

Postupci modificiranja i prevlačenja površina u mehatronici

Jambor, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Bjelovar University of Applied Sciences / Veleučilište u Bjelovaru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:144:500878>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository of Bjelovar University of Applied Sciences](#)



VELEUČILIŠTE U BJELOVARU
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKA

**POSTUPCI MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA
POVRŠINA U MEHATRONICI**

Završni rad br. 06/MEH/2020

Marin Jambor

Bjelovar, listopad 2020.



Veleučilište u Bjelovaru
Trg E. Kvaternika 4, Bjelovar

1. DEFINIRANJE TEME ZAVRŠNOG RADA I POVJERENSTVA

Kandidat: **Jambor Marin**

Datum: 14.07.2020.

Matični broj: 002072

JMBAG: 0035206771

Kolegij: **TEHNIČKI MATERIJALI**

Naslov rada (tema): **Postupci modificiranja i prevlačenja površina u mehatronici**

Područje: **Tehničke znanosti**

Polje: **Strojarstvo**

Grana: **Proizvodno strojarstvo**

Mentor: **dr.sc. Stjepan Golubić**

zvanje: **viši predavač**

Članovi Povjerenstva za ocjenjivanje i obranu završnog rada:

1. Tomislav Pavlic, mag.ing.mech., predsjednik
2. dr.sc. Stjepan Golubić, mentor
3. Danijel Radočaj, mag.inž.meh., član

2. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA BROJ: 06/MEH/2020

U radu je potrebno:

- opisati tehničke materijale
- prikazati postupke toplinske obrade
- prikazati postupke modificiranja i prevlačenja površina
- opisati postupke prevlačenja
- opisati postupke modificiranja
- prikazati primjere primjene u mehatronici

Zadatak uručen: 14.07.2020.

Mentor: **dr.sc. Stjepan Golubić**

Zahvala

Zahvaljujem se svim svojim bliskim osobama, a najviše svojim roditeljima koji su mi bili podrška tijekom čitavog studiranja te što su mi omogućili studiranje.

Također bi se želio zahvaliti svom mentoru dr. sc. Stjepanu Golubiću dipl. ing. na pruženoj prilici za pisanje ovog rada na temu modificiranje i prevlačenje površina te pomoći koju mi je uputio.

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. TEHNIČKI MATERIJALI.....	2
3. POSTUPCI TOPLINSKE OBRADJE METALA	3
3.1 Prava ili „čista“ toplinska obradba	5
3.1.1 Žarenje	5
3.1.2 Kaljenje	10
3.1.3 Popuštanje	11
3.2 Toplinska obradba površinskih slojeva.....	12
4. POSTUPCI POVRŠINSKE OBRADJE METALA	13
5. POSTUPCI MODIFICIRANJA POVRŠINA.....	14
5.1 Toplinsko modificiranje.....	14
5.1.1 Površinsko kaljenje	14
5.2 Mehaničko modificiranje.....	17
5.2.1 Pjeskarenje.....	17
5.3 Toplinsko - kemijsko modificiranje.....	18
5.3.1 Difuzija nemetalnih elemenata	18
5.3.2 Difuzijsko prevlačenje	22
5.3.3 Legiranja primjenom lasera.....	23
6. POSTUPCI PREVLAČENJA POVRŠINA	24
6.1 Mehaničko prevlačenje	24
6.1.1 Deformacijsko spajanje (platiranje).....	24
6.2 Toplinsko prevlačenje	25
6.2.1 Navarivanje	25
6.2.2 Uranjanje u rastaljeni metal.....	26
6.3 Toplinsko - mehaničko prevlačenje.....	26
6.3.1 Naštrcavanje	26
6.4 Kemijsko prevlačenje	27
6.4.1 Fosfatiranje.....	27
6.4.2 Kromatiranje.....	28
6.4.3 Sol-Gel postupci	28
6.5 Elektrokemijsko prevlačenje.....	30
6.5.1 Galvaniziranje.....	30
6.5.2 Anodna oksidacija	30
6.6 Prevlačenje u parnoj fazi	30
6.6.1 Kemijsko taloženje iz parne faze (CVD)	31
6.6.2 Fizikalno taloženje iz parne faze (PVD)	32
6.6.3 Plazmom potpomognut CVD postupak (PA CVD).....	37
7. GRANIČNE VRSTE POSTUPAKA.....	39
7.1 Implantacija iona.....	39
8. PRIMJENE U MEHATRONICI	41
8.1 Elektrokemijska zaštita metala od korozije prevlakama	41
8.2 Galvansko cinčanje	42

8.3	<i>Dekoratívno kromiranje</i>	42
8.4	<i>DLC Xtended® prevlaka PACVD postupkom</i>	43
8.5	<i>Indukcijsko kaljenje zupčanika</i>	44
8.6	<i>Ostali primjeri inženjerstva površina.....</i>	45
9.	ZAKLJUČAK.....	51
10.	LITERATURA	52
11.	SAŽETAK.....	57
12.	ABSTRACT	58

Popis slika

Slika 3.1: Dijagramski prikaz toplinske obrade metala

Slika 3.2: Hlađenje obratka do temperature okoliša

Slika 3.3: Dijagram toplinske obrade žarenja

Slika 3.4: Postupci žarenja

Slika 3.5: Dijagram postupka rekristalizacije

Slika 3.6: Dijagram postupka normalizacije

Slika 3.7: Dijagram postupka redukcije zaostalih naprezanja

Slika 3.8: Dijagram postupka sferodizacije

Slika 3.9: Dijagram postupka kaljenja

Slika 3.10: Dijagram postupka popuštanja

Slika 3.11: Dijagram postupka poboljšavanja

Slika 4.1: Podjela postupaka površinske obrade metala

Slika 5.1: Plameno kaljenje noža

Slika 5.2: Plameno i indukcijsko rotacijsko kaljenje rukavca i koljenaste osovine

Slika 5.3: Površinsko kaljenje laserom

Slika 5.4: Površinsko kaljenje snopom elektrona

Slika 5.5: Pjeskarenje površine metala

Slika 5.6: Dijagram mogućeg postupka cementiranja čelika

Slika 5.7: Pougličeni sloj zupčanika

Slika 5.8: Određivanje efektivne dubine nitriranog sloja

Slika 5.9: Nitrirani zupčanici

Slika 5.10: Mikrostruktura i prikaz ovisnosti tvrdoće poprečnog presjeka boriranog čeličnog predmeta o udaljenosti od ruba

Slika 5.11: Mikrostruktura vanadiranog čelika

Slika 5.12: Površinski sloj legiran laserom

Slika 6.1: Prevlačenje površine

Slika 6.2: Navarivanje dijelova brodskih ventila i košuljice

Slika 6.3: Primjer fosfatiranih dijelova

Slika 6.4: Shematski prikaz sol-gel postupka

Slika 6.5: Shematski prikaz postrojenja za nanošenje prevlake (CVD-postupak)

Slika 6.6: Prikaz izvedbe PVD postupka

Slika 6.7: Uređaj za nanošenje PVD prevlaka

Slika 6.8: Materijal zaštićen TiN prevlakom PVD-postupkom

Slika 6.9: Shematski prikaz diodnog naprašivanja

Slika 6.10: Shematski prikaz ionskog nanošenja prevlake

Slika 6.11: Prikaz opreme za PACVD postupak

Slika 7.1: Uređaj za implantiranje iona iz plazmatskih izvora

Slika 8.1: Zaštita trupa broda od korozije

Slika 8.2: Usporedba predmeta prije i nakon pocinčavanja

Slika 8.3: Primjer dekorativnog kromiranja (kvaka za vrata)

Slika 8.4: Primjer dekorativnog kromiranja (rešetka za roštilj)

Slika 8.5: Primjer DLC Xtended® prevlake

Slika 8.6: Primjeri predmeta na koje je nanesena DLC prevlaka

Slika 8.7: Primjeri indukcijskog kaljenja i zagrijavanja zupčanika

Slika 8.8: Plameno kaljenje zupčanika

Slika 8.9: Primjer dijelova kaljenih laserom

Slika 8.10: Pjeskarenje metalnih dijelova radijatora i ograde

Slika 8.11: Pougličeni sloj zubnog implantata i sablje mača

Slika 8.12: Primjer nitrirane koljenaste osovine i osovine

Slika 8.13: Primjer nitriranih injektora za gorivo

Slika 8.14: Borirani dijelovi automobila i vijaka za ekstradiranje

Slika 8.15: Primjer platiniranog lima za limenke konzervirane hrane

Slika 8.16: Primjeri dijelova obrađenih naštrcavanjem

Slika 8.17: Primjeri kromiranja aluminija

Slika 8.18: Primjeri CVD prevlaka

Slika 8.19: Primjeri dekorativne i strojarske PVD prevlake

Slika 8.20: Sat prevučen PVD prevlakom

1. UVOD

Procesi modificiranja i prevlačenja danas imaju presudnu ulogu u industriji jer svojstva površinskih strojnih dijelova i alata određuju njihovu kvalitetu te samim time trajnost proizvoda [1]. U današnje vrijeme sve se više pridaje važnosti razvoju i unapređenju tehnologija koje spadaju u znanstvenu disciplinu inženjerstva površina koje se bave istraživanjem i razvojem novih materijala, a samim time i modificiranjem i prevlačenjem površina s ciljem postizanja jednako dobrih svojstva karakterističnih za skupocjene materijale na materijalima cjenovno prihvatljivijim za masovnu industriju. Postupcima modificiranja i prevlačenja postižu se bolja kemijska, mehanička i toplinska svojstva materijala kao što su kemijsko djelovanje ili korozija, povećanje tvrdoće i čvrstoće, poboljšanje postojanosti na visokim temperaturama, otpornost na trošenje, itd. Glavna namjera ovih dvaju postupaka je dobivanje modificiranih materijala ekonomski prihvatljivijih koji nude mogućnost uporabe u širokom spektru djelatnosti. Osim cjenovne prihvatljivosti ovi postupci nude mogućnost postizanja kombinacije povoljnih svojstava koje nijedan materijal samostalno ne može ponuditi.

Cilj ovog završnog rada je opisati postojeće mogućnosti i postupke u sklopu modificiranja i prevlačenja površina. Postupci modificiranih površina obuhvaćaju toplinsko, mehaničko i toplinsko-mehaničko modificiranje, a u postupke prevlačenja spada kemijsko, elektrokemijsko, mehaničko, itd. Također, na kraju je prikazano nekoliko primjera korištenja tih postupaka kao što su galvansko cinčanje, dekorativno kromiranje, elektrokemijska zaštita metala od korozije prevlakama, DLC Xtended® prevlaka PACVD postupkom, indukcijsko kaljenje zupčanika i ostali primjeri inženjerstva površina.

2. TEHNIČKI MATERIJALI

Tehnički materijali su oni od kojih se izrađuju tehnički proizvodi, a karakterizira ih kombinacija povoljnih fizikalnih svojstava koja nazivamo tehnička svojstva materijala [2].

Tehnički materijali moraju imati mogućnost prerade, a time i biti pristupačni cijenom proizvodnje i prerade. Za kreiranje tehničkih proizvoda i proizvodnih sustava uz neka druga znanja inženjeri trebaju biti upoznati i s unutarnjom građom (mikro, nano-dimenzije) i svojstvima materijala (fizikalna, mehanička, optička, termička itd.) kako bi odabrali najprikladniji materijal i primjerenu tehnologiju obrade za određeni proizvod [3].

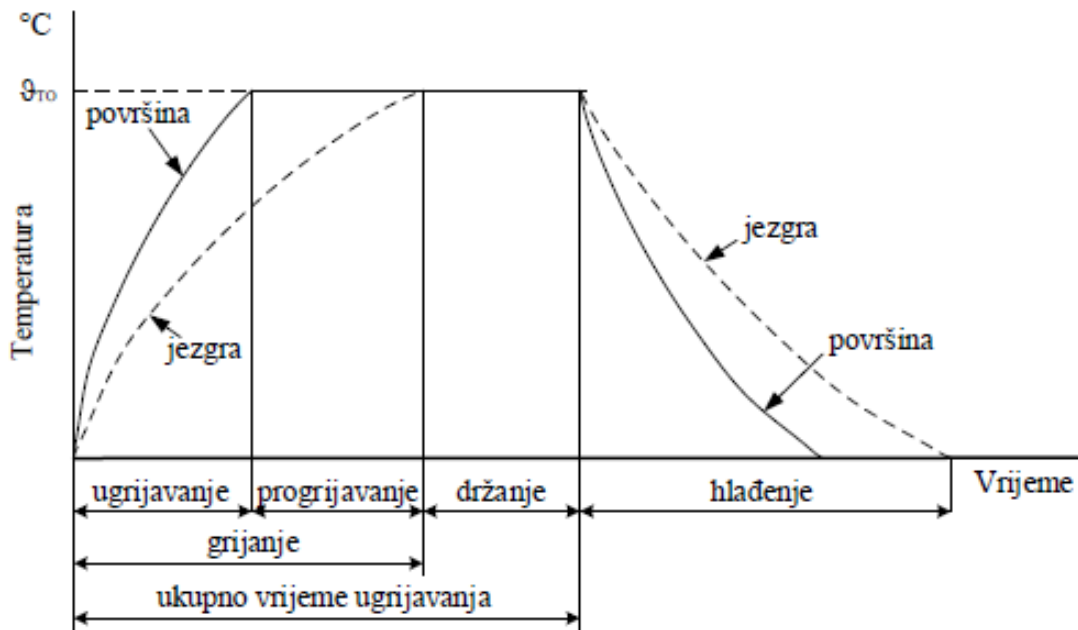
Tehničke materijale dijelimo u tri velike skupine: metale, polimere i keramike. Ova podjela temelji se na atomskoj strukturi i kemijskom sastavu materijala. Također postoje materijali koji su kombinacija dviju ili više skupina (hibridi). Metali su materijali koji posjeduju veliki broj slobodnih elektrona (elektrona koji nisu vezani za određene atome) zbog čega odlično provode električnu i toplinsku energiju. Vrlo su čvrsti, ali i deformabilni, zbog čega imaju veliku primjenu u konstrukcijske svrhe. Keramike su po kemijskom sastavu spojevi građeni od metalnih i nemetalnih elemenata (oksidi, nitridi). Ovi materijali najčešće su izolatori te su otporniji na visoke temperature i agresivne medije od metala i polimera. Mehanička svojstva koja odlikuju keramike su velika tvrdoća i čvrstoća, ali i značajna krhkost. U skupinu polimera spadaju plastike i gume te su po kemijskoj građi organski spojevi građeni od ugljika, vodika i drugih nemetala. Sačinjavaju ih dugi međusobno povezani molekularni lanci, a odlikuje ih niska gustoća te izuzetna fleksibilnost [4].

Svojstva materijala važna su za tehničku primjenu te obuhvaćaju: opća svojstva (tribološka, tehnološka, ekonomska, ekološka, itd.), fizikalna svojstva (toplinski kapacitet, toplinska vodljivost, modul elastičnosti, električna vodljivost), kemijska, optička. Neka svojstva materijala ovisna su o mikrostrukturi, uvjetima ispitivanja, stanju materijala, obliku i dimenzijama ispitne epruvete, itd. Nakon ugradnje materijala u neki proizvod, potrebno je provesti eksploatacijska ispitivanja svojstava proizvoda i ponašanja materijala u složenim eksploatacijskim uvjetima [5].

3. POSTUPCI TOPLINSKE OBRADJE METALA

Toplinska obrada je proces koji uključuje toplinsko djelovanje na metalni materijal određenim slijedom temperaturno vremenskih ciklusa u svrhu postizanja određenih poboljšanih svojstava materijala (mehanička, fizička i kemijska) [6].

To je postupak koji se sastoji od zagrijavanja materijala do određene temperature, držanje na toj temperaturi te na kraju hlađenje određenom brzinom što dovodi do promjene strukture materijala (smanjenje napetosti, smanjenje znatosti, preraspodjela kristala, itd.) [6], a samim time i njegovih svojstava (Slika 3.1). Glavni parametri ovog procesa su temperatura (T (K), ϑ (°C)) i vrijeme (t (s, min, h)). Proces toplinske obrade vrši se u svrhu povećanja čvrstoće materijala, zatim povećanja žilavosti i na samom kraju preoblikovanja, a ovim postupkom najčešće se obrađuju čelici [7]. Postupci kovanja, zavarivanja, valjanja i lijevanja nisu postupci toplinske obrade jer im je svrha promjena oblika, a ne mikrostrukture [3].



Slika 3.1: Dijagramski prikaz toplinske obrade metala [7]

Ugrijavanje je zagrijavanje površinskih slojeva sve do postignuća temperature ϑ_{TO} (temperatura toplinske obrade). Progrijavanje je vremensko razdoblje od trenutka završetka ugrijavanja površine do trenutka kada slojevi jezgre također postignu temperaturu ϑ_{TO} ($\vartheta = \text{konst.}$ kroz cijeli presjek). Vrijeme progrijavanja ovisi o volumenu i dimenzijama materijala koji se obrađuje. Grijanje je zbroj vremenskog trajanja ugrijavanja i progrijavanja. Držanje je vremenski period održavanja predmeta na temperaturi ϑ_{TO} od trena kada je predmet progrijan do početka ohlađivanja. Hlađenje (Slika 3.2) je period koji uključuje snižavanje temperature predmeta slojeva jezgre na zadanu temperaturu odnosno izjednačavanje s temperaturom površinskih slojeva i okoliša [6]. Proces toplinske obrade može se podijeliti na dvije velike skupine, pravu ili „čista“ toplinsku obradu i toplinsku obradu površinskih slojeva.



