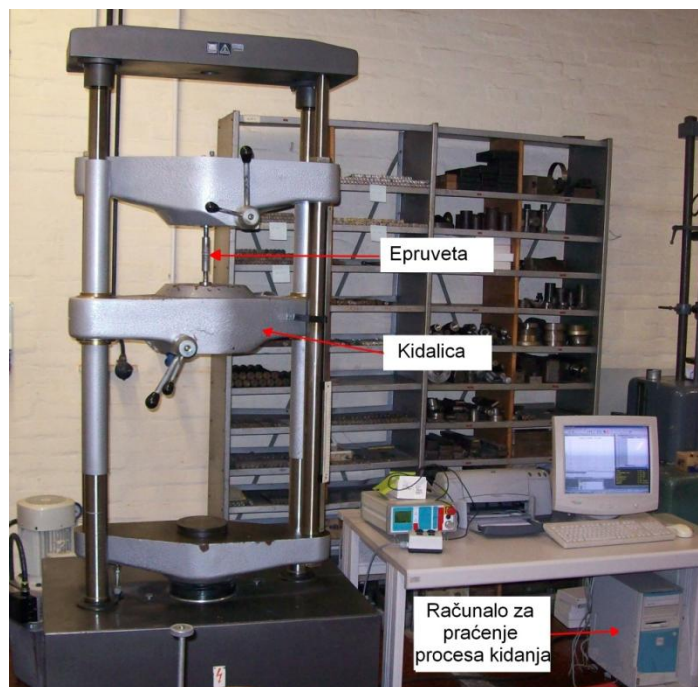
Nakon sušenja pristupilo se stezanju pomoćnih epruveta u zglobne prihvate. Nužno je da prihvatni epruvete imaju zglobove jer se na taj način izbjegava pojava smicanja i momenta savijanja. Osim prihvatni epruvete zglob ujedno služi i kao prihvat u čeljusti kidalice. Prikaz epruvete i zglobnog prihvatni postavljene u kidalicu dan je **slikom 4.18**.



Slika 4.18 Epruveta pripremljena za vlačni pokus

Mjerenja prionljivosti sloja izvedena su na kidalici Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava na FSB-u na sobnoj temperaturi brzinom porasta sile od 1000 ± 100 N/s. **Slika 4.19**

prikazuje opremu za navedeno ispitivanje. Oprema u laboratoriju omogućava praćenje procesa kidanja epruvete na računalo kojim je moguće obraditi podatke.



Slika 4.19 Oprema za kidanje epruvete

Prionljivost sloja računa se prema izrazu (4.2):

$$R_{mi} = \frac{F_{mi}}{S_o} \quad (4.2)$$

Gdje je: R_{mi} – prionljivost sloja za stanje pokusa m epruvete i ; F_{mi} – maksimalna sila pri kidanju epruvete i ; S_o – površina poprečnog presjeka epruvete

Prosječna vrijednost prionljivosti sloja računa se prema izrazu (4.3):

$$R_m = \frac{\sum_1^n R_{mi}}{n} \quad (4.3)$$

Gdje je: R_m - prosječna prionljivost sloja; R_{mi} – prionljivost sloja za stanje pokusa m epruvete i ; n – broj ispitivanja

Poprečni presjek sloja računa se prema izrazu (4.4):

$$S_o = \frac{d^2 \pi}{4} \quad (4.4)$$

Gdje je: S_o - površina poprečnog presjeka epruvete; d - promjer epruvete

4.7.3 Mjerenje korozijske postojanosti prema Tafelovoj metodi

Kada se govori o koroziji u morskim i industrijskim sredinama, u principu se uvijek radi o pojavnom obliku elektrokemijske korozije, pa se tako za ispitivanje korozijskih procesa povezanih s djelovanjem morskog okruženja koriste metode elektrokemijskog ispitivanja.

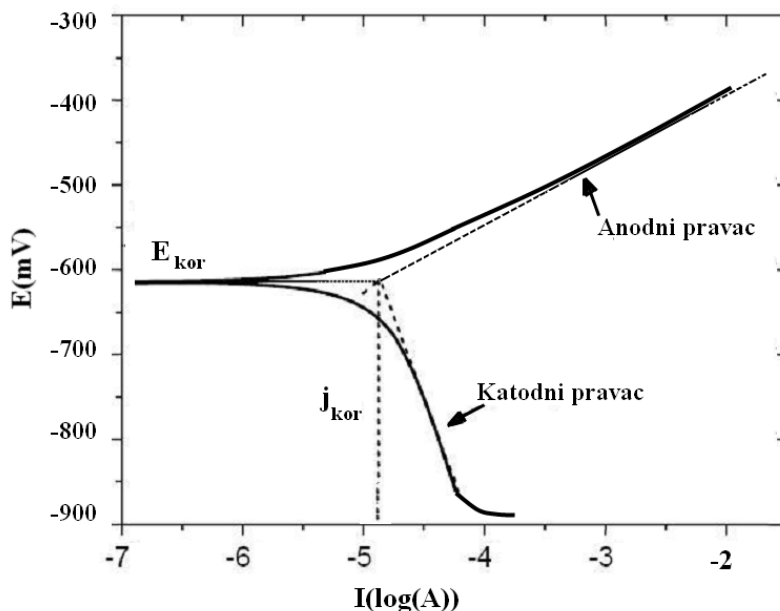
Elektrokemijske metode korozijskih mjerenja mogu se podijeliti na sljedeće skupine [26]:

- bez vanjskog izvora struje:
 - mjerenje korozijskog potencijala, E_{kor} .
- s vanjskim izvorom struje:
 - katodna i anodna polarizacija, Tafelova ekstrapolacija, v_{kor}
 - mjerenje polarizacijskog otpora materijala R_p ,

Metoda kojom su se ispitivali uzorci vezani za eksperimentalni dio rada bila je metoda Tafelove ekstrapolacije, a odabrana je shodno literaturnim podacima i po preporuci stručnjaka iz područja zaštite od korozije.