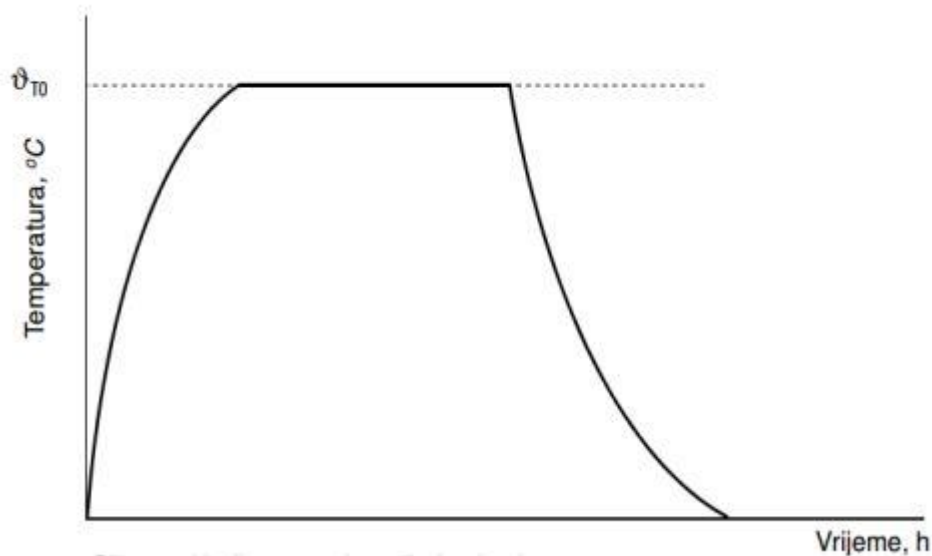
Slika 3.2: Hlađenje obratka do temperature okoliša [8]

3.1 Prava ili „čista“ toplinska obradba

Pravom ili „čistom“ toplinskom obradom postižu se poželjna svojstva kao što su poboljšana mehanička svojstva, poboljšanje sposobnosti deformabilnosti, poboljšanje obradivosti, itd. Uključuje postupke koji podrazumijevaju ugrijavanje cijele mase proizvoda, ali ne dovode do promjene kemijskog sastava. Obuhvaća žarenje, kaljenje, popuštanje, gašenje legura bez polimorfnih pretvorbi i starenje (dozrijevanje). Postupak starenja temelji se na precipitaciji tvari iz prezasićene otopine te njihova spajanja daju međumetalne čestice. Postupcima gašenja legura bez polimorfnih pretvorbi zadržava se stanje postignuto kod temperature postupka [9].

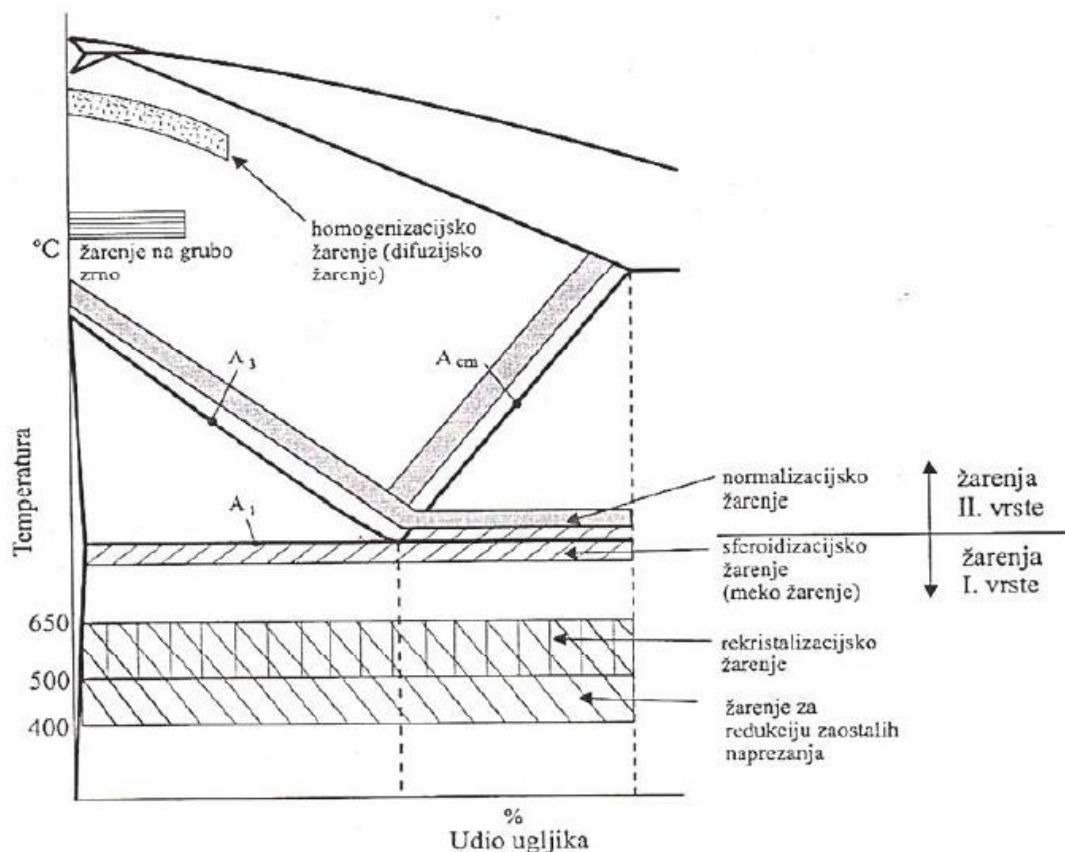
3.1.1 Žarenje

Procesi koje uključuje žarenje su zagrijavanje materijala do određene temperature te sporo hlađenje nakon održavanja na toj temperaturi (Slika 3.3) [6]. Ovim postupkom se postiže struktura čelika koja je najbliža stanju metastabilne ravnoteže [3], odnosno provodi se uklanjanje zaostalih napreznja. Provodi se nakon hladne ili tople obrade deformiranjem kako bi se metalu izjednačila struktura što je bitno za daljnju obradu i poboljšala neka mehanička svojstva [6].



Slika 3.3: Dijagram toplinske obrade žarenja [10]

Postupci žarenja dijele se u dvije skupine. Postupke žarenja prvog reda karakteriziraju promjene svojstava koje ne ovise o strukturnim promjenama. U tu skupinu spadaju rekristalizacijsko žarenje i žarenje zbog uklanjanja zaostalih naprezanja. Postupke žarenja drugog reda karakterizira prekrystalizacija mikrostrukture i dijele se na sferoidizacijsko žarenje, normalizacijsko žarenje, homogenizacijsko žarenje (difuzijsko žarenje), nadraživanje (visoko žarenje ili žarenje na grubo zrno). Navedena podjela prikazana je na Slici 3.4 [3].

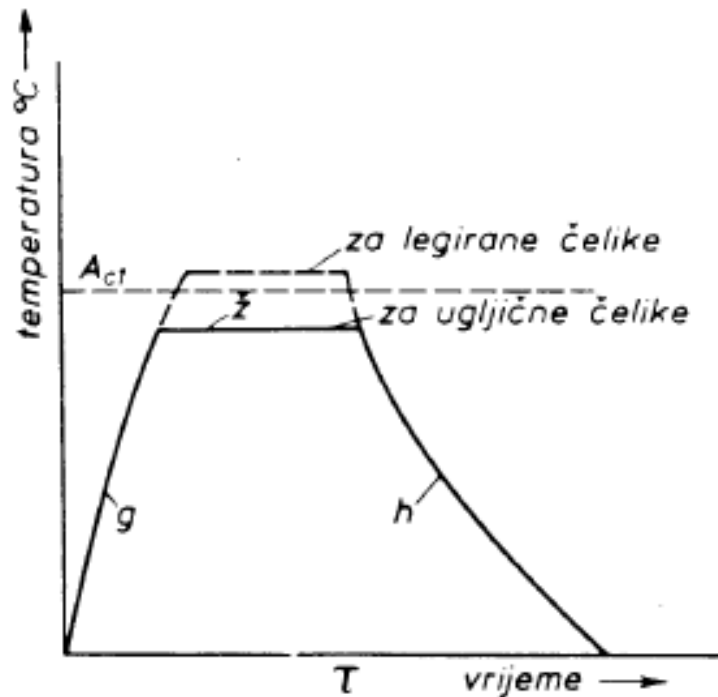


Slika 3.4: Postupci žarenja [7]

Rekristalizacijsko žarenje

Rekristalizacijsko žarenje jedan je od procesa toplinske obrade koji se temelji na formiranju novog kristalnog zrna hladno deformiranih proizvoda bez faznih pretvorbi stvaranjem kristalizacijskih klica i njihova rasta [3, 9]. Rekristalizacija se provodi u svrhu vraćanja duktilnosti čelika nakon hladnog oblikovanja kojim se promijenila tekstura materijala i nastupilo hladno deformacijsko očvršnuće (valjanje, prešanje, izvlačenje, ekstruzija, itd.). Pri točno određenoj temperaturi rekristalizacijskog žarenja čvrstoća i tvrdoća se snižavaju, duktilnost se povećava, a dobivena naprezanja koja su unesena

hladnom deformacijom potpuno se reduciraju. Ako dođe do prekoračenja pravilne temperature rekristalizacijskog žarenja zrno postupno raste, a svojstva čvrstoće i duktilnosti se pogoršavaju [3].



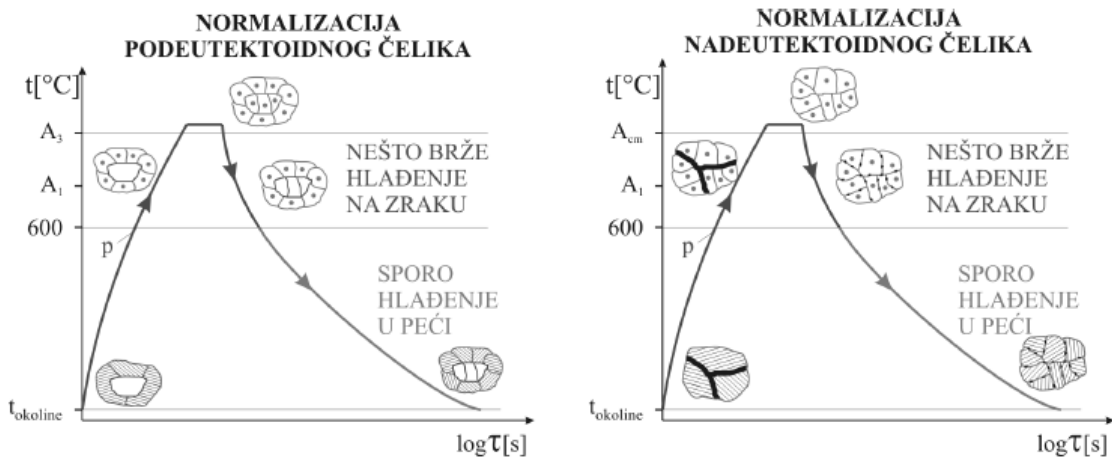
Slika 3.5: Dijagram postupka rekristalizacije [9]

Na Slici 3.5 je prikazan postupak rekristalizacije koji se izvodi ugrijavanjem legiranih čelika malo iznad A_{c1} , a ugljičnih čelika ispod A_{c1} (450 do 600 $^{\circ}\text{C}$). Najprije se kristalno zrno obnovi od deformacije, a zatim se povećava. Nakon toga slijedi polagano hlađenje te time dolazi do smanjenja naprezanja, tvrdoće, čvrstoće, a povećanje žilavosti [6].

Normalizacijsko žarenje

Normalizacijsko žarenje je postupak toplinske obrade koji uključuje austenitiziranje i ohlađivanje na zraku radi postignuća sitnozrnate i jednolične mikrostrukture, a izvodi se nakon postupaka lijevanja, zavarivanja i plastične obrade u toplom stanju (prešanje, kovanje, itd.). Normalizacijskim se žarenjem poboljšavaju svojstva zavarenih spojeva, reduciraju učinci različitih pogrešaka u strukturi, poboljšavaju se svojstva hladnooblikovanih proizvoda te obradivost odvajanjem čestica [3]. Temperatura zagrijavanja za pondeutektoidne čelike iznosi od 30 $^{\circ}\text{C}$ do 50 $^{\circ}\text{C}$ iznad A_{c3} temperature, a za nadeutektoidne čelike od 30 $^{\circ}\text{C}$ do 50 $^{\circ}\text{C}$ iznad A_{c1} temperature ($A_{c1} = 723^{\circ}\text{C}$) [11]. Dijagrami normalizacijskog žarenja za ove čelike prikazani su na Slici 3.6. Pri hlađenju razvija se sitnozrnatija struktura, smanjuje se

rasipanje vrijednosti svih svojstava te se poboljšava žilavost i istežljivost. Još neka svojstva koja se postižu ovom metodom su poboljšane karakteristike hladnooblikovanih proizvoda, zavarenih spojeva te poboljšana obradivost odvajanjem čestica [3].

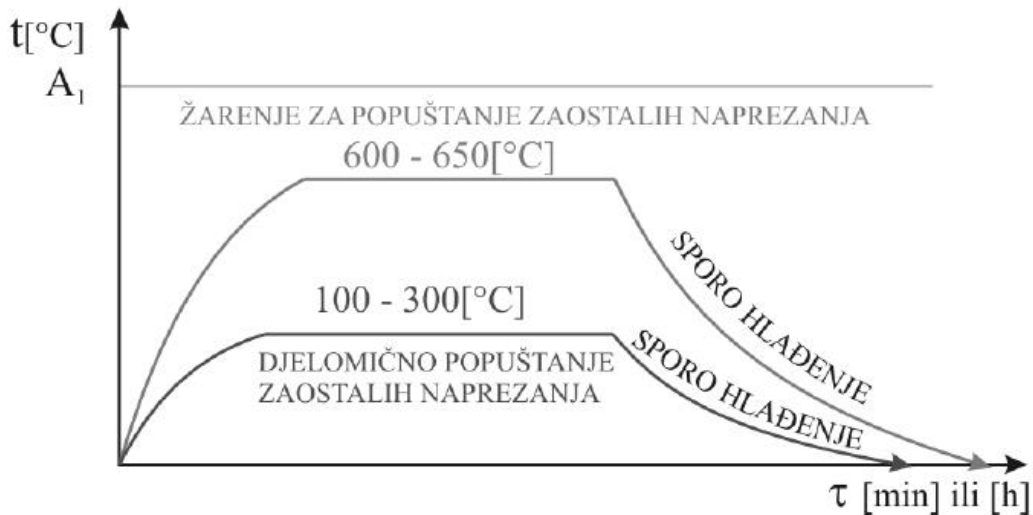


Slika 3.6: Dijagram postupka normalizacije [9]

Žarenje za redukciju zaostalih napreznaja

Postupak žarenja za redukciju zaostalih napreznaja provodi se na visokim temperaturama s ciljem smanjenja unutrašnjih napreznaja u materijalu koja su nastala kao posljedica hladnog gnječenja ili toplinskog djelovanja (npr. zavarivanje, kovanje, kaljenje) te polaganim hlađenjem kako bi se izbjeglo formiranje novih napreznaja. Pri tome ne nastupaju važnije strukturne promjene, a razgrađuju se makronapreznaja i transformacijska napreznaja [3].

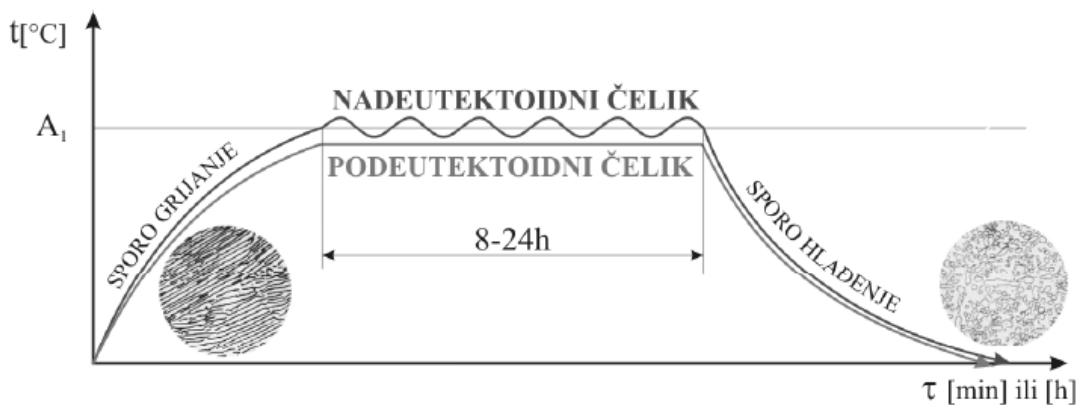
Kod čelika takvo žarenje izvodi se zagrijavanjem na temperaturu u području plastičnosti, tj. na temperaturu 600 °C do 650 °C gdje napreznaja iščeznu. Zatim se predmetu obrade temperatura lagano snizuje do sobne temperature tako da temperatura u svim slojevima bude podjednaka. Kako bi se izbjeglo poništenje efekta očvršćivanja koji je nastao prethodnim hladnim gnječenjem, ovaj postupak provodi se na temperaturi nižoj od temperature rekristalizacije. Također, možemo izvršiti i djelomično popuštanje zaostalih napreznaja na temperaturi od 100 °C do 300 °C ako je čelik npr. prethodno zakaljen jer tako nećemo bitno umanjiti njegovu čvrstoću [11]. Dijagram žarenja za popuštanje zaostalih napreznaja i djelomičnog popuštanja zaostalih napreznaja prikazan je na Slici 3.7.



Slika 3.7: Dijagram postupka redukcije zaostalih napreznaja [12]

Sferoidizacija ili meko žarenje

Sferoidizacijsko žarenje je postupak kojim se kod čelika s normalnim fazama po obliku, vrsti i veličini vrši pretvorba iz mrežastog ili lamelnog oblika u kuglasti [3]. Postupak sferoidizacije se provodi u tri faze. Na početku imamo polagano zagrijavanje čelika do temperature žarenja (podeutektoidnih ispod temperature A_{c1} , a nadeutektoidnih osciliranjem oko temperature A_{c1}), nakon toga duže zadržavanje (6 do 24 h) na temperaturi žarenja i na kraju sporo hlađenje u peći kako bi što više umanjili zaostala napreznaja (Slika 3.8) [11]. Struktura koja se postiže ovim postupkom olakšava obradu odvajanjem čestica čelika s više od 0,4 % ugljika, smanjuje čvrstoću, tvrdoću i povećava žilavost [3].

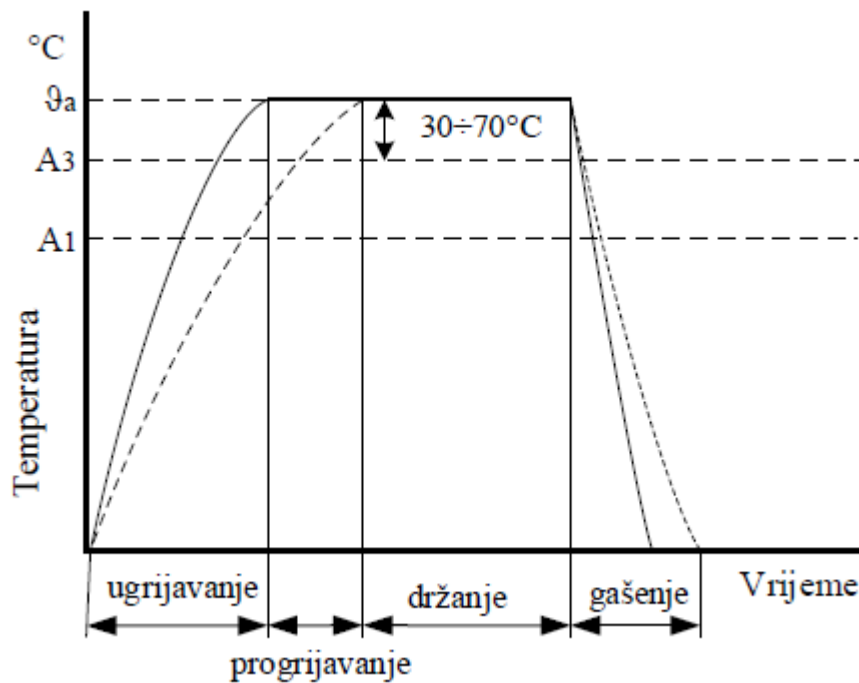


Slika 3.8: Dijagram postupka sferoidizacije [12]

3.1.2 Kaljenje

Kaljenje čelika toplinska je obrada kojom se postiže jednoličnija tvrdoća kroz poprečni presjek i veća tvrdoća nakon gašenja. Kaljivost je sposobnost pretvorbe čelika u austenit [13]. Da bi čelik bio zakaljiv potrebno je postojanje mikrostrukturne pretvorbe ferita u austenit i obrnuto, potrebno je da čelik sadrži najmanje 0,35 % ugljika, potrebno ga je ugrijati na temperaturu austenitnog područja (optimalna temperatura austenitizacije) te na kraju austenitizirani čelik treba intenzivno hladiti kako bi se spriječila difuzija ugljikovih atoma iz austenitne rešetke [7].

Glavni koraci postupka kaljenja su ugrijavanje i progrijavanje na temperaturi austenitizacije, držanje na toj temperaturi te gašenja s ciljem uspostavljanja martenzitne mikrostrukture (Slika 3.9) [6].

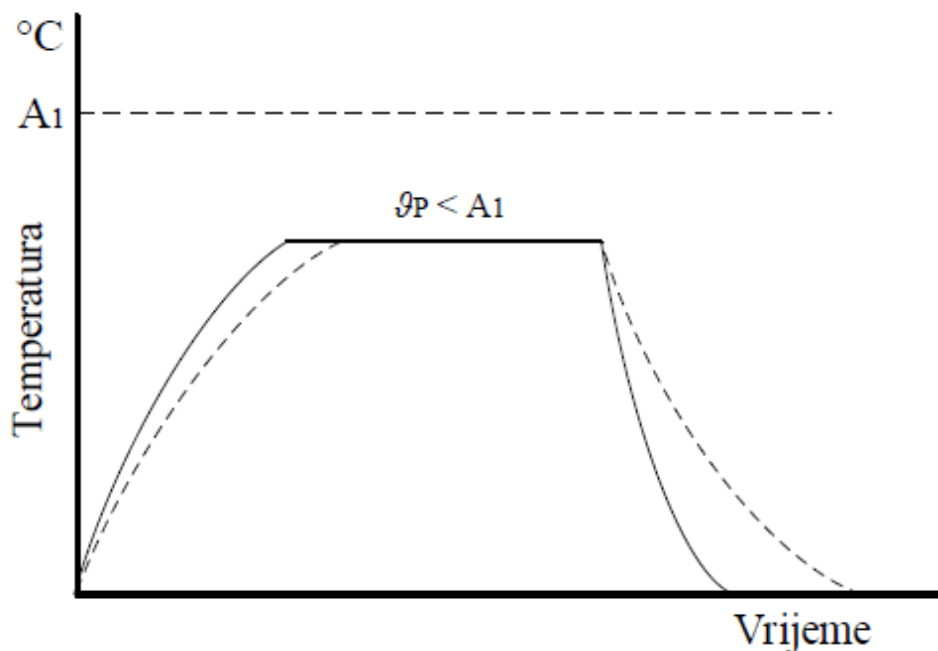


Slika 3.9: Dijagram postupka kaljenja [9]

Prokaljivost čelika je sposobnost da čelik poprimi homogenu tvrdoću kroz cijeli poprečni presjek [3], a zakaljivost je sposobnost da postigne najvišu razinu postizive tvrdoće nakon gašenja u idealnim uvjetima kaljenja [9].

3.1.3 Popuštanje

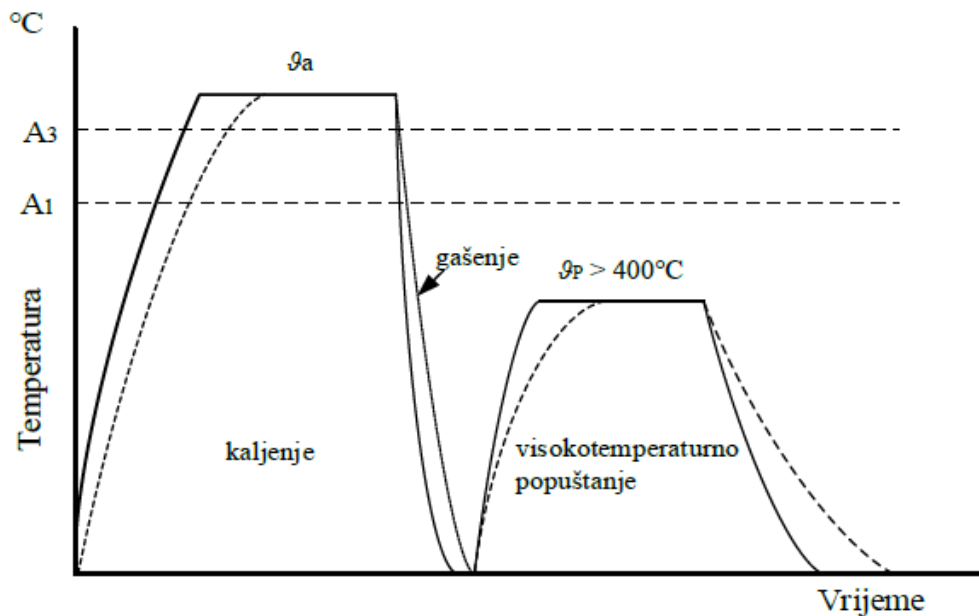
Popuštanje je vrsta toplinske obrade koja se provodi s ciljem redukcije napetosti i povećanja žilavosti nakon postupka kaljenja [6]. Postupak uključuje ugrijavanje kaljenog čelika do temperature niže od temperature A_1 (Slika 3.10). Radi se u svrhu sniženja krhkosti kaljenog čelika, postizanja dimenzijske postojanosti i smanjenja zaostalih naprezanja. Nuspojava popuštanja je snižavanje tvrdoće. Postupke popuštanja možemo podijeliti na temelju temperature izvođenja postupaka na niskotemperaturno popuštanje (temperatura ϑ_p niža od 220 °C), srednjetemperaturno popuštanje (kada je temperatura ϑ_p između 220 °C i 400 °C) te na visokotemperaturno popuštanje (kada je temperatura ϑ_p između 400 °C i A_1) [3]. Još jedan način izvođenja jest samopopuštanje koji se provodi zajedno s kaljenjem kao jedinstvena operacija. Na taj način postiže se potrebna površinska tvrdoća, a uz to sredina koja je nezakaljena i žilava [6].



Slika 3.10: Dijagram postupka popuštanja [9]

Poboljšavanje ili oplemenjivanje je postupak koji se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja (Slika 3.11). Glavna je svrha postizanje visoke žilavosti i visoke granice tečenja. Ovim se postupkom toplinski obrađuju ugljični i niskolegirani podeutektoidni čelici za poboljšavanje. Dijelimo ih na klasično i izotermičko poboljšavanje u kojem se klasično provodi visokim popuštanjem i normalnim kaljenjem. Izotermičko

poboljšavanje se provodi prekidnim kaljenjem (ekonomičnije) jer se obrađivani predmet ne mora ponovno zagrijavati [6].



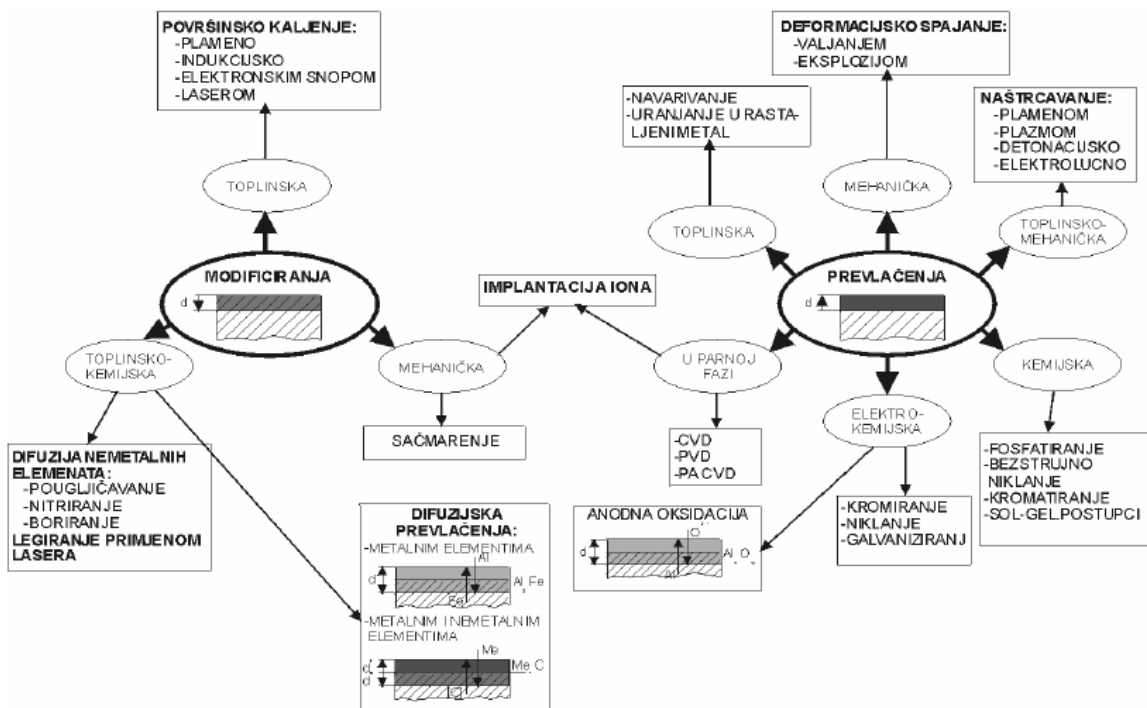
Slika 3.11: Dijagram postupka poboljšavanja [9]

3.2 Toplinska obrada površinskih slojeva

U toplinsku obradu površinskih slojeva spadaju metode koje ne dovode do promjene kemijskog sastava, metode termokemijske obrade te prevlačenje izlučivanjem iz plinske faze. U toplinsku obradu površinskih slojeva koje ne uzrokuju promjenu sastava spadaju induksijsko ugrijavanje, plameno ugrijavanje i ugrijavanje unošenjem visoke gustoće energije (lasersko i elektronskim mlazom) (detaljnije u poglavlju 5.1.1). Metode termokemijske obrade obuhvaćaju nitriranje, cementiranje, boriranje, karbonitriranje, vanadiranje, nitrokarburiranje, itd. Provode se istodobnim toplinskim i kemijskim djelovanjem s ciljem promjene strukture, sastava i svojstava površinskih slojeva (detaljnije u poglavlju 5.3.1) [14]. Prevlačenje izlučivanjem iz plinske faze podrazumijeva PVD (fizikalno taloženje iz parne faze), CVD (kemijsko taloženje iz parne faze) i PACVD (plazmom potpomognut CVD postupak) koji su detaljnije opisani u poglavlju 6.6. [9].

4. POSTUPCI POVRŠINSKE OBRADE METALA

Površinska obrada metala je proces u kojem se najčešće kemijska tvar nanosi na metale u svrhu čišćenja, zaštite, mijenjanja ili modificiranja izgleda ili fizikalnih svojstava, posebno površinskih svojstava. Postupci površinske obrade metala dijele se na postupke modificiranja i postupke prevlačenja materijala. Još detaljnija podjela prikazana je na Slici 4.1. Cilj ovih postupaka je difuzijom odgovarajućeg elementa promijeniti sastav u metalu, u relativno tankoj površinskoj zoni i na taj način poboljšati određena svojstva: mehaničku otpornost, otpornost prema trošenju, kemijsku otpornost te vatrootpornost. Također, cilj ovih postupaka je na jeftinijim materijalima postići upotrebnost slična onim kakva posjeduju skuplji metali.



Slika 4.1: Podjela postupaka površinske obrade metala [1]

5. POSTUPCI MODIFICIRANJA POVRŠINA

Postupci modificiranja površinskih slojeva metala temelje se na primjeni vanjskog djelovanja. S obzirom na vrstu vanjskog djelovanja mogu se podijeliti na toplinsko, mehaničko i termokemijsko [1]. Ovim postupcima željeni površinski sloj formira se od površine obrađivanog metala prema unutrašnjosti za razliku od postupaka prevlačenja gdje se taj sloj formira iznad polazne površine obrađivanog metala [15]. Ono po čemu se površinski slojevi razlikuju od polaznog materijala koji se obrađuje je mikrostruktura, drugačiji kemijski sastav, kristalna rešetka te druga svojstva koja su odgovorna za poboljšane eksploatacijske karakteristike.

5.1 Toplinsko modificiranje

Djelovanjem visokom gustoćom toplinske energije u kratkom vremenskom periodu moguće je ograničiti ugrijavanje samo na sloj koji se nalazi na površini. Takvi postupci već dugo se koriste u industrijskoj praksi. Postoji više načina zagrijavanja. To su indukcijско i plameno zagrijavanje, a u novije vrijeme i zagrijavanje primjenom lasera ili primjenom elektronskog snopa [16, 17, 18]. Kod novijih postupaka dubina na kojoj se provodi zakaljivanje i ugrijavanje može biti puno manja. Tada je moguće i “samozakaljivanje” koje se temelji na odvođenju topline iz tankog austenitiziranog sloja u unutrašnjost ispod sloja, a da pri tome nije potrebno vanjsko ohlađivanje (gašenje) [1].

5.1.1 Površinsko kaljenje

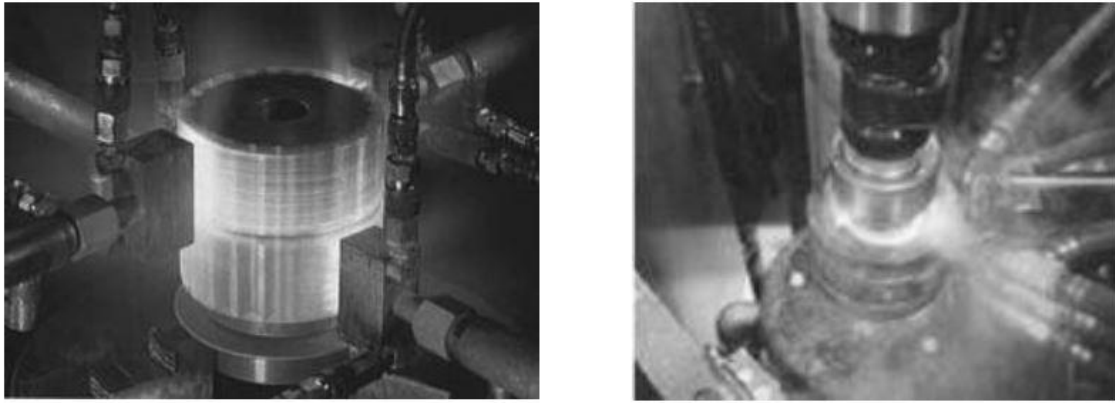
Prema načinu zagrijavanja površinsko kaljenje možemo podijeliti na 4 skupine: plameno kaljenje, indukcijско kaljenje, površinsko kaljenje laserom i površinsko kaljenje elektronskim snopom. Plameno kaljenje najstariji je postupak otvrdnjavanja površine metalnih materijala te se provodi izravnim zagrijavanjem plamenicima koji oslobađaju toplinsku energiju izgaranjem plinova različitog sastava (prirodni plin, propan i acetilen) i kisika. Iza plamenika nalaze se mlaznice koje su važne za naglo hlađenje površine vodom, uljem za gašenje ili sintetičkim sredstvom za gašenje [15, 19]. Dubina zakaljenog sloja ovisi o izvedbi plamenika, sastavu plinske mješavine, trajanju ugrijavanja, udaljenosti plamenika od površine, prokaljivosti materijala te uvjetima gašenja [14]. Završni obradak ima poboljšana svojstva na trošenje i klizanje, povećana je površinska tvrdoća te poboljšana otpornost na udarce i pritiske. Ovaj postupak ima veliku primjenu kao što je kaljenje noževa u hobi svrhe (Slika 5.1), posebice u strojogradnji za dijelove izložene trošenju te u industriji

motora (svornjaci, križevi diferencijala, zupčanici, koljenaste osovine, itd.) [15]. Prednosti plamenog kaljenja su jednostavnost rukovanja te mogućnost obrade velikih dimenzija, a nedostaci mogućnost pregrijavanja i otežano reguliranje dubine zakaljenog sloja [19].



Slika 5.1: Plameno kaljenje noža [20]

Druga vrsta je indukcijsko kaljenje (Slika 5.2). Ono podrazumijeva zagrijavanje površine pomoću prolaza inducirane struje po površini. Toplina potrebna kod zagrijavanja dovodi se beskontaktno, period ugrijavanja je relativno kratak, a komplicirani dijelovi obratka se mogu kaliti parcijalno. Ovaj postupak najčešći je proces površinskog kaljenja zbog dobrih svojstva zakaljenih slojeva kao što su: povišenje površinske tvrdoće, poboljšavanje kliznih svojstava i otpornost na trošenje te porast čvrstoće i povećanje dinamičke izdržljivosti [19]. Prednosti indukcijskog kaljenja su mala potrošnja energije, visoka produktivnost, velika kvaliteta zakaljenog sloja, male deformacije, itd., a nedostaci otežana kontrola temperature, visoka cijena uređaja, određene vrste čelika se ne mogu indukcijski kaliti, itd. [14].



Slika 5.2: Plameno i indukcijsko rotacijsko kaljenje rukavca i koljenaste osovine [13]

Površinsko kaljenje laserom je postupak kojim se apsorpcijom laserskog zračenja te interakcijom između slobodnih elektrona i laserskog snopa dobiva toplinska energija potrebna za kaljenje. Laserski uređaj (Slika 5.3) pretvara električnu energiju u toplinsku zbog čega provodi vrlo brzo zagrijavanje tankog površinskog sloja. Ovim postupkom postiže se povećanje čvrstoće, otpornosti na trošenje i na zamor. U odnosu na prethodne postupke površinskog kaljenja prednosti obradbe laserom su minimalne deformacije obrađivanih predmeta, velika pouzdanost, nepotrebno naknadno obrađivanje, energetska i ekološka prihvatljivost, itd. Nedostaci su nisko iskorištenje generatora energije, velika refleksija energije lasera, skuplji postupak od plamenog i indukcijskog površinskog kaljenja, itd. [14].