Radi se o ubrzanom ispitivanju, a tijekom ispitivanja simuliraju se uvjeti u kojima bi naštrcani aluminijski sloj na čeličnoj podlozi bio izložen morskoj atmosferi. Veličine koje su bitne za određivanje brzine korozije su gustoća struje korozije te napon. Poznavajući spomenute veličine određenom analogijom može se odrediti i brzina korozije.

U tijeku ispitivanja vanjskim izvorom struje radna elektroda (naštrcana ispitna epruveta) se polarizira na potencijal u intervalu ± 250 mV. Radna epruveta najprije se polarizira anodno (pozitivnim potencijalom), a zatim i katodno (negativnim potencijalom). U konačnici dobije se Tafelov dijagram iz kojeg je moguće saznati parametre pomoću kojih je matematičkim putem moguće odrediti brzinu korozije. Primjer Tafelovog dijagrama s logaritamskim prikazom polarizacijske krivulje čelika S 235 JR u 3.5% vodenoj otopini NaCl prikazan je **slikom 4.20**.



Slika 4.20 Polarizacijska krivulja čelika S 235 JR u 3.5% NaCl vodenoj otopini u odnosu na zasićenu kalomel elektrodu

Ekstrapolacijom linearnih dijelova anodne i katodne polarizacije Tafelove krivulje i korozijskog potencijala E_{kor} dobije se logaritam gustoće struje korozije i_{kor} , a iz nagiba linearnih dijelova izračunavaju se b_a i b_k koji prate anodni i katodni linearni dio Tafelove krivulje te se dalje računaju gustoća struje korozije i brzina korozije.

Tafelova ekstrapolacija se koristi za određivanje gustoće struje kod polarizacijskih mjerenja [26]. Gustoća struje izračunava se prema izrazu (4.5):

$$i = i_{kor} \left[\exp\left(\frac{2.3\eta}{b_a}\right) - \exp\left(\frac{2.3\eta}{b_k}\right) \right] \quad (4.5)$$

gdje je i gustoća primijenjene struje, i_{kor} gustoća struje korozije, η polarizacija, b_a tafelov anodni koeficijent i b_k – tafelov katodni koeficijent.

Određivanjem gustoće struje korozije primjenom Faradayevog zakona može se izračunati brzina korozije prema izrazu (4.6):

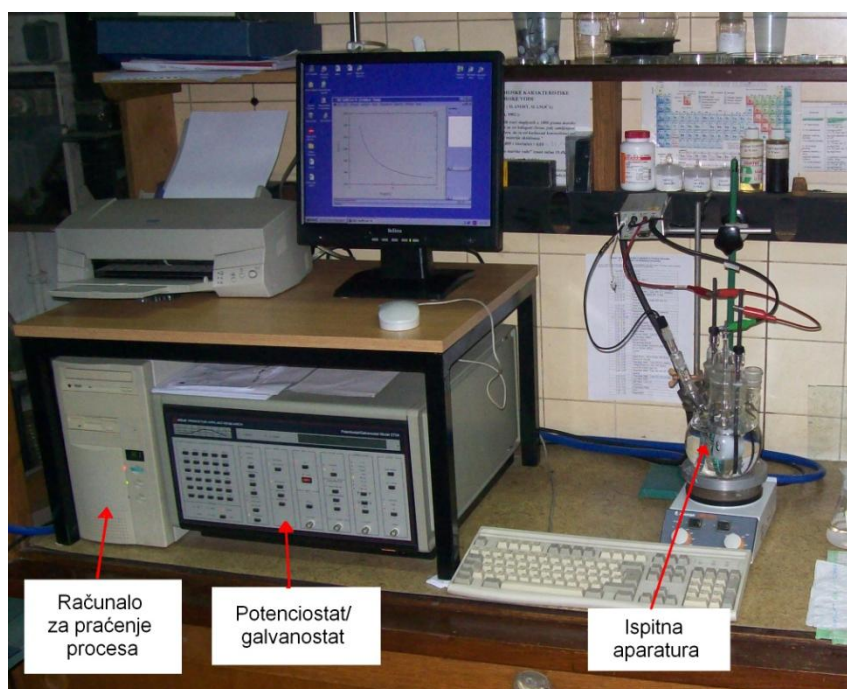
$$v_{kor} = K_1 \frac{i_{kor}}{\rho} EW \quad [\text{mm/god}] \quad (4.6)$$

gdje su i_{kor} gustoća korozivne struje [$\mu A/m^2$], K_1 - Faradayeva konstanta (3.27×10^{-3}), ρ -gustoća ispitivanog materijala [g/cm^3], EW - ekvivalentna masa metala koja se izračunava prema izrazu :

$$EW = \frac{w}{n} \quad (4.7)$$

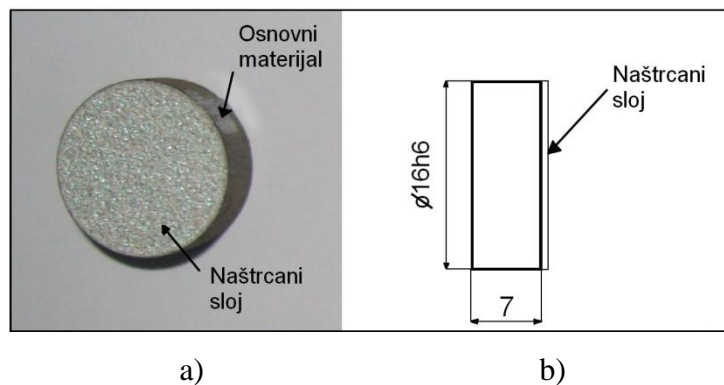
gdje je w - atomska masa kemijskog elementa, a n -broj elektrona potreban za oksidaciju elementa u korozivnom procesu, tj.njegova valencija.