Slika 5.3: Površinsko kaljenje laserom [21]

i drugi pozitivni učinci kao što su smanjenje vlačnih napreznja i ravnanje metalnih predmeta [14].



Slika 5.5: Pjeskarenje površine metala [25]

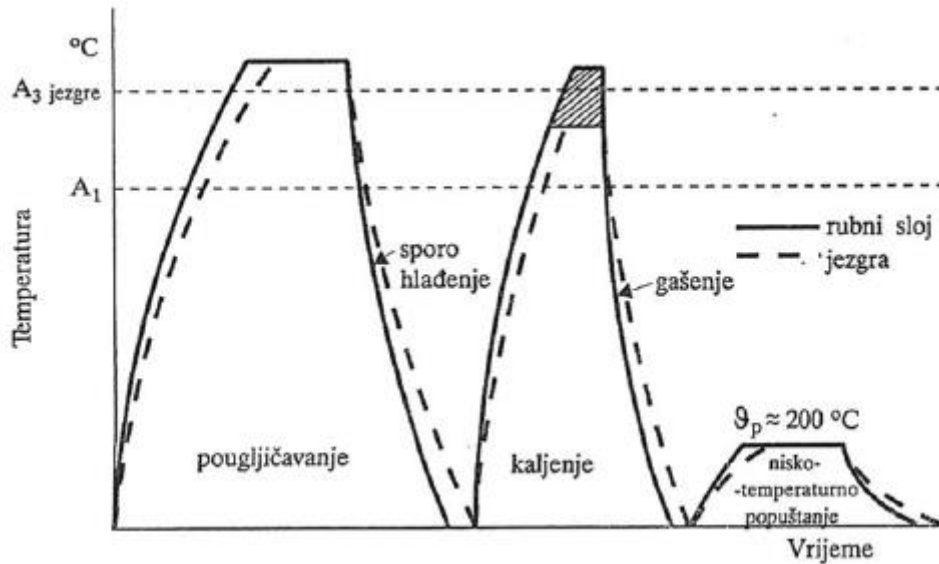
5.3 Toplinsko - kemijsko modificiranje

Toplinsko-kemijsko (termokemijsko) modificiranje uključuje postupke koji kombiniraju unošenje toplinske energije i kemijskih elemenata što dovodi do promjene kemijskog sastava zbog čega se mijenja i mikrostruktura te svojstva površinskih slojeva [14]. Nemetali se difuzijom unašaju u površinske slojeve metala. Ovi postupci dijele se na postupke temeljene na difuziji nemetalnih elemenata (pougljičavanje, boriranje, nitriranje), difuzijsko prevlačenje i legiranje primjenom lasera [26]. Primjenom ovih postupaka povisuje se otpornost na trošenje (adhezijsko ili abrazijsko), otpornost na korozijsko djelovanje, induciraju se prednapreznja, itd. [14]. Npr. postupci nitriranja i pougljičavanja često se primjenjuju u strojogradnji [26].

5.3.1 Difuzija nemetalnih elemenata

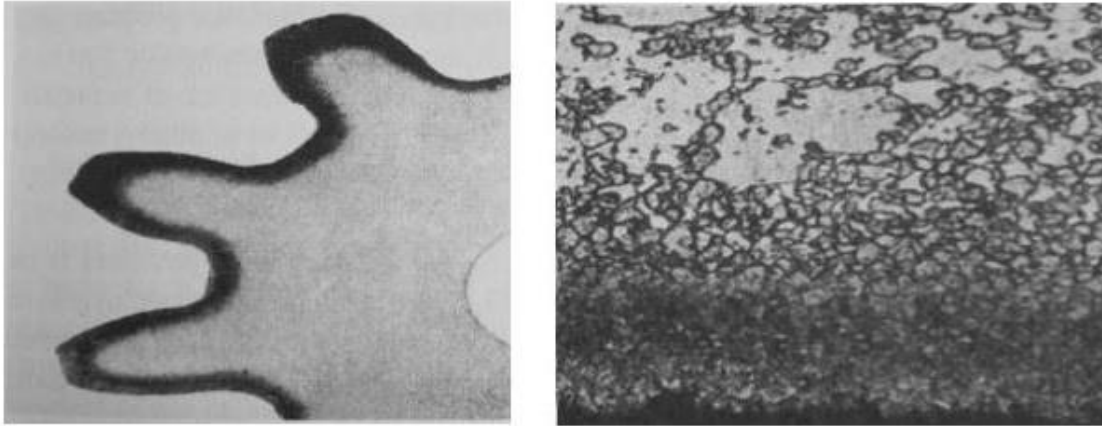
Pougljičavanje je jedan od termokemijskih procesa koji podrazumijeva obogaćivanje površinskih slojeva ugljikom [15]. Ovaj postupak provodi se kao dio procesa cementiranja koji još uključuje kaljenje i popuštanje [14]. Glavna namjena cementiranja je postizanje tvrdih površinskih slojeva otpornih na trošenje, a da pri tom niskougljična jezgra ostane

žilava, a time otporna na udarna opterećenja. Temperatura pougljičavanja kreće se između 900 °C i 950 °C te je viša od optimalne temperature austenitizacije. Na Slici 3.14 prikazan je uobičajeni postupak cementiranja čelika [3].



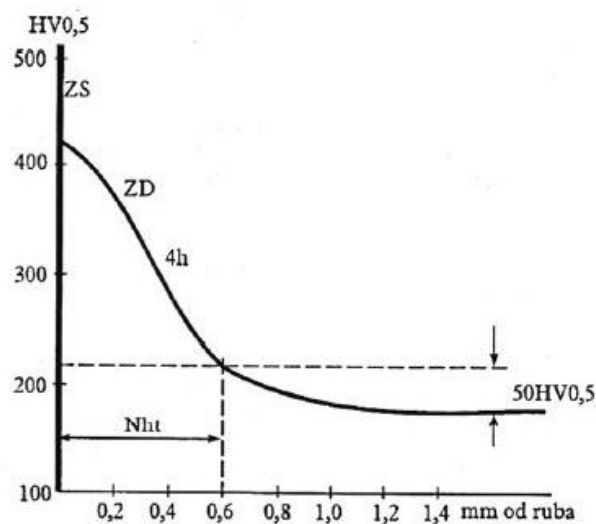
Slika 5.6: Dijagram mogućeg postupka cementiranja čelika [7]

Koristi se veliki broj različitih postupaka pougljičavanja kao što su primjena solnih kupki, posebnih granulata i plinskih atmosfera (ioniziranih, sintetičkih i generatorskih). Pougljičavanje je najstariji postupak ove vrste, ali bez obzira na to njegova upotreba je veoma raširena i danas jer se tom metodom postiže najviša otpornost kod naprezanja površinskih slojeva. Tehnologije pougljičavanja konstantno se razvijaju i unaprjeđuju [27]. Prednosti ovog postupka su što nije potrebna sofisticirana oprema, mogućnost korištenja za velike predmete i postizanje dubokih slojeva te mekoće obrađivanih predmeta koja je dobivena sporim hlađenjem. Postoje i neki nedostaci kao što su nepogodnost za masivnu proizvodnju, nemogućnost potpune kontrole, veliki intenzitet radnog procesa, itd. [15]. Na Slici 5.6 prikazan je pougljičeni sloj zupčanika.



Slika 5.7: Pougličeni sloj zupčanika [28]

Druga vrsta toplinsko-kemijskog modificiranja je nitriranje koje također ima široku primjenu. Podrazumijeva žarenje u mediju koji predaje dušik obrađivanom materijalu s ciljem obogaćivanja površine dušikom [14]. Različiti postupci koriste solne kupke, plinske ili ionizirane atmosfere. U površinski sloj najčešće se istovremeno unosi dušik s drugim nemetalima (sumpor, ugljik, kisik, itd.). U tom slučaju navedeni postupci se nazivaju sulfonitriranje, nitrokarburiranje te nitrooksikarburiranje [29]. Ovim postupcima postiže se povećana otpornost na koroziju, visoka površinska tvrdoća, poboljšana otpornost na trošenje i zamor, itd. [15]. Postignuta otpornost na trošenje rezultat je stvaranja nitrida (spojeva dušika sa željezom ili dušika s elementima kojima je čelik legiran) [14]. Efektivna dubina nitriranja je udaljenost od ruba presjeka na kojoj se postiže tvrdoća za 50 HV_{0,5} viša od tvrdoće jezgre proizvoda (Slika 3.12) [3].



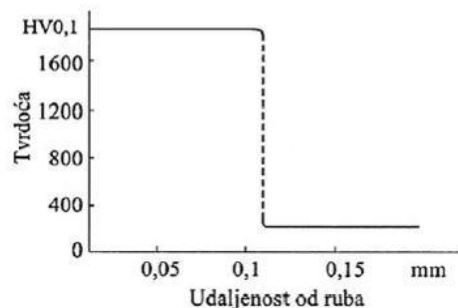
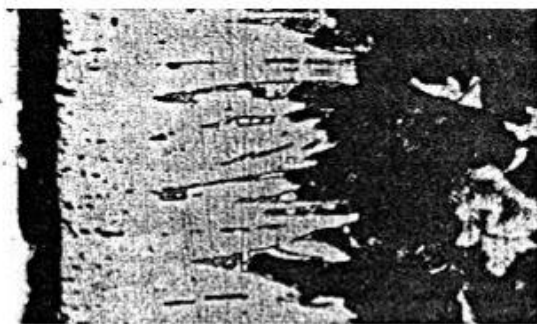
Slika 5.8: Određivanje efektivne dubine nitriranog sloja [9]

Prednosti nitriranja su nepostojanost površinske kontaminacije, mogućnost selektivnog nitriranja, nitriranja nepravilnih predmeta, itd. Neke mane ovog procesa su dugotrajnost procesa, dobivanje tanke i krhke zone spojeva, prisutnost amonijaka u dimu [15]. Npr. ova vrsta termokemijske obrade primjenu pronalazi u završnoj toplinskoj obradi u procesu proizvodnje alata i dijelova. Na Slici 5.7 prikazan je primjer nitriranih zupčanika.



Slika 5.9: Nitrirani zupčanici [30]

U ovu skupinu pripada i boriranje koje podrazumijeva difundiranje elementa bora kod povišene temperature u površinski sloj gdje reagira sa željezom pri čemu nastaje Fe_2B koji je ključan za postizanje željenih svojstava [14]. Nastali željezni boridi odgovorni su za visoku otpornost na abrazijsko trošenje, visoku tvrdoću (Slika 3.13), postojanost na visokim temperaturama, otpornost na lužine i kiseline, itd. [15].



Slika 5.10: Mikrostruktura i prikaz ovisnosti tvrdoće poprečnog presjeka boriranog čeličnog predmeta o udaljenosti od ruba [7]

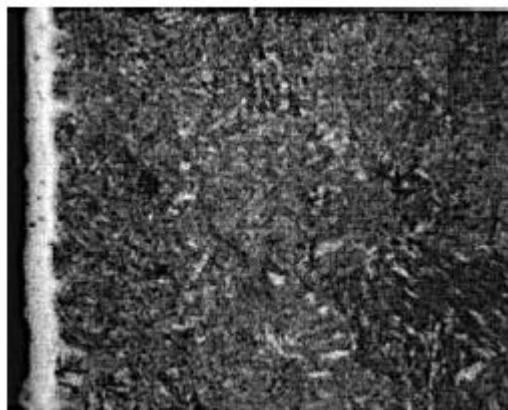
Sredstva koja se koriste kao nositelji bora mogu biti u obliku paste, kapljevine, plina ili čvrstog stanja, a u novije vrijeme koriste se i drugi mediji kao što je plazma. Još neke prednosti površinskih slojeva dobivenih na ovaj način su visoko talište, niski koeficijent trenja, duži vijek trajanja u oksidativnim i korozivnim uvjetima, dok su nedostaci porast debljine sloja, slaba otpornost na kontaktni zamor valjanjem, lom prilikom uobičajenog brušenja, itd. [15]. Neki primjeri predmeta koji se boriraju jesu valjci za graviranje, dijelovi mjenjača, dijelovi ventila, kalupi za prešanje, itd. [11].

5.3.2 Difuzijsko prevlačenje

Difuzijsko prevlačenje uključuje formiranje intermetalnog spoja koji nastaje difuzijom nekog metala u obrađivani materijal pri čemu dolazi do trošenja sloja na površini i nastajanja prevlake [31]. Primjer jednog od ovih postupaka je vanadiranje. Još jedna skupina ovih postupaka je prevlačenje koje se temelji na istodobnoj difuziji nemetalnih i metalnih elemenata, npr. formiranje karbidnih slojeva koji su tvrdi je jedan od procesa koji se razvija kao alternativa PVD i CVD postupcima jer ne zahtjeva velika financijska ulaganja [32].

Vanadiranje

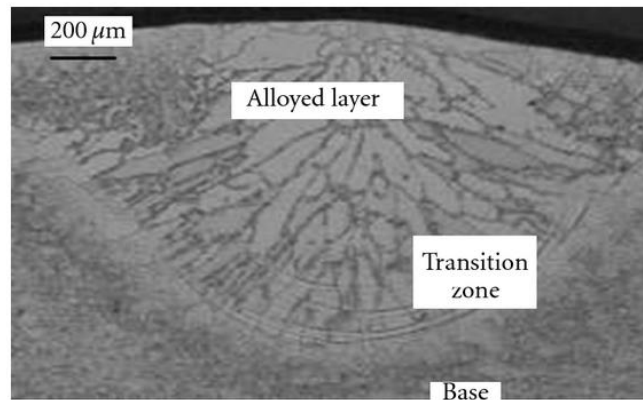
Vanadiranje čelika vrsta je termokemijske obrade koja uključuje difuziju vanadija u površinske slojeve obrađivanog predmeta zagrijanog na određenu temperaturu (1000 °C do 1200 °C). Na taj način nastaju vanadijevi karbidi koji su odgovorni za postizanje poželjnih svojstava kao što su visoka tvrdoća i otpornost na adhezijsko trošenje. Za postizanje još boljih navedenih svojstava koristi se difuzija kombinacije vanadija i kroma pri čemu nastaju V-Cr karbidi [3]. Na Slici 3.15 prikazana je mikrostruktura vanadiranog čelika.



Slika 5.11: Mikrostruktura vanadiranog čelika [33]

5.3.3 Legiranja primjenom lasera

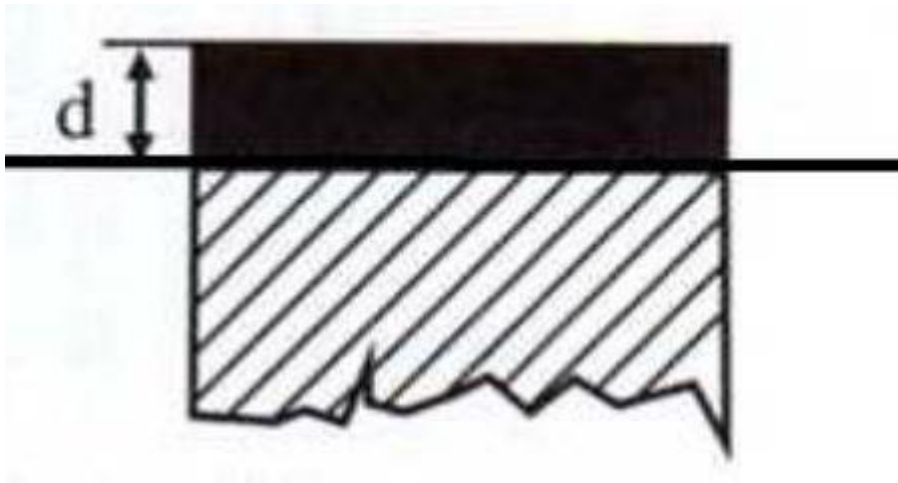
Legiranje primjenom lasera je postupak kojem se osnovni materijal laserskim snopom dovodi u rastaljeno stanje. Dovođenje dodatnog materijala se realizira s ciljem potpunog otapanja u osnovnom materijalu. Postupak se primjenjuje za obradu dijelova velikog formata na relativno malim opterećenim područjima i za dijelove kompliciranih oblika osjetljivih na deformacije. Obradivana ploha mora biti pristupačna laserskoj zruci i ne smije sadržavati ugledna mjesta i poteze [19].



Slika 5.12: Površinski sloj legiran laserom [34]

6. POSTUPCI PREVLAČENJA POVRŠINA

Prevlačenje površina se primjenjuje u različitim postupcima koji se temelje na mehanizmu koji se može podijeliti na toplinski, mehanički, kemijski ili njihovu kombinaciju. Površinski sloj se formira iznad polazne površine kako je prikazano na Slici 6.1, a ne u sklopu polazne površine.



Slika 6.1: Prevlačenje površine [15]

6.1 Mehaničko prevlačenje

Mehaničko djelovanje koristi se s ciljem deformacijskog spajanja metala koji su različiti te ih karakteriziraju različita svojstva (npr. otpornost prema kemijskom djelovanju). Danas se sve češće koristi eksplozijsko spajanje uz ostale postupke kao što je spajanje primjenom toplog valjanja [1].

6.1.1 Deformacijsko spajanje (platiranje)

U postupke deformacijskog spajanja spadaju obično i eksplozijsko platiranje. Platiranje je metoda temeljena na plastičnoj deformaciji. To je oblaganje metala uobičajenim metodama plastične prerade koja se provodi u uvjetima visokom tlaka što uzrokuje tečenje metalne prevlake. Temelji se na tome da se metal kojim vršimo prevlačenje zagrije i složi u peć te nakon zagrijavanja pomoću valjaka međusobno zavare pod primijenjenim pritiskom. Dobivenu prevlaku je nemoguće fizički odjeliti, ima neporozan i homogen sloj s odličnim svojstvima otpornosti na koroziju, čvrstoće, itd. [35, 36]. Eksplozijsko platiranje je postupak koji se provodi uporabom eksploziva u napuštenom otvorenom rudištu [37] gdje se udarnim

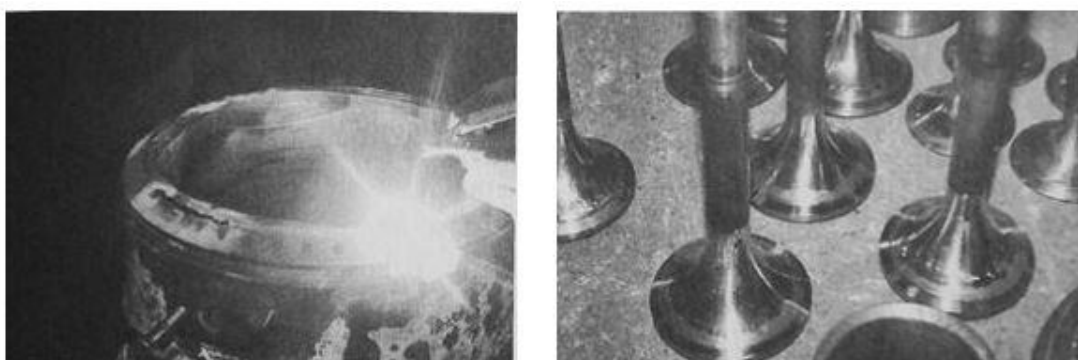
detonacijskim djelovanjem odbacuje oblogu prema podlozi i pritom je platira. Time nastaje spoj dvaju različitih materijala bez opasnosti od oksidacije i bez potrebe za zagrijavanjem [15].