Pri provedbi ispitivanja korištena je oprema koja se sastoji od potencioštata (uređaja za održavanje i kontrolu potencijala radne elektrode u elektrokemijskom članku u odnosu na referentnu elektrodu), računala za praćenje, mjerenje i izračunavanje podataka te od ispitne aparature u kojoj se nalazi radna elektroda, protuelektroda i referentna elektroda. Oprema za ispitivanje korozivne postojanosti naštrcanog sloja prikazana je **slikom 4.21**.



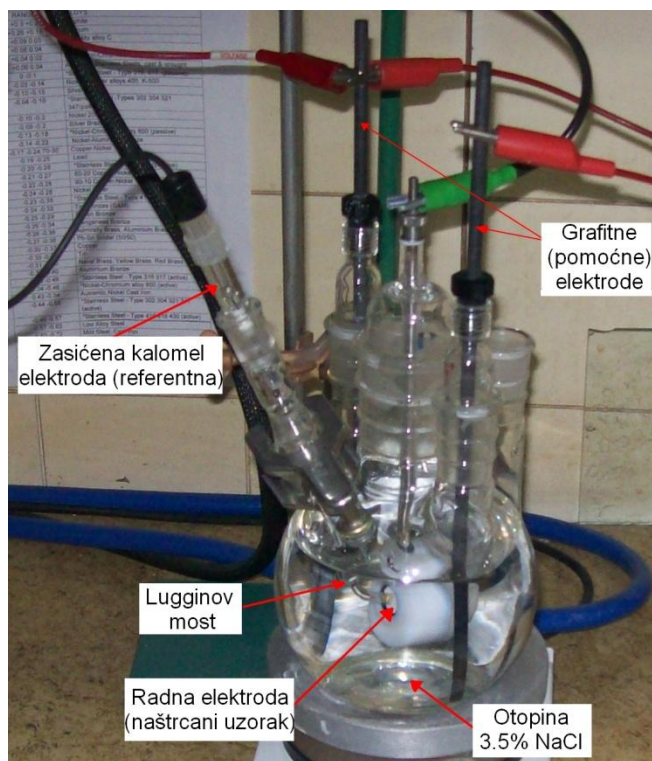
Slika 4.21 Oprema za elektrokemijsko ispitivanje

Ispitna aparatura sastoji se od staklene tikvice specifičnog oblika tako da svaka elektroda ima predviđeno svoje uležištenje. Radna elektroda koja je zapravo naštrcani uzorak promjera 16 mm se prilikom ispitivanja nalazi u držaču koji je oblikovan tako da $1cm^2$ površine radne elektrode bude u dodiru s elektrolitom. Izgled i dimenzije radne elektrode prikazane su **slikom 4.22**.



Slika 4.22 Izgled (a) i dimenzije (b) radne elektrode

Protuelektrode su grafitni vodiči koji zatvaraju strujni krug. U toku ispitivanja struja prolazi između uzorka i protuelektroda, a važno je napomenuti da uzorak mora biti postavljen simetrično između njih. Referentna elektroda je kalomel elektroda (ZKE) potencijala +0,242 V u odnosu na vodikovu elektrodu. Ona nije dio strujnog kruga, nego služi samo za mjerenje potencijala radne elektrode za vrijeme ispitivanja. Lugginov most služi da bi se smanjio otpor elektrolita a preporuča se da udaljenost njegova kraja od površine radne elektrode bude oko 1 mm. Kao elektrolit je korištena 3,5%-tna vodena otopina NaCl. Ispitna ćelija prikazana je **slikom 4.23**.



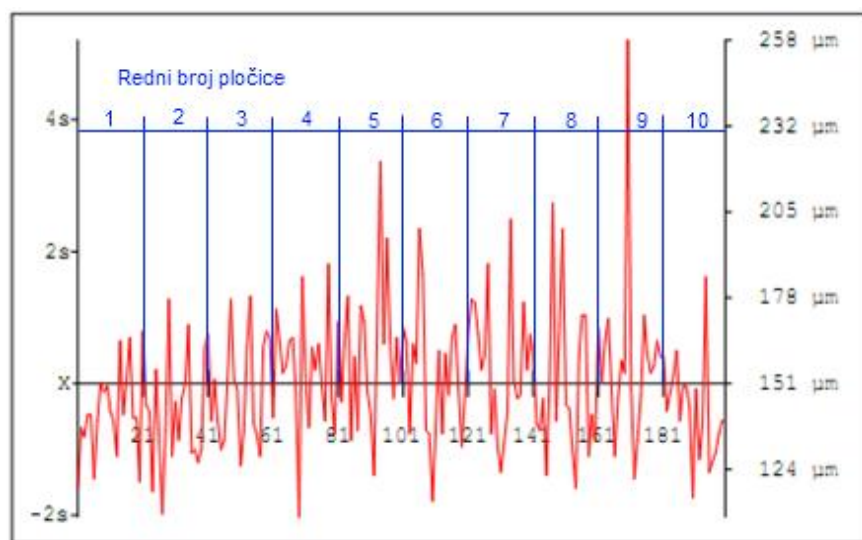
Slika 4.23 Ispitna ćelija

Za ispitivanje korišteni su uzorci koji su izrezani iz naštrcanih pločica neparnog rednog broja izvođenja. Iako postoji po 10 epruveta izrezanih iz pločica naštrcavanih robotiziranim postupkom i isto toliko ručnim postupkom, za ispitivanje poslužilo je po 5 epruveta iz svake skupine. Ostalih 10 epruveta služile su kao rezerva u slučaju da pojedini pokus ne uspije, što se i dogodilo u dva navrata.

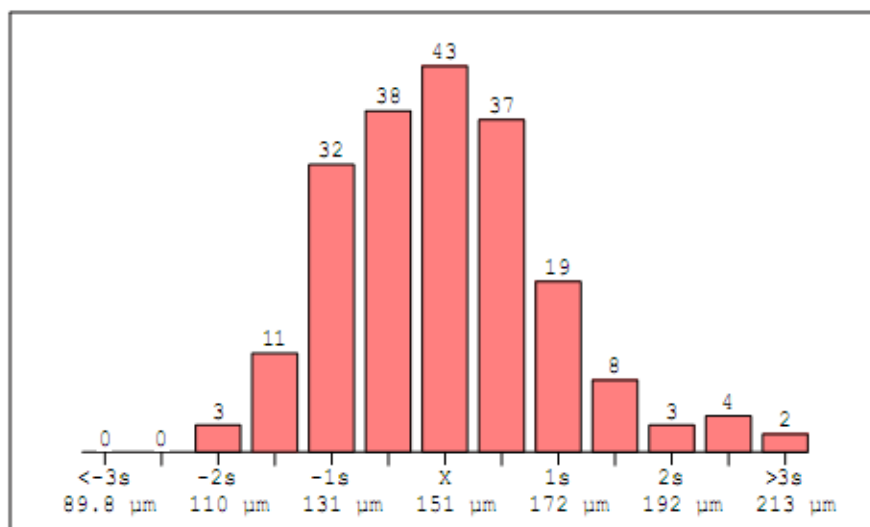
5. Analiza rezultata dobivenih mjerenjem svojstava naštrcanog sloja

5.1 Analiza rezultata mjerenja debljina naštrcanog sloja za robotizirano naštrcavanje

Slikama 5.1, i 5.2 prikazani su dijagrami, a tablicom 5.1 prikazani su statistički podaci dobiveni obradom podataka programskim paketom QuaNix 6,2.



Slika 5.1 Dijagramski prikaz debljina robotizirano naštrcanog sloja u ovisnosti o broju mjerenja



Slika 5.2 Prikaz izmjerenih rezultata

Tablica 5.1 Statistički podaci dobiveni obradom podataka u programskom paketu QuaNix 6,2

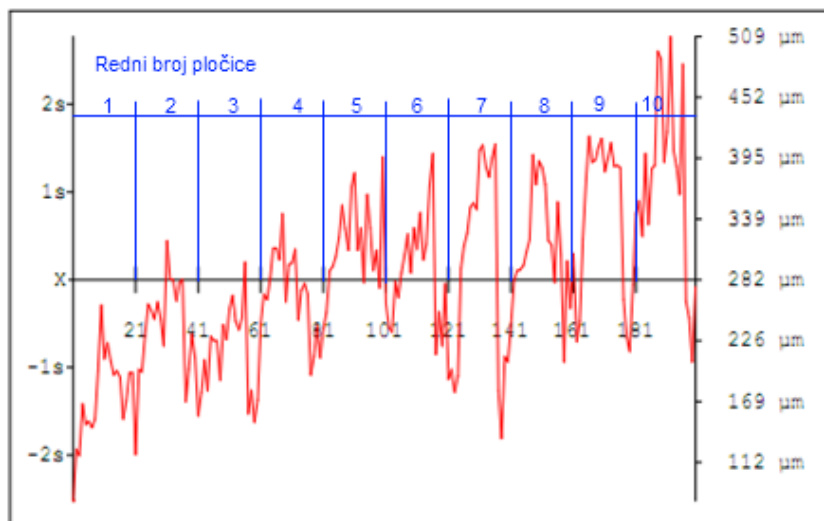
Broj mjerenja	Maks. vrijednost (μm)	Min.vrijednost (μm)	Arit.sredina (μm)	Standardna pogreška (μm)	Koef.varijacije (%)
200	259	110	151	20,6	13,6

Rb. uzorka	Rezultati mjerenja debljine naštrcanog sloja po kvadrantima i planu mjerenja (slika 4.13), S [μm]																				(X_s) [μm]	(S_s) [μm]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
1	119	138	135	142	142	122	140	152	149	151	143	140	129	165	142	153	166	141	141	121	141	12,7
2	168	145	143	118	156	134	111	137	178	129	146	134	147	152	170	130	131	127	131	163	142	17,8
3	167	140	153	140	131	134	153	178	153	150	126	137	163	179	139	136	129	163	168	166	150	16,5
4	141	175	165	155	157	165	166	149	110	185	154	138	163	156	164	151	140	189	147	136	155	18,0
5	171	146	167	179	134	160	137	176	171	149	142	123	173	221	164	197	165	147	166	152	162	22,5
6	169	165	136	164	158	200	186	137	136	115	139	162	136	161	148	166	170	150	132	148	153	20,1
7	168	178	177	167	156	160	189	136	150	132	124	133	143	203	153	147	148	177	156	167	158	20,3
8	160	139	137	147	123	152	208	140	170	200	145	144	131	119	160	173	173	129	142	134	151	23,8
9	169	152	165	172	150	129	147	159	155	259	150	122	134	148	173	161	155	157	165	160	159	27,1
10	160	143	149	154	162	140	151	151	144	116	150	128	139	185	124	127	130	136	140	140	143	15,5
(X_{ij}) [μm]	159	152	153	154	147	150	159	152	152	159	142	136	146	169	154	154	151	152	149	149	---	---
(S_{ij}) [μm]	16,7	15,1	15,1	18,0	13,5	23,0	28,8	15,5	19,6	44,7	9,9	11,6	15,4	29,2	15,5	21,3	17,4	20,3	14,0	15,6	---	---
UKUPNO																					151	20,6