6.2 Toplinsko prevlačenje

Toplinsko prevlačenje uključuje primjenu topline za taljenje metalnog materijala koji zatim kristalizacijom na površini obrađivanog metalnog materijala stvara površinski sloj. Metalni slojevi nanose se postupcima navarivanja te postupcima uranjanja u rastaljeni materijal.

6.2.1 Navarivanje

Navarivanje je postupak nanošenja dodatnog materijala na obrađivani materijal u svrhu popravka alatnih ili strojnih površinskih dijelova. Navarivanje se provodi i radi postizanja posebnih karakteristika kao što su povećanje otpornosti na kemijske utjecaje, poboljšanje otpornosti na trošenje, viša tvrdoća, lijepi izgled, itd. Uglavnom se dobivaju deblji slojevi koje karakterizira široko polje tolerancije dimenzija, a nakon što se istroše moguće ih je obnoviti regeneracijom. Razlika između postupaka zavarivanja i navarivanja jest što se zavarivanjem spajaju dva osnovna materijala uz primjenu dodatnog, a navarivanjem se popunjavaju i poboljšavaju istrošene površine strojnog dijela ili alata. Neke prednosti ovog postupka su mogućnost nanošenja višestrukih slojeva, mogućnost nanošenja na bilo koji materijal te visoka učinkovitost. Nedostaci ovoga postupka su otežano nanošenje navarenog sloja na dijelove nepravilnih oblika te potreba za dodatnom obradom u slučaju da je potrebna točna geometrija površine [15]. Na Slici 6.2 prikazani su primjeri navarivanja dijelova broda.



Slika 6.2: Navarivanje dijelova brodskih ventila i košuljice [38]

6.2.2 Uranjanje u rastaljeni metal

Druga vrsta toplinskog prevlačenja, uranjanje u rastaljeni metal, koristi se u svrhu povećanje otpornosti prema kemijskom djelovanju i koroziji [1]. Postupak se temelji na uranjanju metalnog predmeta u rastaljeni metal niskog tališta uz kratkotrajno zadržavanje. Skrućivanjem zaostalog sloja taline na obrađivanom predmetu nastaje prevlaka. Temperatura tališta obrađivanog metala mora biti znatno viša od temperature tališta materijala koji će stvoriti prevlaku. Također, potrebna je mogućnost međusobnog legiranja obrađivanog materijala i metala kojim vršimo prevlaku. Uranjanje u rastaljeni metal koristi se za nanošenje prevlaka cinka, kositra, antimona, olova, olovnih legura, itd. Najčešće se koristi u metaliziranju limova, traka, žica, cijevi, odljevci, itd. [15].

6.3 Toplinsko - mehaničko prevlačenje

Toplinsko-mehaničko prevlačenje kombinira toplinske i mehaničke postupke u prevlačenju. Toplinskom energijom rastali se materijal, a zatim se čestice koje su rastaljene mehaničkim udarom preusmjeravaju na površinski sloj predmeta koji se obrađuje gdje kristaliziraju. Postoje različiti oblici ovog postupka naštrcavanjem (plazmom, plamenom, elektrolučno, detonacijski) kojima se nanose različite legure i metali te mješavine koje sadrže keramičke materijale.

6.3.1 Naštrcavanje

Postupak naštrcavanja podrazumijeva nanošenje kapljica rastaljenog metala na slabo predgrijani obrađivani predmet. Osim nanošenja metala, ovim postupkom mogu se nanositi i nemetali koji se ne raspadaju taljenjem. Također, obrađivani predmet može biti i metalni i nemetalni. Dijeli se na elektrolučno naštrcavanje, naštrcavanje plazmom i plameno naštrcavanje [15]. Naštrcavanjem se nanose slojevi koji su tanji od slojeva koji se nanose navarivanjem. Jednolike su debljine i imaju mogućnost naknadnog obnavljanja. Provodi se s ciljem povećanja otpornosti prema kemijskom djelovanju, povećanja otpornosti na trošenje, postizanja električne vodljivosti ili izolacije, otpornosti na visoke temperature, toplinske izolacije te za postizanje dekorativnih svojstava [1, 19, 39]. Osim za postizanje navedenih svojstava, koristi se i za reparaciju osovina, vratila te raznih strojnih dijelova u prehrambenoj, tekstilnoj, procesnoj industriji, itd. [40]. Naštrcavanjem se mogu prevlačiti lijevana željeza, titanij, titanijeve legure, čelici, itd. [39]. Prednosti naštrcavanja u odnosu na navarivanje su mogućnost nanošenja tankih slojeva, manje deformacije obrađivanog

predmeta, mogućnost naštrcavanja nezavarljivih materijala i slitina, jeftiniji uređaji te potrebne manje količine dodatnog materijala [15].

6.4 Kemijsko prevlačenje

Kemijsko prevlačenje uključuje postupke bezstrujnog niklanja, sol-gel postupke, fosfatiranje te kromatiranje. Primjenjuju se s ciljem povećanja otpornosti prema kemijskom djelovanju, koroziji i povećanja otpornosti na trošenje [41, 42].

6.4.1 Fosfatiranje

Fosfatiranje je postupak površinske obrade metala pri kojem kemijskom reakcijom između metala i elektrolita nastaju prevlake od netopljivih fosfata. Postupak se provodi u fosfatnokiselim otopinama koje sadrže topljive fosfate cinka, mangana i željeza te oksidans koji je važan za ubrzanje nastanka prevlake. Dodatak oksidansa skraćuje vrijeme uranjanja i omogućuje nižu temperaturu fosfatiranja. U reakciji sudjeluju i metalni atomi same podloge koja se obrađuje. Prevlake dobivene ovim postupkom su kristalinične, hrapave, bez sjaja i krhke. Cilj ovog postupka je povećati otpornost na koroziju i olakšati hladnu plastičnu preradu metala, a koristi se i kao priprema za bojanje i lakiranje [15].

S obzirom na masu fosfatnog sloja, fosfatiranje se može podijeliti na „tanko“ ili „lako“ te „debelo“ ili „teško“. Teškim fosfatiranjem nastaje površinski sloj mase veće od 8g po metru kvadratnom podloge. Takvi slojevi imaju bolja zaštitna svojstva jer su manje porozni i manje podložni trošenju. Lakim fosfatiranjem nastaju površinski fosfatni slojevi mase manje od 8 g po metru kvadratnom površine. Najčešće se nanose tanki slojevi prevlake od 0.2 g do 1.5 g po metru kvadratnom koji su vrlo porozni, a služe kao priprema podloge za nanošenje organskih boja i lakova, plastificiranje, gumiranje te emajliranje [15].

Fosfatiranje se dijeli na elektrokemijsko i kemijsko. S obzirom na temperaturu otopine koja se koristi, kemijsko fosfatiranje dijeli se na vruće i hladno, a provodi se uranjanjem ili prskanjem. Osnovne vrste fosfatnih prevlaka su cinkove fosfatne prevlake, željezne fosfatne prevlake i manganske fosfatne prevlake [15]. Slika 6.3 prikazuje primjer fosfatiranih dijelova.



Slika 6.3: Primjer fosfatiranih dijelova [43]

6.4.2 Kromatiranje

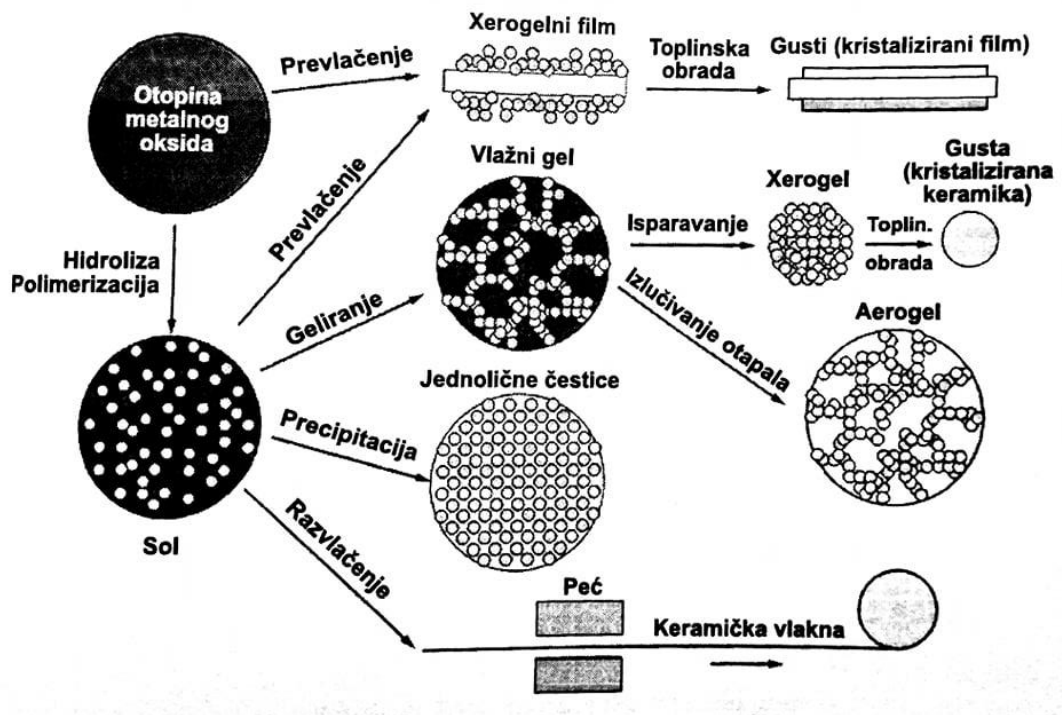
Kromatiranjem nastaju kromove prevlake na površini metala kao produkt kemijske reakcije koja se događa uranjanjem ili prskanjem metala otopinom kromatne kiseline ili kromatnih soli. Posljedica te reakcije je blago otapanje površine metala i formiranje sloja građenog od kompleksnih kromovih spojeva (hidratizirani kromati i dikromati materijala kojeg obrađujemo i kroma (III) koji su često pomiješani s oksidima, hidroksidima i fosfatima) [15].

Dobivene prevlake se mogu odlično bojati i lakirati. Koriste se za proizvode koji se primjenjuju u morskih uvjetima i uvjetima visoke vlažnosti. Osim funkcionalne uloge, deblje prevlake imaju i dekorativnu ulogu jer se prelijevaju u duginim bojama [15].

6.4.3 Sol-Gel postupci

Sol-gel postupcima dobivaju se homogeni anorganski metalni oksidi željene optičke prozirnosti, tvrdoće, toplinske i kemijske otpornosti. Ovi postupci podrazumijevaju razvoj anorganskih mreža kroz formiranje koloidne otopine (sol) i njezino geliranje kako bi formirala mrežu u kontinuiranoj tekućoj fazi (gel). Koloidna otopina je otopina čestica promjera od 1nm do 1 μ m koje su homogeno suspendirane u otapalu, a gel je koloidna suspenzija tekućine u čvrstim tvarima, pri čemu nastaje želatinozni materijal krući od sola [19]. Proces sol-gel postupaka možemo podijeliti u pet glavnih koraka: hidroliza i

polikondenzacija, geliranje, „starenje“, sušenje te zgušnjavanje i kristalizacija (Slika 6.4) [15]. Reakcije hidrolize i kondenzacije alkoksida prekursora uz katalizator uzrokuju geliranje sustava. Svojstva dobivenih anorganskih mreža određena su brojnim čimbenicima o kojima ovisi brzina kondenzacije i hidrolize. Neki od tih čimbenika su pH vrijednost, temperatura, vrijeme reakcije, koncentracija reaktanata i katalizatora, itd.



Slika 6.4: Shematski prikaz sol-gel postupka [44]

Neke prednosti ovog postupka su niska cijena, velika homogenost prevlake, jednolika debljina prevlake, niska temperatura postupka, itd. Tehnike prevlačenja sol-gel postupkom su izlivanje, naštrcavanje, uranjanje, kapilarno prevlačenje, rotiranje, tiskanje, valjanje i kemijsko prevlačenje [19]. Ovi postupci primjenjuju se u proizvodnji oksidnih stakala, prahova, industrijskih optičkih vlakana, itd. Može se koristiti i za povećanje otpornosti na koroziju te plinsku oksidaciju [15].

6.5 Elektrokemijsko prevlačenje

Elektrokemijska prevlačenja provode se uglavnom u svrhu povećanja otpornosti na koroziju i kemijsko djelovanje. Uz to kromirani površinski slojevi pokazuju i karakteristike poput veće otpornosti na trošenje i visoku tvrdoću (tvrdi krom) [1].

6.5.1 Galvaniziranje

Galvaniziranje je najčešći postupak koji primjenjuje električnu struju za obradu površina. Predmet kojeg obrađujemo spaja se katodno na negativni pol istosmjerne struje (4 do 10V), a na pozitivan pol izvora struje anodno. Strujni krug koji se koristi za galvanizaciju zatvara se preko metalnih vodiča i preko katode i anode koje su uronjene u elektrolit. Jedan od zahtjeva koji se postavljaju u postupku galvanizacije je dobivanje metalne prevlake koja ima ravnomjerno raspoređenu istu debljinu. Ako nije prisutna ravnomjerno raspoređena debljina prevlake znači da je došlo do neravnomjerne raspodjele struje po površini katode (različita konfiguracija električnog polja u ćeliji za elektrolizu). Primarni cilj galvanizacije je povećanje zaštite od trošenja trenjem, zaštite od korozije i zaštitno-dekorativni učinak. Neki od nedostataka galvanizacije su složeno održavanje otopine, visoka cijena opreme te slaba raspodjela prevlake na mikro i makro razini [15].

6.5.2 Anodna oksidacija

Anodna oksidacija je elektrokemijski proces u kojem oksidacijom aluminijske nastaje površinski sloj tvrdog Al_2O_3 . Ovim postupkom postiže se sloj koji ima visoku otpornost na koroziju i visoku otpornost na trošenje te predstavlja značajnu tribološku prevlaku za mekani aluminijski i njegove legure [45].

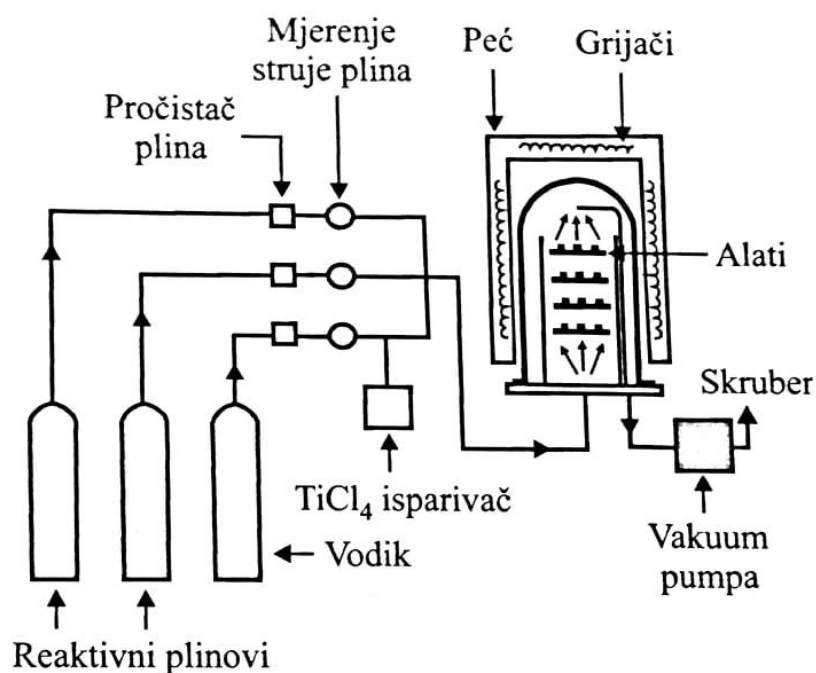
6.6 Prevlačenje u parnoj fazi

Prevlačenjem u parnoj fazi nanose se spojevi koji su tvrdi i stabilni, a pripadaju skupinama metaloorganskih spojeva, oksidne keramike, neoksidne keramike te dijamantu sličnog ugljika [46]. U novije vrijeme posebno su intenzivna istraživanja na ovom polju i primjena ovih postupaka u izradi alata i konstrukcijskih elemenata. Slojevi prevučeni ovim postupkom pokazuju dužu trajnost i niži koeficijent trenja za razliku od dijelova koji nisu prevučeni. Vrste postupaka prevlačenja u parnoj fazi su kemijsko prevlačenje u parnoj fazi

(CVD), fizikalno prevlačenje u parnoj fazi (PVD) te plazmom potpomognuti postupci kemijskog prevlačenja u parnoj fazi (PA CVD) [1].

6.6.1 Kemijsko taloženje iz parne faze (CVD)

Kemijsko taloženje iz parne faze je postupak nanošenja slojeva u parnoj fazi kemijskim putem, tj. uključuje interakciju smjese plinova aktivirane toplinom, svjetlom ili plazmom te površine zagrijanog materijala koji se obrađuje. Temelji se na raspadanju plinskih reaktanata i kemijskim reakcijama između plinovitih spojeva i drugih plinovitih fazama u svrhu dobivanja krutog, stabilnog i gustog sloja na zagrijanoj podlozi [47, 48]. Na Slici 6.5 prikazano je postrojenje za nanošenje prevlake CVD-postupkom.