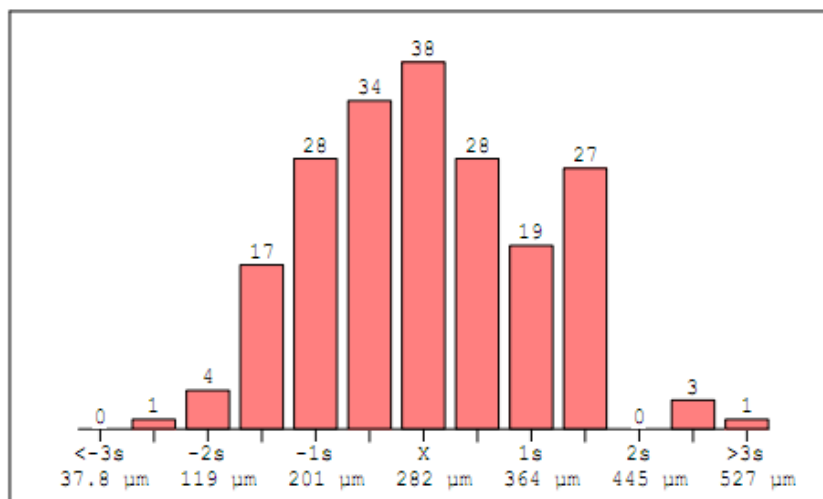
Tablica 5.2 Rezultati mjerenja debljine naštrcanih slojeva za robotizirano naštrcavanje

5.2 Analiza rezultata mjerenja debljina naštrcanog sloja za ručno naštrcavanje

Slikama 5.3, i 5.4 prikazani su dijagrami, a tablicom 5.3 prikazani su statistički podaci dobiveni obradom podataka programskim paketom QuaNix 6,2.



Slika 5.3 Dijagramski prikaz debljina ručno naštrcanog sloja u ovisnosti o broju mjerenja



Slika 5.4 Prikaz izmjerenih rezultata

Tablica 5.3 Statistički podaci dobiveni obradom podataka u programskom paketu QuaNix 6,2

Broj mjerenja	Maks. vrijednost (µm)	Min.vrijednost (µm)	Arit.sredina (µm)	Standardna pogreška (µm)	Koef.varijacije (%)
200	509	77	282	81,6	28,9

Rb. uzorak	Rezultati mjerenja debljine naštrcanog sloja po kvadrantima i planu mjerenja (slika 4.13), S [μm]																				(X_s) [μm]	(S_s) [μm]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
1	77	125	119	167	148	151	145	153	198	259	209	224	207	194	198	192	153	170	196	196	174	41,5
2	120	199	197	230	260	254	246	262	246	221	319	283	283	263	280	283	169	199	232	210	237	46,5
3	156	178	208	179	230	226	226	189	241	227	256	268	244	236	247	299	158	180	150	171	213	41,4
4	242	269	264	284	312	312	301	344	262	297	298	311	245	273	279	269	194	211	240	210	270	38,9
5	237	252	291	295	304	322	352	330	310	369	382	310	331	280	362	331	291	310	275	397	316	41,7
6	261	238	234	281	266	289	306	325	289	331	311	345	301	316	370	400	213	253	221	279	291	48,9
7	190	199	178	193	293	314	326	350	354	348	403	408	387	378	396	409	179	135	211	206	292	95,1
8	239	282	291	292	296	309	320	399	371	393	387	371	319	315	280	355	306	206	300	256	314	52,1
9	307	225	244	320	376	416	392	394	406	414	383	395	410	388	389	387	264	229	216	278	341	72,7
10	344	356	323	400	334	386	389	495	488	392	420	509	403	388	362	483	263	247	206	276	373	84,0
(X_{ij}) [μm]	217	232	235	264	282	298	300	324	317	325	337	342	313	303	316	341	219	214	225	248	---	---
(S_{ij}) [μm]	82,4	63,5	61,3	72,2	62,0	75,7	76,4	99,8	88,4	70,8	69,4	82,2	70,7	66,5	67,9	83,8	57,3	49,1	41,5	65,1	---	---
UKUPNO																					282	81,6

Tablica 5.4 Rezultati mjerenja debljine naštrcanih slojeva pri ručnom naštrcavanju

5.3 Usporedba debljina naštrcanih slojeva za ručno i robotizirano naštrcavanje

U **tablici 5.5** prikazani su statistički podaci dobiveni obradom izmjerenih vrijednosti debljina naštrcanog sloja za ručno i robotizirano naštrcavanje.

Tablica 5.5 Usporedba srednjih vrijednosti debljine sloja za robotizirano i ručno naštrcavanje

Vrijednost Postupak	Aritmetička sredina debljine naštrcanog sloja \bar{X}_s [μm]	Standardna pogreška (ukupno) (S_s) [μm]	Koeficijent varijacije
Robotizirano naštrcavanje	151	20,6	13,6
Ručno naštrcavanje	282	81,6	28,9

Pri analizi rezultata izmjerenih debljina očito je da aritmetička sredina debljine sloja pri ručnom naštrcavanju iznosi gotovo dvostruko više nego pri robotiziranom naštrcavanju. Razlog tome je taj što je kod ručnog izvođenja naštrcavanja vrlo teško pravilno održavati sve propisane parametre. O procjeni i vještini operatera uvelike ovisi iznos debljina naštrcanog sloja.

Podatak koji je važniji od same aritmetičke sredine debljina sloja može se očitati sa dijagrama prikazanog **slikom 5.3** iz kojeg je vidljivo da se aritmetička sredina debljine svake sljedeće naštrcane pločice pri ručnom naštrcavanju sve više povećavala što upućuje da proces nije pod kontrolom. Sustavno, nenamjerno povećanje aritmetičkih sredina debljina naštrcanog sloja u ovisnosti o vremenu može se objasniti subjektivnim raspoloženjima i procjenama operatera koji je izvodio postupak. Zbog zaključaka očitanih sa spomenutog dijagrama nije potrebno analizirati standardnu pogrešku, ali čak i kada se debljina naštrcavanih pločica ne bi stalno povećavala proces ne bi bio pod kontrolom jer je koeficijent varijacije gotovo 30%.

Za razliku od ručnog, pri robotiziranom naštrcavanju postižu se ujednačenije vrijednosti debljine naštrcanog sloja. Koeficijent varijacije koji iznosi nešto više od 10% upućuje da proces ovakvog načina naštrcavanja daje prihvatljive rezultate premda postoji prostora za njegovo poboljšanje. Ovakvo rasipanje vjerojatno bi se još dalo smanjiti da su naštrcavani uzorci bili većih dimenzija, pa time ne bi bilo toliko naglih promjena smjera gibanja robota u kratkom vremenu. Zaključno, parametri koje je moguće ostvariti robotiziranim naštrcavanjem daju znatno pouzdanije rezultate kada je riječ o ujednačenosti debljine sloja u odnosu na ručno izvođenje postupka.

5.4 Prikaz rezultata mjerenja prionljivosti naštrcanog sloja za robotizirano i ručno naštrcavanje

U **tablicama 5.6** i **5.7** prikazani su rezultati mjerenja prionljivosti naštrcanog sloja za robotizirano i ručno naštrcavanje. **Tablica 5.8** pokazuje černe površine epruveta naštrcanih robotiziranim postupkom nakon kidanja, a **tablica 5.9** pokazuje černe površine epruveta naštrcanih ručnim postupkom također nakon kidanja.

Tablica 5.6 Rezultati mjerenja prionljivosti pri robotiziranom naštrcavanju

Uzorak Epruveta	1A	3A	5A	7A	9A
1	14,93	9,97	9,70	13,41	8,88
2	13,39	8,74	10,72	11,01	8,42
3	8,09	11,59	8,82	7,94	7,22
R_{m1} (N/mm ²)	12,14	10,10	9,75	10,79	8,18
S_{si} (N/mm ²)	3,59	1,43	0,95	2,74	0,86
Aritmetička sredina ukupno R_m [N/mm ²]				10,19	
Standardna pogreška ukupno S_s [N/mm ²]				2,29	






Tablica 5.7 Rezultati mjerenja prionljivosti pri ručnom naštrcavanju

Uzorak Epruveta	1B	3B	5B	7B	9B
1	3,99	2,76	2,65	0	3,04
2	3,81	4,31	3,57	2,60	2,67
3	13,21	4,70	3,74	3,40	4,93
R_{m1} (N/mm ²)	7,00	3,92	3,32	3,00	3,37
S_{si} (N/mm ²)	5,37	1,03	0,58	0,56	0,91
Aritmetička sredina ukupno R_m [N/mm ²]				4,12	
Standardna pogreška ukupno S_s [N/mm ²]				2,69	

Tablica 5.8 Prikaz čeonih površina epruveta nakon kidanja naštreanih robotiziranim postupkom

Br.	1A ₁	1A ₂	1A ₃	Br.	3A ₁	3A ₂	3A ₃
1				3			
	5A ₁	5A ₂	5A ₃		7A ₁	7A ₂	7A ₃
5				7			
	9A ₁	9A ₂	9A ₃				
9							

Tablica 5.9 Prikaz čeonih površina epruveta nakon kidanja naštrecanih ručnim postupkom

Br.	1B ₁	1B ₂	1B ₃	Br.	3B ₁	3B ₂	3B ₃
1				3			
	5B ₁	5B ₂	5B ₃		7B ₁	7B ₂	7B ₃
5				7			
	9B ₁	9B ₂	9B ₃				
9							

5.5 Usporedba rezultata mjerenja prionljivosti naštrcanog sloja za ručno i robotizirano naštrcavanje

Tablicom 5.10 prikazani su statistički podaci dobiveni obradom izmjerenih vrijednosti prionljivosti naštrcanog sloja za ručno i robotizirano naštrcavanje.

Tablica 5.10 Usporedba aritmetičkih sredina prionljivosti sloja za robotizirano i ručno naštrcavanje

Vrijednost Postupak	Aritmetička sredina prionljivosti naštrcanog sloja R_m (N/mm ²)	Standardna pogreška S_s (N/mm ²)
Robotizirano naštrcavanje	10,19	2,29
Ručno naštrcavanje	4,12	2,69

Po podacima iz literature [25] preporuka za prionljivost naštrcanog sloja iznosi najmanje 10.30 N/mm². Taj podatak opućuje na spoznaju da je čvrstoća prijanjanja sloja za podlogu pri ručnom naštrcavanju ispod tražene granice i ne zadovoljava uvjete funkcionalnosti i pouzdanosti. Također je na čelima epruveta iz **tablice 5.9** vidljivo da se u predjelima gdje prionljivost nije bila adekvatna pojavila korozija što svakako nije dopustivo.

Pri robotiziranom naštrcavanju aritmetička sredina prionljivosti nešto je niža od preporučene vrijednosti. Funkcionalnost tih naštrcanih uzoraka tako je uvjetno prihvatljiva.

Pri robotiziranom naštrcavanju, čak i kod strogo kontroliranih uvjeta, standardna pogreška je poprilično velika što zapravo govori da je tehnologija plinskog naštrcavanja vrlo zahtjevna, a improviziranje s pojedinim parametrima pri ručnom naštrcavanju može dovesti do potpune nemogućnosti korištenja naštrcanih uzoraka. Naštrcane slojevi nastali nepravilnim održavanjem parametara mogu imati slabu prionljivost. Tijekom eksploatacije takvi slojevi mogu se oljuštiti na lokalnom dijelu ili čak po čitavoj površini. U slučaju da se to dogodi, slojevi gube traženu funkcionalnost, odnosno zaštitu od korozije.

5.6 Prikaz rezultata korozijske postojanosti naštrcanog sloja za robotizirano i ručno naštrcavanje

U **tablici 5.11** prikazani su parametri korozijske postojanosti za robotizirano, a u **tablici 5.12** za ručno naštrcavan sloj.