Slika 6.5: Shematski prikaz postrojenja za nanošenje prevlake (CVD-postupak) [49]

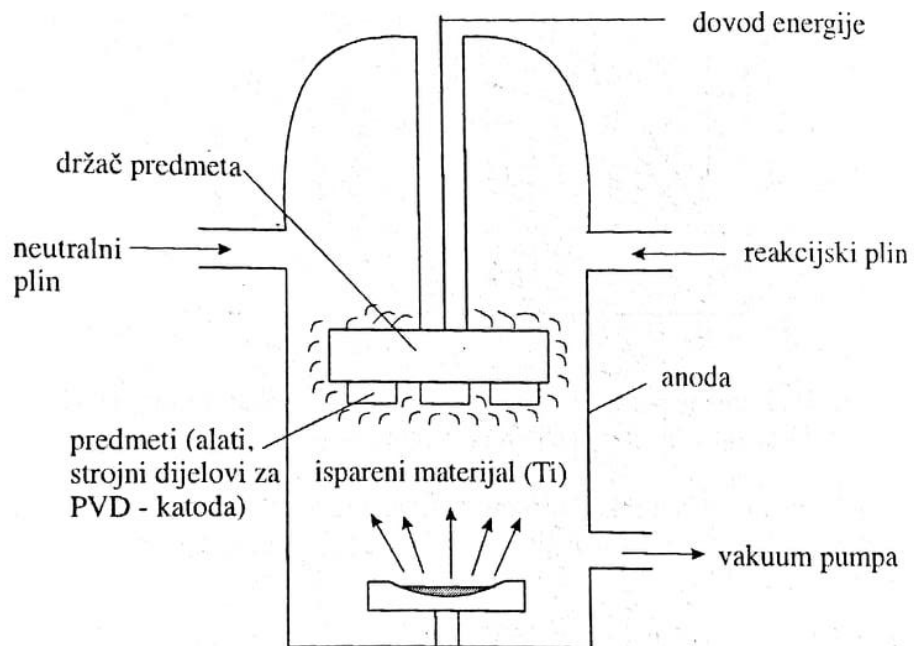
Kemijsko taloženje iz parne faze omogućuje postizanje slojeva karbida, nitrida ili karbonitrida, što ovisi o plinu koji se koristi. Najvažniji CVD postupci jesu oni kojima nastaju TiN i TiC zone spojeva. Debljina slojeva postignutih ovom metodom može biti od 10 μm do 30 μm . Ovaj postupak izvodi se na temperaturama između 800 $^{\circ}\text{C}$ i 1100 $^{\circ}\text{C}$. Plinovi ili pare raspadaju se na zagrijanoj površini u čvrstu tvar i hlapljive nusprodukte [50]. Ovaj postupak formira i zonu unutar same podloge i slojeve iznad nje. Za ovaj postupak prikladni su čelici: X155CrVMo12-1 (Č4850), X165CrMoV12-1 (Č4750), X210CrW12-1 (Č4650), X100CrMoV5-1 (Č4756), X38CrMoV5-1 (Č4751), X40CrMoV5-1 (Č4753),

X20Cr13 (Č4172) te X5CrNi18-9 (Č4580) [9]. Nakon CVD prevlačenja ove čelike potrebno je ponovno kaliti i popuštati ili koristiti prevlačenje PACVD postupkom. Osim nabrojanih čelika, postupkom CVD mogu se obraditi i neki drugi materijali kao što su Ni-legure, Co-legure, Steliti, Cu-legure, W-karbidi, itd. [3]. Primjena ovog postupka veoma je široka. Koristi se za deponiranje zaštitnih i tvrdih prevlaka koje pokazuju povećanu otpornost na trošenje, povećanu otpornost na visoku temperaturu i koroziju u poluvodičkoj industriji, fotoelektričnoj i optoelektričnoj opremi, za deponiranje metalnih filmova, za optička vlakna, u nuklearnoj tehnologiji, u biomedicini, itd. [15]. Prednosti korištenja ovog postupka su raznovrsne i mnogobrojne. Neke od njih su postizanje jednoličnih slojeva gotovo potpune čistoće, mogućnost stvaranja metastabilnih faza, jeftino predčišćenje, moguća kontrola morfologije površine, kristalne strukture, veličine zrna te orijentacije, mogućnost korištenja širokog spektra kemijskih prekursora te brojne druge [51, 52]. Naravno, postoje i neki nedostaci ovog postupka kao što su potrebna visoka temperatura, rizik kod korištenja korozivnih, toksičnih, eksplozivnih, zapaljivih i agresivnih prekursora, itd. [51]. Na Slici 6.5. prikazano je postrojenje za nanošenje prevlake CVD-postupkom.

6.6.2 Fizikalno taloženje iz parne faze (PVD)

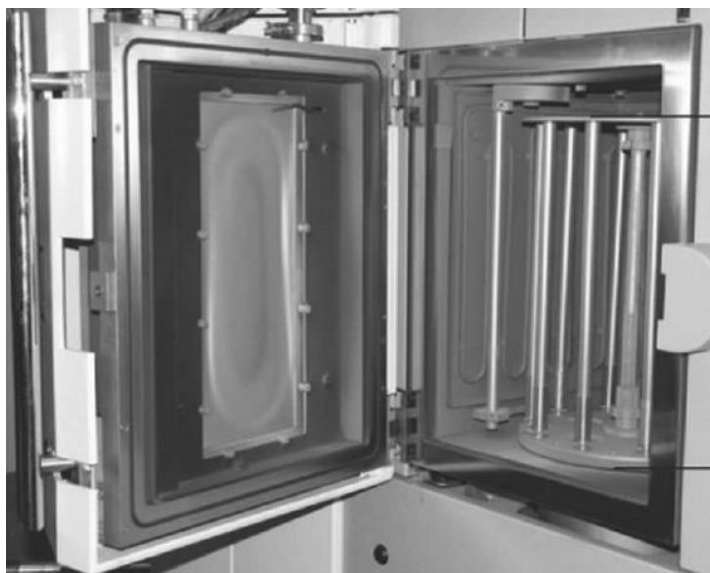
Fizikalno taloženje iz parne faze je postupak nanošenja prevlaka iz parne faze. Deponirani materijal prenosi se iz čvrstog stanja u parno stanje od izvora kroz vakuum ili plazmu na obrađivani materijal gdje dolazi do kondenzacije parnog stanja i formiranja tankog sloja [53]. Može se izvoditi ionskim platiranjem, naprašivanjem ili neparivanjem, a sve to se provodi u visokom vakuumu. Uglavnom se ionsko platiranje koristi kada se želi zaštititi površinu od trošenja, dok se postupci naprašivanja i neparivanja koriste u dekorativne svrhe. Postupci PVD provode se na temperaturama ispod 500 °C pa su za tu metodu prikladni svi čelici koji imaju temperaturu popuštanja iznad 500 °C [9]. Površine moraju imati oštre uglove, moraju biti bez pora i glatke, a elektroerodirane površine potrebno je ponovno popuštati ili brusiti. Dakle, prije samog postupka potrebno je obaviti predobradu. Kod ionskog PVD prevlačenja čišćenje se izvodi pomoću mlaza iona koji se nalaze u plemenitim plinovima [3]. U svim vrstama PVD postupka nanošenje prevlaka vrši se u visokom vakuumu (ispod 10^{-6} Pa). Također, nanošenje prevlaka u svim PVD postupcima možemo podijeliti u tri faze. Prva faza je prevođenje materijala koji se obrađuje iz čvrste faze u plinovitu fazu. Druga faza je prijenos molekula ili atoma materijala do osnovnog materijala kroz vakuum uz aktivaciju plina nositelja, reaktivnog plina ili materijala koji se prenosi. Zadnja faza je deponiranje ili

taloženje materijala u tanku prevlaku na materijal koji se obrađuje na kojem se odvijaju toplinsko kemijske reakcije tj. prelazi iz plinovitog stanja u čvrsto [15]. Na Slici 6.6 prikazan je shematski prikaz izvedbe PVD postupka.



Slika 6.6: Prikaz izvedbe PVD postupka [14]

PVD prevlake rade se s ciljem postizanja veće otpornosti na trošenje, kemijske postojanosti u agresivnim uvjetima, smanjenja koeficijenta trenja, povećanja toplinske otpornosti te poboljšanja izgleda proizvoda [15]. PVD postupcima do danas je trajnost alata i strojnih dijelova unaprijeđena do otprilike deset puta, ali njihova mana je što su primjenjivi samo za predmete manjih dimenzija (npr. matrice i žigove kalupa, dijelove malih kokila, malih strojeva, itd.) [14]. Na Slici 6.7 prikazan je uređaj za nanošenje PVD prevlaka.



Slika 6.7: Uređaj za nanošenje PVD prevlaka [50]

PVD postupci mogu se podijeliti na razne načine, a dvije glavne podijele su s obzirom na način naknadnog povećanja stupnja ionizacije i s obzirom na način isparavanja. Danas su najviše korišteni postupci napanavanja električnim lukom, elektronskim snopom te katodno napašivanje [15]. Materijal zaštićen TiN prevlakom PVD-postupkom prikazan je na Slici 6.8.



Slika 6.8: Materijal zaštićen TiN prevlakom PVD-postupkom [54]

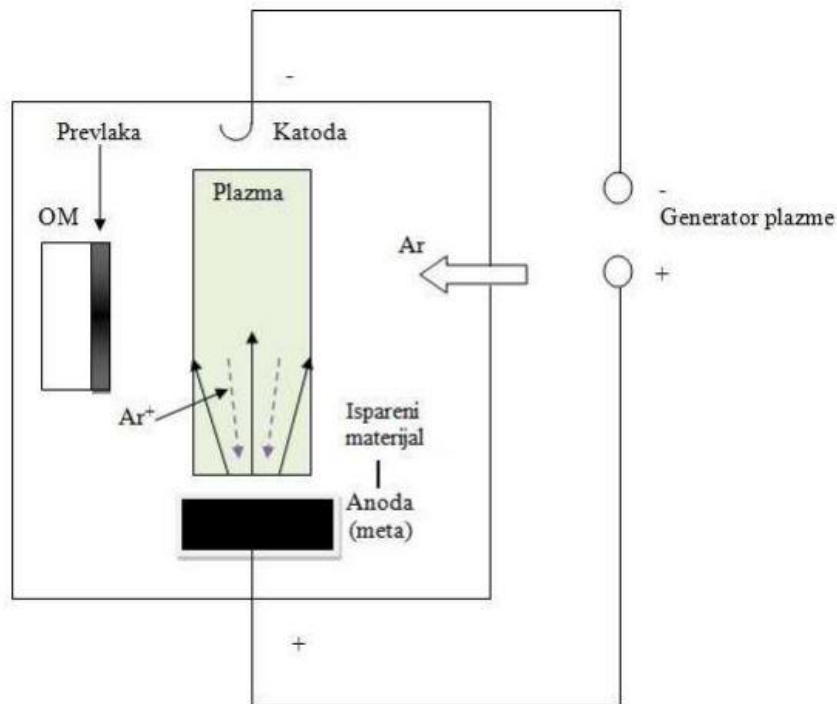
PVD-tehnika napanavanjem

PVD-postupak napanavanjem odvija se u tri faze: zagrijavanje osnovnog materijala, ionsko čišćenje i nanošenje tvrde prevlake. Zagrijavanje osnovnog materijala izvodi se tako da se držači osnovnog materijala gdje je potrebno nanošenje tvrde prevlake spoje na „+“ pol. Između anode i katode se uspostavlja plazmeni snop koji djeluje kao izvor elektrona i

zagrijava ga. Nakon zagrijavanja osnovnog materijala slijedi ionsko čišćenje prema kojem se osnovni materijal spaja na „-“ pol nakon čega dolazi do ubrzavanja Ar^+ iz plazme na osnovni materijal koji raspršuje nečistoće. Na samom kraju imamo nanošenje tvrde prevlake u kojem je anoda lončić u kojem se nalazi materijal za isparivanje na kojeg padaju elektroni iz plazme i prevode ga u parno stanje. Ispareni atomi se kondenziraju na osnovni materijal i po stjenkama posude u koju se uvodi reaktivni plin. Zbog bolje adhezije se nanosi tanki sloj metala u trajanju od nekoliko minuta te nakon toga slijedi reaktivno napanje. U postupku napanja materijal iz izvora se upari zagrijavanjem najčešće električnim lukom, električnim snopom, katodnim lukom i laserom do takve temperature da se postigne tlak 10^{-2} ili više hPa. Neki od nedostataka ovog procesa su otežana ili nemoguća priprema tankih slojeva nekih spojeva ili slitina, količina materijala u izvoru koji služi za uparivanje je ograničena, slaba adhezija, relativno mala energija uparenih atoma, itd. [15].

PVD-tehnika napanjem

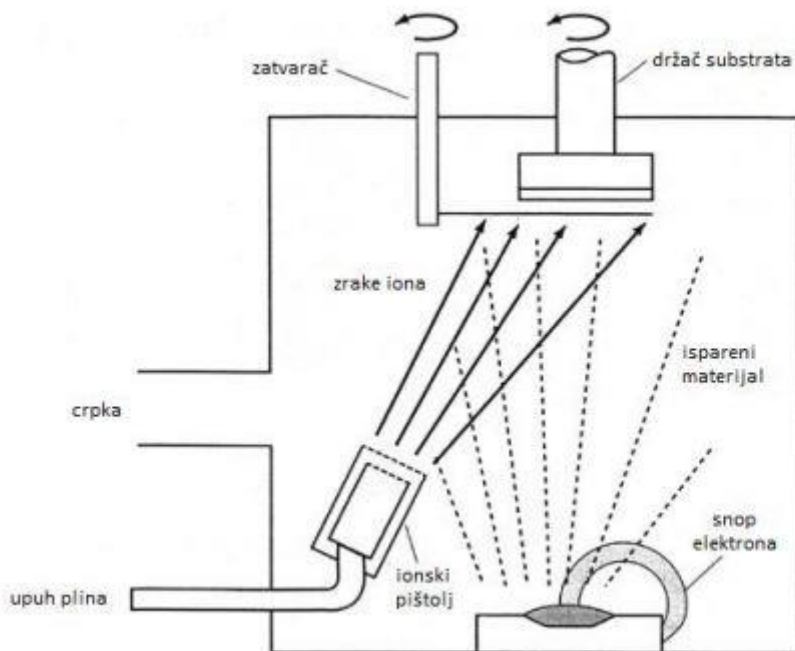
Napanje ili katodno napanje je netoplini način napanja tvari u kojem se materijal izvora bombardira visokoenergetskim ionima iz ionske puše ili plazme. Ioni argona koji su pozitivno nabijeni udaraju u anodu iz koje izbijaju raspršene atome koji se šire u svim smjerovima i putuju do obrađivanog materijala na kojem stvaraju prevlaku. Postupak se koristi kao najčešći način nanošenja tankih slojeva za gotovo bilo koju tvar (spojevi, slitine, dijalektrici, itd.). Najjednostavniji način napanja je diodni (Slika 6.9) koji uključuje korištenje dvije elektrode (anode i katode). U određenim okolnostima se između elektroda koje se nalaze u razrijeđenom plinu dobiva plazma. Električno polje ubrzava elektrone prema anodi i ione prema katodi. Elektroni koji izlaze iz katode su posljedica bombardiranja iona koji ioniziraju atome plina i podržavaju plazmu. Ioni iz plazme raspršuju katodu u kojoj se atomi iz izvora talože na osnovni materijal. Prednosti postupka napanja su mogućnost napanja svih vrsta materijala, relativno kratka udaljenost između izvora i osnovnog materijala, mogućnost napanja u reaktivnoj atmosferi, itd., a nedostaci su da je brzina nanošenja prevlake manja nego kod napanja, neke metode su posebno osjetljive na temperaturni gradijent, veći dio energije upadnih elektrona se pretvara u toplinu pa je nužno hlađenje, itd. [15].



Slika 6.9: Shematski prikaz diodnog naprašivanja [55]

Ionski postupak

Ionski postupak PVD (eng. Ion Plating) izvedba je u kojem se plazma pripremi u blizini osnovnog materijala, narine negativni napon te time ispareni i raspršeni atomi se dodatno ioniziraju i usmjere na osnovni materijal što poboljšava svojstva prevlake. Osim iona iz plazme mogu se koristiti ioni iz ionske puške koji se ugrade u sustav za nanošenje prevlake (IBAD postupak) (Slika 6.10). Prednosti ionskog prekrivanja su veća gustoća tankog sloja i veća pokrivenost površine osnovnog materijala, mogućnost mijenjanja svojstva slojeva bombardiranjem i pobuđivanja kemijske reakcije, otprašivanje neizreagiranih djelića s površine rastućeg brida, itd. [15].

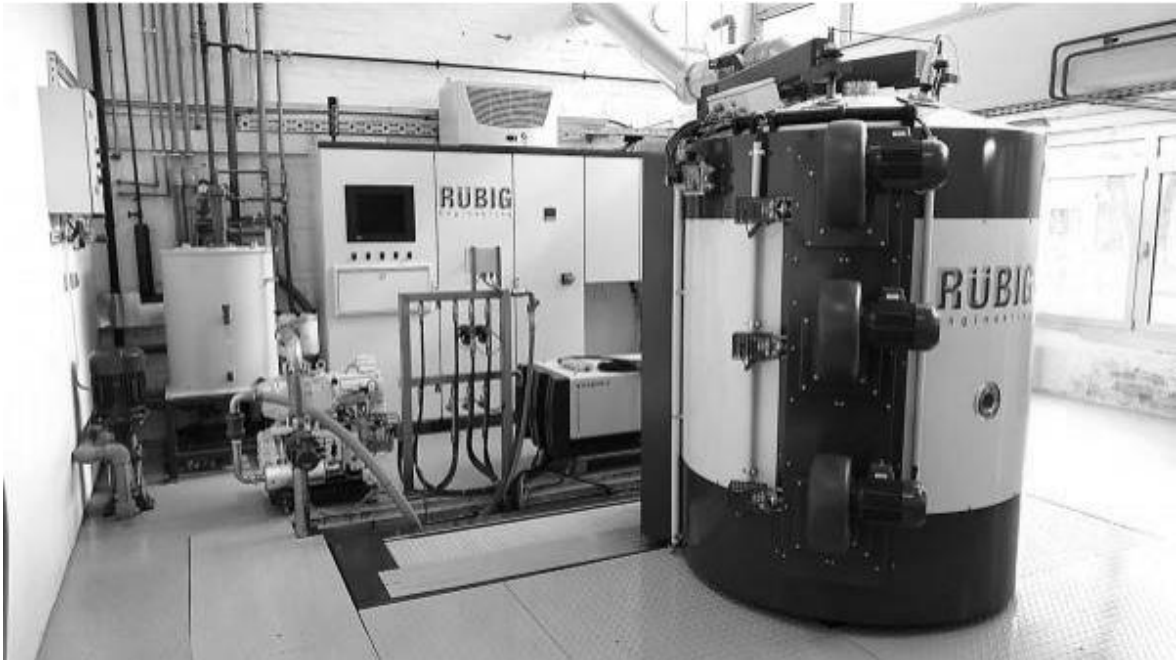


Slika 6.10: Shematski prikaz ionskog nanošenja prevlake [56]

6.6.3 Plazmom potpomognut CVD postupak (PA CVD)

Plazmom potpomognut CVD postupak je postupak prevlačenja obrađivanog materijala kemijskim djelovanjem u parnoj fazi u atmosferi ionizirane plazme. Plin u plazmatičnom stanju sadrži djelomično ili potpuno ionizirane čestice koje nastaju električnim pražnjenjem. Ono omogućuje sniženje temperature obrade u odnosu na CVD postupak, čime je riješen glavni nedostatak CVD postupka koji je visoka temperatura obrade. Uređaj za provođenje CVD postupka u plazmi sastoji se od vakuum-spremnika, vakuumpumpe, uređaja za miješanje plina, uređaja za čišćenje izlaznog plina te dobavljača energije [14]. Na Slici 6.11 prikazana je oprema za izvođenje PACVD postupka koja se nalazi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Navedena oprema sastoji se od elektrootporne zagrijane retorne peći, reakcijske komore, sustava za stabilizaciju i mjerenje temperature unutarnjeg kontrolnog sustava, sustava za kontrolu plina, vakuurnog sustava, mjerne jedinice za kontrolu nastalog sloja, osnovnog materijala i napajanja napona [51]. Plinovi i pare dovode se u peć u kojoj su smješteni predmeti za obradu. Plazma (omotač ioniziranih plinova) potiče njihov raspad i kristalizaciju. Kod obrade složenih oblika nije potrebna rotacija predmeta unutar reaktora. Ovaj postupak koristi se u svrhu poboljšanja tvrdoće, otpornosti na visoke temperature, trošenje i koroziju, itd. [3]. Primjenjuje se za nanošenje raznih slojeva koji se otežano postižu običnim CVD ili PVD postupcima (izrada dijamantskog filma, nitridne

prevlake, prevlake slične dijamantu, itd.). Neki nedostaci ovog procesa su cijena postupka i nemogućnost uvijek dobivanja čistog zaštitnog sloja [14].