Tablica 5.11 Rezultati mjerenja parametara korozijske postojanosti za robotizirano naštrcavanje

Uzorak	Robotizirano naštrcavani uzorci					Čelik
	1A ₁	3A ₁	5A ₂	7A ₂	9A ₂	
Brzina korozije v_{kor} (mm/god)	0,2110	0,2162	0,1459	0,1114	0,108	0,2959
Korozijski potencijal E (mV)	-693,9	-686,6	-683,1	-678,4	-691,4	-617,3
Korozijska struja i_{kor} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	19,37	19,84	13,39	10,23	9,986	25,49

Tablica 5.12 Rezultati mjerenja parametara korozijske postojanosti za ručno naštrcavanje

Uzorak	Ručno naštrcavani uzorci					Čelik
	1B ₂	3B ₂	5B ₂	7B ₂	9B ₂	
Brzina korozije v_{kor} (mm/god)	0,1351	0,0473	0,0532	0,0136	0,0121	0,2959
Korozijski potencijal E (mV)	-701,3	-691,7	-681,4	-730,6	-692,9	-617,3
Korozijska struja i_{kor} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	12,40	4,34	4,88	1,24	1,11	25,49

5.7 Usporedba rezultata mjerenja korozijske postojanosti naštrcanog sloja za ručno i robotizirano naštrcavanje

Analizirajući podatke dobivene mjerenjima korozijske postojanosti prikazane u **tablicama 5.11 i 5.12** može se primijetiti da su vrijednosti gustoće korozijske struje, a samim time i brzine korozije u vrlo širokim granicama.

Iznenadujuće je da je čak i kod robotiziranog naštrcavanja, pri kojem su uvjeti gotovo isti za svaki uzorak, rasipanje rezultata također veliko. Premda se ne može s potpunom sigurnošću tvrditi koji su razlozi tome, pretpostavka je da razlike u porozitetu na lokalnoj razini (a to je ispitivana epruveta) imaju znatan utjecaj na brzinu korozije i na rasipanje rezultata. Ako je poroznost sloja velika, između čelične podloge i aluminijskog sloja može prodrijeti elektrolit, što uzrokuje pojavu galvanske korozije, a samim time i brže trošenje sloja.

Vrijednosti parametara slojeva koji su ručno naštrcavani također su u vrlo širokim granicama. I u ovom slučaju vjerojatno je uzrok tome lokalna razlika u porozitetu.

Rezultati mjerenja i njihova velika razlika pri različitim uzorcima teško je objašnjiva na temelju ispitivanja Tafelovom ekstrapolacijom. Da bi se dobili konkretniji rezultati, bilo bi potrebno pristupiti nekim drugim metodama mjerenja, kojima bi se mogla protumačiti još neka svojstva slojeva, poput poroznosti, količine uključaka, udjelu oksida, udjelu nerastaljenih čestica i dr.

Pa ipak, usporedbom dobivenih rezultata može se utvrditi da je brzina korozije pri ručnom naštrcavanju ipak mnogo manja u odnosu na robotizirano. Razlog tome može biti u debljini slojeva. Deblji slojevi smanjuju mogućnost da elektrolit kroz pore u sloju prodre do čelične podloge i time uzrokuje galvansku koroziju.

Ovom analogijom može se zaključiti da bi u eksperimentalnom radu robotizirano nanešeni slojevi imali bolja antikorozivna svojstva kada bi se njihova debljina još malo povećala što bi se moglo postići promjenom nekog od parametra naštrcavanja.

6. Zaključak

Ekperimentalnim radom i analizom dobivenih rezultata dobivene su okvirne smjernice o mogućnostima robotiziranog i ručnog plinskog naštrcavanja aluminijskog sloja na čeličnu podlogu. Iako se tehnologija plinskog naštrcavanja čini kao vrlo jednostavan način nanošenja zaštitnog sloja na podlogu, analizom rezultata vidljivo je da je to vrlo kompleksna tehnologija, osobito za ručno izvođenje kada se radi o obradku s ravnom površinom. Pri ručnom izvođenju vrlo je teško pridržavati se preporučenih parametara, subjektivne procjene operatera mogu vrlo lako biti pogrešne, što u konačnici može smanjiti kvalitetu sloja ili uzrokovati njegovu neupotrebljivost.

Primjenom robotiziranog načina naštrcavanja nastojala se potvrditi teza da bi se na taj način mogla poboljšati kvaliteta naštrcanih aluminijskih slojeva i da bi se daljnji razvoj mogao usmjeriti na primjenu robota u industriji kada se radi o predmetima koji su nepravilnih oblika ili o ravnim ploham. Poznato je da se na cilindričnim predmetima naštrcavanjem ručnom izvedbom mogu postići zadovoljavajući rezultati. No ručnim naštrcavanjem ravne plohe teško je ispuniti zahtjeve za kvalitetu sloja, jer operater mora voditi računa o svim gibanjima tijekom obavljanja postupka što je vrlo zahtjevno i teško izvedivo. Nasuprot tome, pri naštrcavanju primjenom robota moguće je kontrolirati sve parametre i ostvariti kvalitetan sloj.

Ekperimentalnim radom i analizom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- 1- Debljina slojeva pri naštrcavanju robotom znatno je više ujednačena od debljina slojeva kod ručnog naštrcavanja. Štoviše, pri ručnom naštrcavanju rezultati mjerenja debljine slojeva pokazali su da provedeni postupak uopće nije bio pod kontrolom zbog prevelikog rasipanja rezultata. Takvi slojevi ne bi bili funkcionalni u primjeni jer ne štite podjednako radni komad po cijeloj površini. Za razliku od njih, robotizirano naštrcavani slojevi mogli bi poslužiti u praktičnoj primjeni jer su njihove debljine ravnomjerne po cijeloj površini, što je ustvari i najvažniji preduvjet za ostvarivanje kvalitetne korozijske postojanosti aluminijskog sloja. Robotiziranim postupkom naštrcavanja znatno se smanjuje vjerojatnost nastanka „slabih točaka“, tj. pretankog sloja na lokalnim dijelovima. Takve točke mogu biti uzrok propadanja i daljnje degradacije sloja zbog djelovanja galvanske korozije.

- 2- Prionljivost slojeva pri naštrcavanju robotom također je znatno veća od prionljivosti ručno naštrcavanih slojeva. Premda je aritmetička sredina prionljivosti kod robotizirano naštrcavanih slojeva nešto manja od očekivane razine, a rasipanje rezultata prionljivosti znatno, takvi slojevi mogli bi biti uvjetno upotrebljivi u realnim eksploatacijskim uvjetima. Podešavanjem varijabilnih parametara naštrcavanja ovih moglo bi se postići sustavno povećanje prionljivosti, a samim time i funkcionalnosti sloja u realnim uvjetima eksploatacije. Pri ručnom naštrcavanju rezultati prionljivosti bili su znatno ispod očekivanih granica, što upućuje na visok rizik od otkazivanja sustava i gubitak funkcionalnosti slojeva. Također, pokazalo se da prionljivost i kod ručnog, i kod robotiziranog naštrcavanja nije u funkcijskoj ovisnosti o položaju epruvete na obradku.

- 3- Kada se radi o rezultatima korozijske postojanosti slojeva, tu rezultati nisu jednoznačni. I kod robotiziranog i kod ručnog naštrcavanja rezultati se kreću u vrlo širokim granicama. Brzina korozije slojeva ručno naštrcanih uzoraka generalno je manja u odnosu na slojeve naštrcane robotom što bi se moglo objasniti većim debljinama slojeva koji su u stanju bolje zatvoriti pore unutar sloja i na taj način spriječiti prodiranje elektrolita do čelične podloge, a samim time i pojavu galvanske korozije. Može se zaključiti da sami aluminijski slojevi ne mogu u potpunosti kvalitetno zaštititi čeličnu podlogu i da ih je nužno kombinirati sa impregnirajućim premazima koji su u stanju zatvoriti pore unutar aluminijskog sloja, što se u praksi i koristi.

Dobiveni rezultati pokazali su da je rasipanje rezultata svih provedenih ispitivanja manje u slučaju robotiziranog naštrcavanja što ukazuje da je takav sustav pouzdaniji, a omogućava i vrlo veliku ponovljivost.

Mogućnost boljeg kontroliranja parametara plinskog naštrcavanja aluminijskog primjenom robota pokazala se kao značajno bolja varijanta u postizanju kvalitetnijeg i funkcionalnijeg sloja.

7. Literatura

- [1] Thermal Spraying: Practice, Theory, and Application, American Welding Society, Miami, Florida, 1993.
- [2] T. Filetin, K. Grilec: Postupci modificiranja i prevlačenja površina – priručnik za primjenu, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.
- [3] Z. Kožuh, Z. Glogović: Umjetna inteligencija u području toplinskog naštrcavanja Zavarivanje 52(2009)1/2, str. 19-30.
- [4] Hrvatski zavod za norme: Toplinsko naštrcavanje – Nazivlje, razredba (EN 657: 2005), HZN, Zagreb, 2008.
- [5] M. Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [6] <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-2-3401/c-2.pdf> (10.10.2010.)
- [7] D. E. Crawmer: Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International and the Thermal Spray Society, 2004.
- [8] K. Šimunović, M. Franz, G. Marić: Istraživanje i procjena zaostalih naprezanja u plinski naštrcanim NiCrBSi slojevima, Metalurgija 47 (2008) 2, 93-97.
- [9] R.S.C.Paredes*, S.C.Amico, A.S.C.M.d'Oliveira: The effect of roughness and pre-heating of the substrate on the morphology of aluminium coatings deposited by thermal spraying, Surface & Coatings Technology 200 (2006) str. 3049–3055.
- [10] T. Filetin, F.Kovačićek, J.Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

- [11] I. Esih: Osnove površinske zaštite, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 1990.
- [12] Z. Glogović: Utjecaj parametara plinskog naštrcavanja na svojstva nanešenog sloja, doktorski rad, FSB 2010.
- [13] <http://www.fkit.hr/files/nastava/novi/7/KATODNA%20ZASTITA.pdf> (15.6.2010.)
- [14] <http://www.magnesium-elektron.com/data/downloads/Corrosion%20Protection%20Principles.pdf> (15.6.2010.)
- [15] Z. Kožuh, Z. Glogović, N. Brtan: „Toplinsko naštrcavanje u pomorstvu“, Zbornik radova „Zavarivanje u pomorstvu“, Bol, 2009.
- [16] www.twi.co.uk/content/surf_tsa.html (15.8.2010.)
- [17] www.nwip.org/downloads/IMPCOAT%2030%20June%202010.pdf (15.8.2010.)
- [18] www.centurycorrosion.com/applicationGroup-thermal.htm (15.8.2010.)
- [19] www.saf.cz/en/assortment/metal-spraying-boxes-and-chambers/ (15.8.2010.)
- [20] www.kgcoating.co.uk/ivd.html
- [21] Castolin Eutectic: CastoDyn DS8000, Operating manual spare parts list
- [22] http://www.castolin.com/wCastolin_com/pdf/publications/CastoDyn.pdf (10.3.2010.)
- [23] Tehnologijski projekt TP - 06/0120 – 45 : Prototip robotskog modula za posluživanje suvremenih obradnih sustava
- [24] Castolin Eutectic: Rototec LT 29220, Castolin & Eutectic international S.A., 2000.
- [25] American Navy Military Standard –MS 2138-A, Metal Sprayed Coatings for Corrosion Protection aboard Naval Ships, 1992.
- [26] ASM International Handbook Committee: Surface Engineering, Volume 5, 1994.