Slika 6.11: Prikaz opreme za PACVD postupak [15]

Prevlake dobivene ovim postupkom koje se najviše koriste su DLC (eng. „Diamant Like Carbon“), TiBN (titanijev bor-nitrid), TiN (titanijev nitrid) i TiCN (titanijev karbo-nitrid) [14]. Tvrtka Rubig nudi izvedbu navedenih prevlaka pod komercijalnim imenima DLC Xtended®, DL coat (DLC) PLASTIT®, Gold LF PLASTIT® (TiN), Carbon LF PLASTIT® (TiCN) i BORON Nanocomp PLASTIT® (TiBN) [57].

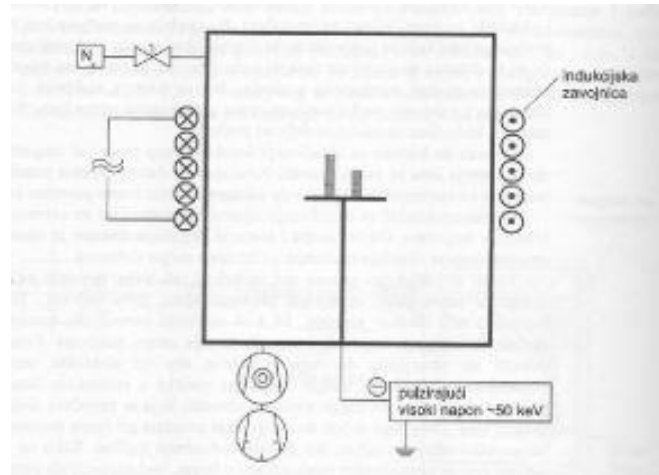
7. GRANIČNE VRSTE POSTUPAKA

Granične vrste postupaka ne pripadaju niti metodama modificiranja niti metodama prevlačenja jer sadrže elemente procesa koji su karakteristični za obje navedene skupine.

7.1 Implantacija iona

Za razliku od prethodno opisanih toplinsko-kemijskih procesa u koje spadaju martenzitni slojevi i površinski slojevi promijenjenog kemijskog sastava kod implantacije iona se radi o neuravnoteženom procesu. To je visokovakumski proces u kojem se kemijski elementi ioniziraju u ionskom izvoru pa iz njega ekstrahiraju, ubrzavaju na visoke energije (10 keV do 300 keV) i u konačnici skreću na površinu koja se obrađuje. Nakon što prodru u površinsku zonu, brzo gube energiju te ostaju zarobljeni u zoni obrađivane površine. U grupu implantacije iona spadaju mješavine ionskog zračenja, slojevi čije je nanošenje potpomognuto snopom iona i implantacija iona plazmatskim izvorima. Najviše se koristi u području zaštite od korozije gdje se primjenjuje krom ili ioni plemenitih metala (zlato, paladij i platina) te se jako dobro pokazala kod kalupa za lijevanje plastike. Prva industrijska primjena je bila kod implantacije dušikovih iona u kugle umjetnog zgloba kuka koji se inače izrađuje od titanijevih legura [19].

Implatiranje iona pomoću plazmatskih izvora je postupak koji se primjenjuje u posljednjih nekoliko godina s ciljem razvoja da bude ekonomičniji. Na električni izolirani supstrat koji se nalazi u komori stavlja se negativni pulsirajući visoki napon do 50 kV u vakuumskom postrojenju u atmosferi dušika gdje se pali plazma (Slika 6.12). Pozitivno nabijeni ioni dušika ubrzavaju prema supstratu u kojem ga sa svih strana napadaju [19].



Slika 7.1: Uređaj za implatiranje iona iz plazmatskih izvora [58]

Miješanje snopa elektrona je dvostupanjska kombinacija u kojem se preko PVD postupka taloži tanki sloj te nakon toga slijedi implantiranje iona inertnim plinom. Za provođenje postupka je potrebno postrojenje koje sadrži PVD taloženje i implatiranje iona. Ovom obradom se dobiva tanki sloj u granicama između 100 nm i 200 nm koji ima jako dobro prijanjanje uz osnovni materijal [19].

Prevlačenje potpomognuto snopom iona je postupak u kojem su neparivanje iona i sami udari iona istovremeni pa su zbog toga vrlo slični plazmom potpomognutim PVD postupcima. Udaranjem iona osim dobre čvrstoće prijanjanja se dobiva i sloj vrlo kompaktne morfologije. Za izvođenje postupka je potrebno postrojenje koje sadrži visoki vakuum u kojem se nalaze uređaji za neparivanje i izvor iona [19].

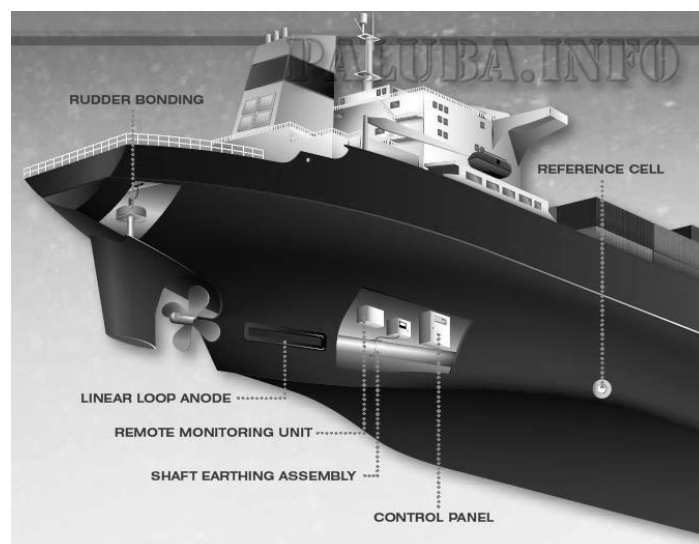
8. PRIMJENE U MEHATRONICI

Primjena modificiranja i prevlačenja površina vrlo je rasprostranjena. Primjenjuje se u području strojarstva, građevinarstva, tekstilne industrije, brodogradnje, automobilske industrije, itd. U ovom radu opisana je primjena elektrokemijske zaštite metala od korozije prevlakama, galvansko cinčanje, dekorativno kromiranje, DLC Xtended® prevlaka PACVD postupkom, indukcijско kaljenje zupčanika i ostali primjeri inženjerstva površina. Ovi primjeri značajno pridonose zaštiti površina u različitim industrijama.

8.1 Elektrokemijska zaštita metala od korozije prevlakama

Elektrokemijska zaštita metala najčešća je metoda zaštite za predmete izložene agresivnoj okolini, kao što su npr. morski uvjeti. Postoje dva načina zaštite koja se u praksi najviše koriste, a to su katodna i anodna. Osim utjecaja na kvalitetu materijala, korozija predstavlja i financijski problem. Metode zaštite svake se godine dodatno usavršavaju, ali ipak od svih metoda elektrokemijska zaštita ističe se kao najbolja. Taj postupak zaštite koristi se na dijelova kormila i trupa broda postavljenim protektorima uz primjenu istosmjerne struje [59] (Slika 8.1).

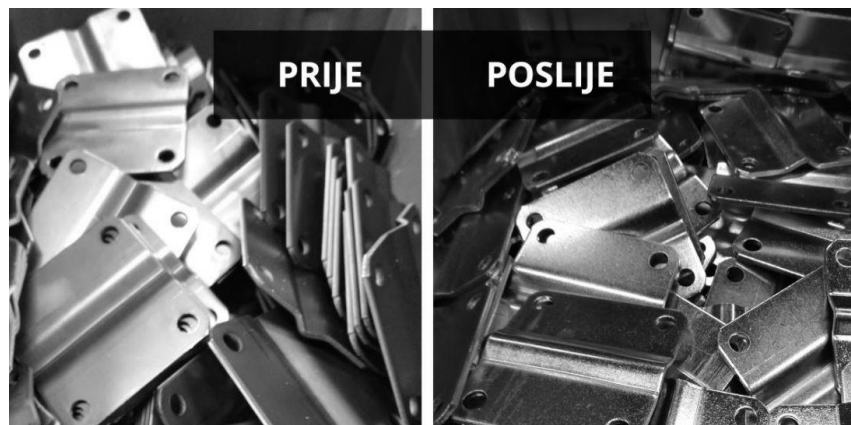
U elektrokemijskom nanošenju metalnih prevlaka koristi se galvanotehnika. To je postupak kojim se katodnom redukcijom metalnih iona nanose metalne prevlake. Prednosti ovog postupka su mogućnost nanošenja raznovrsnih metalnih prevlaka, čvrsto prianjanje na podlogu, jednostavna regulacija debljine sloja, niske temperature obrade i visoka čvrstoća [60].



Slika 8.1: Zaštita trupa broda od korozije [61]

8.2 Galvansko cinčanje

Galvansko cinčanje je jedan od procesa galvanizacije. Prednosti ovog procesa su dobra postojanost, niska potrošnja i gubici cinka, veliki postotak cinka u prevlaci te dobra mehanička svojstva prevlake (kao što su prionjivost i elastičnost). Važnu ulogu pronašlo je u industrijskoj kontinuiranoj površinskoj obradi čeličnih žica i traka jer omogućuje stvaranje prevlaka jednolične debljine i zato što ne nastaju krhki spojevi cinka i željeza [15]. Jedna tvrtka na području Koprivničko-križevačke županije koja nudi usluge pocinčavanja je Galvanizacija ZGR Kovačić. Za cinčanje koriste slabo kiseli kloridni elektrolit kojim je moguće pocinčavati predmete od nisko legiranih konstrukcijskih čelika, legiranih čelika, sivog lijeva, bakra i bakrenih legura. Koriste dvije metoda cinčanja: cinčanje na nosačima i cinčanje u bubnjevima [62]. Završni produkt pocinčavanja prikazan je na Slici 8.2 desno.



Slika 8.2: Usporedba predmeta prije i nakon pocinčavanja [62]

8.3 Dekorativno kromiranje

Još jedan postupak od postupaka galvanizacije je kromiranje. Ono može biti tvrdo i dekorativno. Dekorativnim kromiranjem obično se nanose prevlake na prevlake bakra, cinka, nikla i mjedi. Vršiti se s ciljem postizanja zaštite od korozije te ljepšeg izgleda [15]. Usluge dekorativnog kromiranja također vrši tvrtka Galvanizacija ZGR Kovačić. Na prevlaku sjajnog nikla talože sloj dekorativnog kroma debljine 0,3 do 0,5 μm , što predmetu daje plavičasti sjaj kroma. Površina koja je namijenjena kromiranju mora biti glatka i sjajna. Dekorativni krom služi za zaštitu sjajnog nikla od atmosferske korozije i daje prevlaci izgled visokog sjaja [63]. Na Slici 8.3 i Slici 8.4 prikazani su primjeri dekorativnog kromiranja.



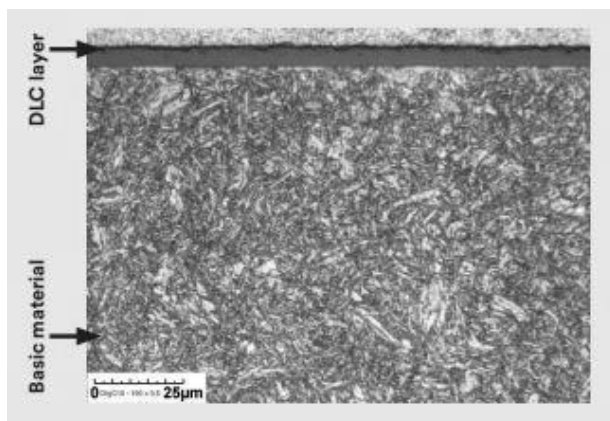
Slika 8.3: Primjer dekorativnog kromiranja (kvaka za vrata) [64]



Slika 8.4: Primjer dekorativnog kromiranja (rešetka za roštilj) [64]

8.4 DLC Xtended® prevlaka PACVD postupkom

DLC Xtended® je sustav koji se sastoji od tvrdog sloja (Slika 8.5) a-C:H:Si (amorfni sloj natopljen silicijem i ugljikom) poznatijeg kao DLC (ugljik poput dijamanta). Takav tvrdi sloj služi za povećanje zaštite od trošenja komponenti koje su izrađene od čeličnih materijala s optimalnom otpornošću na koroziju. Kombinacijom mikroimpulsnog nitriranja plazme i tvrdog premaza moguće je postići površinsku tvrdoću u vrijednosti do 1500 HV (Vickers) s minimalnim koeficijentom trenja. Ovaj postupak je trenutno jedinstven na tržištu jer nudi mogućnost obrade velikih i složenih komponenata u jednom procesu. Ima dobra tribološka svojstva (trošenje obrađenih komponenti je minimalizirano), onečišćenja poput ulja, maziva, prašine i organskih ostataka mogu se lako ukloniti, izvrsna otpornost na koroziju, itd. [57].



Slika 8.5: Primjer DLC Xtended® prevlake [57]

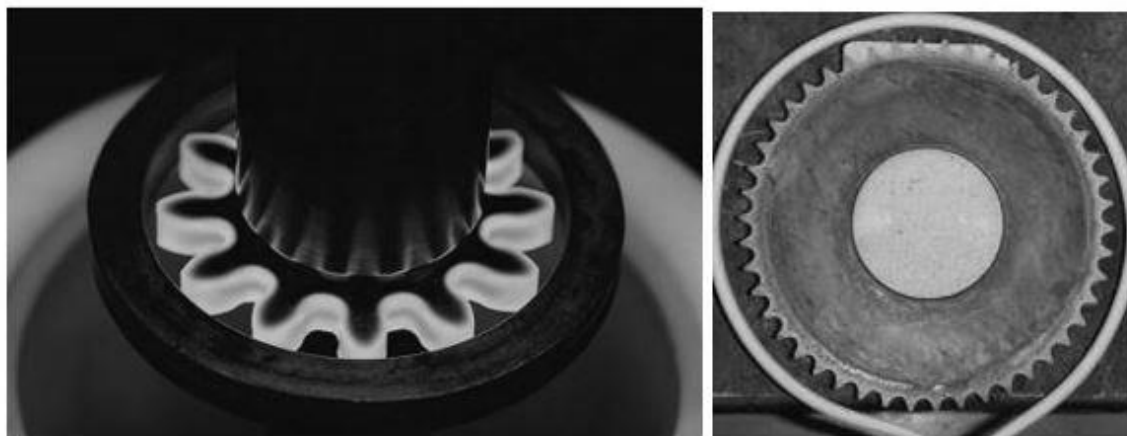


Slika 8.6: Primjeri predmeta na koje je nanosena DLC prevlaka [65]

Na Slici 8.6 prikazani su primjeri na koje je nanosena DLC prevlaka.

8.5 Indukcijsko kaljenje zupčanika

Najčešće primijenjeni postupak za površinsko zagrijavanje zubi zupčanika (Slika 8.7) je indukcijsko kaljenje. Predmet kojeg želimo zakaliti stavljamo u svitak koji proizvodi izmjenično magnetsko polje koje inducira struju iste frekvencije kao što je u predmetu. Predmet se zagrijava zbog otpora koju struja pruža prilikom prolaska. Struja visoke frekvencije služi kada želimo zagrijati površinski sloj zupčanika odnosno ako želimo toplinsku obradu u površinskom sloju. Nakon što obavimo zagrijavanje, zupčanike hladimo u nekim od sredstva za kaljenje [11].



Slika 8.7: Primjeri indukcijskog kaljenja i zagrijavanja zupčanika [6]

8.6 Ostali primjeri inženjerstva površina

Plameno kaljenje veliku primjenu pronalazi u strojogradnji te industriji motora u obradi dijelova kao što su poluge, svornjaci, zupčanici, osovine, pribornice spojki, itd. [15]. Na Slici 8.8 prikazan je primjer plamenog kaljenja zupčanika.



Slika 8.8: Plameno kaljenje zupčanika [66]

Površinsko kaljenje laserom koristi se u industriji papira, automobilske industriji, svemirskoj tehnologiji, itd. Npr. u automobilske industriji kale se dijelovi dizel motora (prsteni, klipovi, itd.) [15]. Na Slici 8.9 prikazani su primjeri kaljeni laserom.



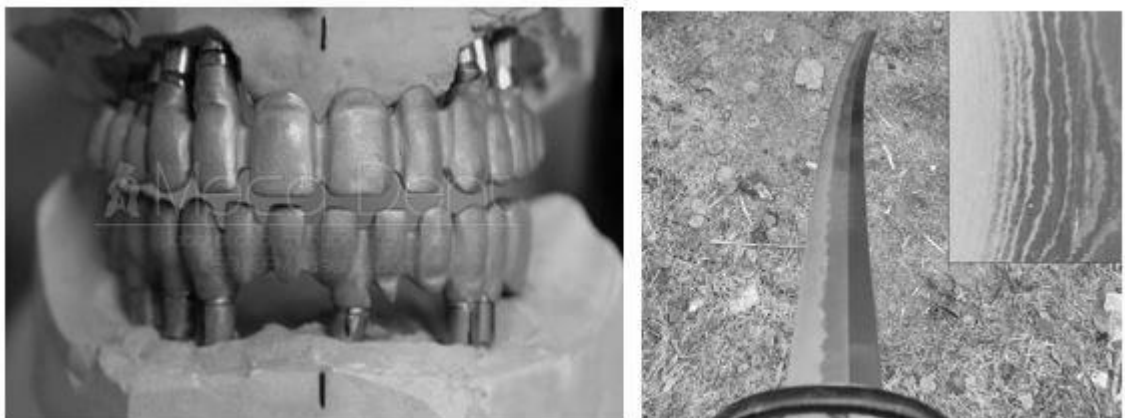
Slika 8.9: Primjer dijelova kaljenih laserom [67]

Pjeskarenje se koristi u obradi obojenih metala čelika, lijevanih željeza, tvrdih metala, slitina obojenih metala, itd. [15]. Na Slici 8.10 su prikazani primjeri pjeskarenja metalnih dijelova radijatora i ograde.



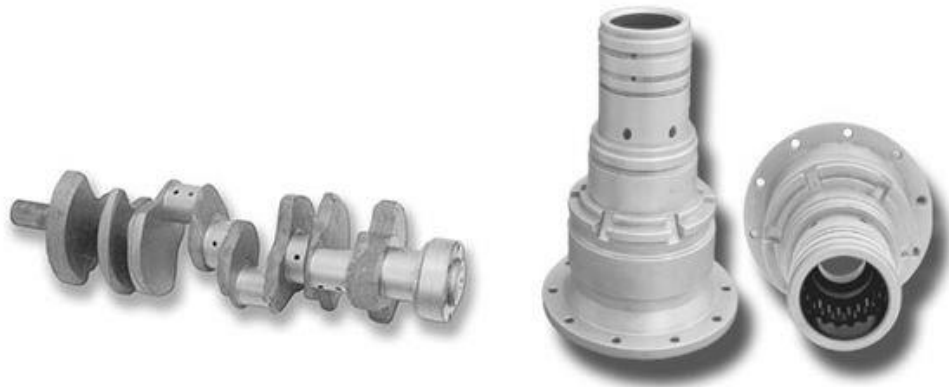
Slika 8.10: Pjeskarenje metalnih dijelova radijatora i ograde [68]

Postupak pougljičavanja koristi se za avionsku i drugu industriju za obradu različite opreme, valjaka, zupčanika, kotača, itd. [15]. Na Slici 8.11 prikazan je pougljičeni sloj zubnog implantata i sablje mača.



Slika 8.11: Pougljičeni sloj zubnog implantata i sablje mača [69, 70]

Postupak nitriranja ima vrlo široku primjenu u tekstilnoj industriji, automobilskoj industriji (koljenaste i druge osovine), u obradi dijelova poljoprivrednih strojeva, zupčanika, vodilica, itd. [15]. Na Slici 8.12 prikazana je nitrirana koljenasta osovina i obična osovina, a na Slici 8.13 prikazani su nitrirani injektori goriva.

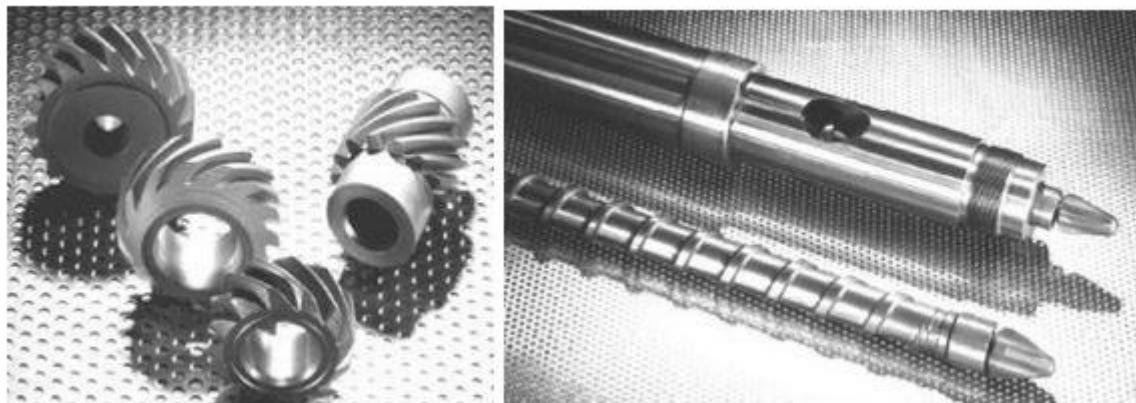


Slika 8.12: Primjer nitrirane koljenaste osovine i osovine [71]



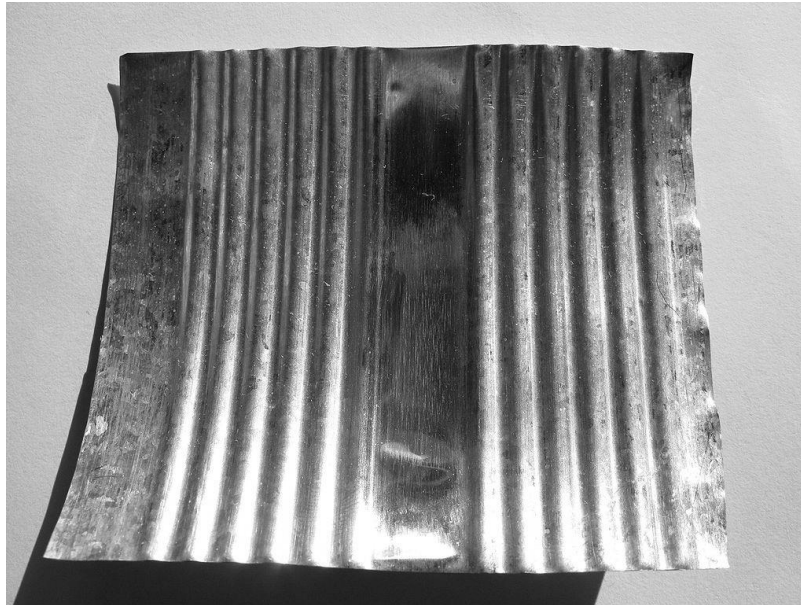
Slika 8.13: Primjer nitriranih injektora za gorivo [71]

Postupci boriranja primjenjuju se kod alata u području rudarstva, prehrambene industrije, automobilske industrije (lamele spojnice), tekstilne industrije (vodilice konca), građevinskih strojeva za bušenje, matrica za provlačenje žice, itd. [15].



Slika 8.14: Borirani dijelovi automobila i vijaka za ekstrudiranje [72]

Platiranje se najčešće koristi u termoenergetici, nuklearnoj tehnici, građevinarstvu, elektrotehnici, itd. Običnim platiranjem najčešće se prevlače neki poluproizvodi kao što su lim, folije, cijevi, žice, itd. [15]. Na Slici 8.15 prikazan je platirani lim koji se koristi za limenke konzervirane hrane.



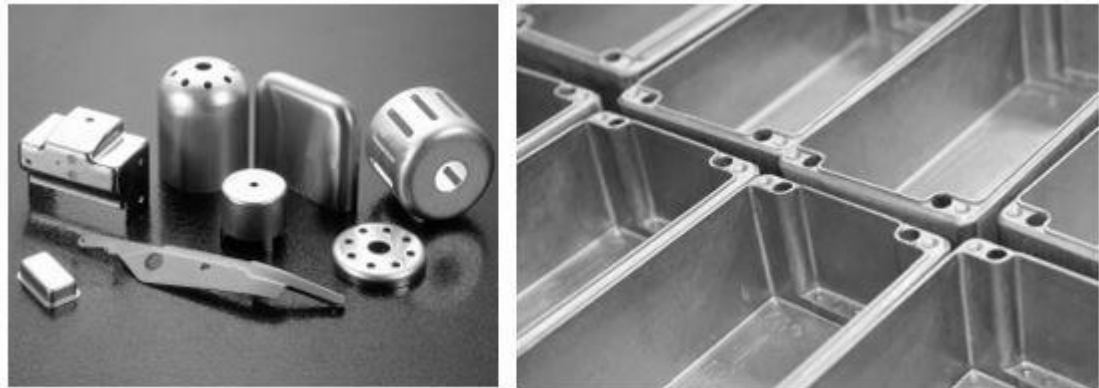
Slika 8.15: Primjer platiranog lima za limenke konzervirane hrane [73]

Postupci naštrcavanja imaju primjenu u oplemenjivanju proizvoda, ali i u reparaturi. Koristi se za reparature potisnih ploča lamelnih spojki transportnih i tračničkih vozila, za reparature raznih osovina te dijelova u petrokemijskoj, tekstilnoj, prehrambenoj i procesnoj industriji [40]. Na Slici 8.16 prikazani su dijelovi obrađeni naštrcavanjem.



Slika 8.16: Primjeri dijelova obrađenih naštrcavanjem [74]

Kromatiranje se koristi za obradu proizvoda koji se koriste u uvjetima visoke vlažnosti i morskim uvjetima [15]. Na Slici 8.17 prikazani su primjeri kromatiranja aluminija.



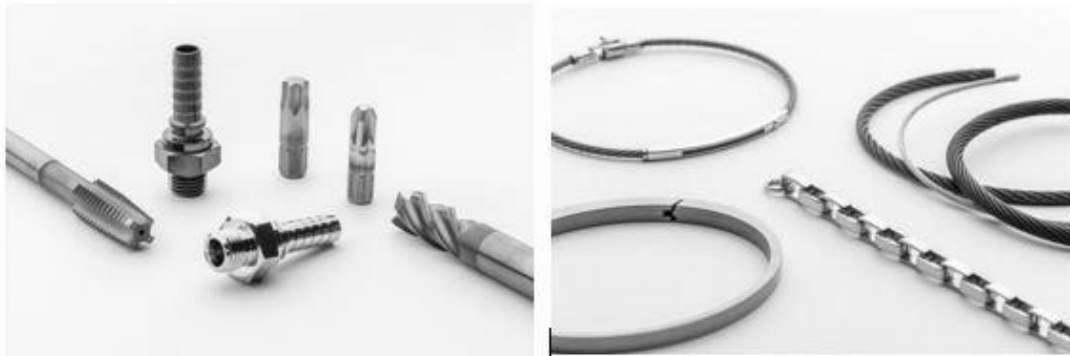
Slika 8.17: Primjeri kromatiranja aluminija [75]

CVD prevlake primjenjuju se u izradi senzora, katalizatora, integriranih krugova, mikrouređaja, opreme za optičku elektroniku te u zaštiti reznih alata i kugličnih ležajeva [15]. Slika 8.18 prikazuje predmete prevučene CVD prevlakama.



Slika 8.18: Primjeri CVD prevlaka [76]

PVD postupci imaju veoma široku primjenu. Koriste se u industriji papira (glodala, noževi), zlatarskoj industriji (pile, kalupi), automobilske, tekstilnoj (igle, vodilice), strojarskoj, drvnoj (profilni alati), kemijskoj industriji, industriji satova (Slika 8.20), medicini (kirurški alati), kao dekorativne prevlake (Slika 8.19), itd. [15].



Slika 8.19: Primjeri dekorativne i strojarske PVD prevlake [77]



Slika 8.20: Sat prevučen PVD prevlakom [78]

9. ZAKLJUČAK

Postupci modificiranja i prevlačenja površina od iznimnog su značaja u suvremenoj industriji, ali i u drugom širokom spektru djelatnosti. S obzirom na prednosti koje nude takvi postupci i danas su predmet intenzivnog istraživanja i unaprjeđenja. Omogućuju obradom jeftinijih materijala postizanje svojstva kakva posjeduju skupocjeni materijali, a što je još bitnije, postizanje kombinacija željenih svojstava. U radu je prikazan opis trenutnih postupaka prevlačenja i modificiranja površina koji imaju primjenu u svim granama industrije. Postupci modificiranja površinskih slojeva materijala izvode se primjenom vanjskog djelovanja koje se može svrstati u mehaničko, toplinsko i toplinsko-kemijsko. Prevlačenje površina se temelji na mehanizmu koji može biti kemijski, mehanički, toplinski i njihova kombinacija, a od postupaka modificiranja razlikuje se u površinskom sloju koji se formira iznad polazne površine. Postoje i postupci koji kombiniraju elemente modificiranja i prevlačenja te stoga formiraju zasebnu skupinu graničnih postupaka. Na kraju, navedeni su primjeri primjene nekih od navedenih postupaka kao što su elektrokemijska zaštita od korozije prevlakama, galvansko cinčanje, dekorativno kromiranje, DLC Xtended® prevlaka PACVD postupkom, indukcijско kaljenje zupčanika i ostali primjeri inženjerstva površina.

10. LITERATURA

- [1] Matijević B., Stupnišek M. Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja metala. Zbornik radova znanstveno stručnog skupa s međunarodnim učešćem, Zagreb; 2000.
- [2] Kovačićek F., Španiček Đ. Materijali osnove znanosti o materijalima. Zagreb: FSB; 2000.
- [3] Golubić S. Tehnički materijali, 1. dio, Metalni materijali. 2019. Bjelovar: Daruvarska tiskara d.d. Daruvar; 2019.
- [4] Gabrić I., Šitić S. Materijali 1. Split; 2012.
- [5] Landek D. Materijali i proizvodni postupci. Zagreb: Tehničko veleučilište u Zagrebu; 2012.
- [6] Slade I. Obrada materijala 2; 2018.
- [7] Stupnišek M., Cajner F. Osnove toplinske obrade metala. Zagreb: FSB; 2001.
- [8] Punto Mariner. Toplinska obrada čelika. Vrste toplinske obrade metala [Online]. Dostupno na : <https://hr.puntomarinero.com/heat-treatment-of-steel-types/>. (01.10.2020.)
- [9] Grupa autora. Inženjerski priručnik IP4. Proizvodno strojarstvo. Prvi svezak. Materijali. Zagreb: Školska knjiga; 1998.
- [10] Cajner F., Filetin T., Grilec K., Marić G., Haramina T. Materijali 2. Zavod za materijale. Zagreb: FSB.
- [11] Gabrić I., Šitić S. Materijali 2. Split; 2015.
- [12] Deželić R. Metali, Split: Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje; 1988.
- [13] Krumes D. Toplinska obradba. SFSB. Slavonski Brod; 2000.
- [14] Krumes D. Površinske toplinske obrade i inženjerstvo površina. Slavonski Brod; 2004.
- [15] Gojić M. Površinska obradba materijala. Sisak: Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2010.
- [16] Stupnišek M. Plameno površinsko kaljenje kliznih staza od sivog lijeva u gradnji alatnih strojeva. Strojstvo 13; 1971. 1-4, 27-33.
- [17] Benkowsky G. Induktionserwärmung. VEB Verlag Technik. Berlin; 1980.
- [18] Lasers in Surface Engineering. ASM International. Materials Park; 1998.
- [19] Filetin T., Grilec K. Postupci modificiranja i prevlačenja površina. Zagreb.
- [20] Jutarnji. Ovaj 20 godišnjak njeguje stari zanat, ne podnosi računala, a najdraži alat su mu ruke [online]. Dostupno na: <https://novac.jutarnji.hr/karijere/ovaj-20-godisnjak-njeguje-stari-zanat-ne-podnosi-racunala-a-najdrazi-alat-su-mu-ruke/10035346/>. (02.10.2020.)

- [21] Corda-orodjarna. Lasersko kaljenje [Online]. Dostupno na: <http://corda-orodjarna.si/lasersko-kaljenje/>. (02.10.2020.)
- [22] TII I PT -TOPLINSKA OBRADA [Online]. Dostupno na: https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/04_05_2017__26984_TII_i_PT_-TOPLINSKA_OBRADA_pred_1.pdf. (05.10.2020.)
- [23] N. N. Shot Peening Applications, Metal Improvement Co., 7th Edition, New Jersey.
- [24] Naidu N. K. R., Raman S. G. S. Effect of shot blasting on plain fatigue and fretting behaviour of Al-Mg-Si alloy AA6061. *International Journal of Fatigue* 27 (2005) 323-331.
- [25] Time machine. Pjeskarenje metala [online]. Dostupno na: <https://www.timemachine.hr/services/pjeskarenje-metala/>. (02.10.2020.)
- [26] Eckstein H. J. Technologie der Wärmebehandlung von Stahl, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig; 1977.
- [27] Stupnišek M., Virag Z. Novi matematički model plinskog pougljičavanja čelika. Zbornik radova. FSB; 1982. str. 85-99.
- [28] Dostupno na: <http://www.mfkg.kg.ac.rs>. (05.10.2020.)
- [29] Liščić B., Stupnišek M., Cajner F., Filetin T. Toplinska obradba-Praktikum. Zagreb: FSB; 1991.
- [30] Nitrex. Nitriding-nitrocarburizing applications [online]. Dostupno na: <https://www.nitrex.com/nitriding-applications-materials/nitriding-nitrocarburizingapplications/>. (02.10.2020.)
- [31] Mühler H. Eindiffusion von Fremdelementen in Eisenwerkstoffe. *HTM* 28(1973)4, 247- 259. i *HTM* 29(1974)3. str. 143-159.
- [32] Arai T. Carbide Coating Process by Use of Molten Borax Bath in Japan. *J. Heat Treatment* 18; 1979. 2. str. 15-22.
- [33] Golubić S. Primjena triboloških prevlaka na dijelovima vijčanih pumpi. Magistarski rad. Zagreb: FSB; 2004.
- [34] Hindawi [online]. Dostupno na: <https://www.hindawi.com/journals/ijc/2012/162425/>. (02.10.2020.)
- [35] Brown A. Weld overlay cladding-the solution to pump corrosion. *Weld Pimps* 10; 2005. str. 50-53.
- [36] Cheng F. T., Lo K. H., Man H.C. NiTi cladding on stainless steel by TIG surface process, part II-corrosion behaviour. *Surface and Technology* 172; 2003. str. 316-321.
- [37] Mousavi S. A. A. A., Barrelet L. M., S- Al-Hassani S.T. Explosive weilding of metal plates. *Journal of Materials Processing Technology* 202; 2008. str. 1224-239.

- [38] Treatrade [online]. Dostupno na: www.treatrade.hr. (02.10.2020.)
- [39] Gojić M. Tehnike spajanja i razdvajanja materijala- II. Nepromijenjeno izdanje. Sisak: Metalurški fakultet Sisak; 2008.
- [40] Kožuh Z., Glogović Z. Umjetna inteligencija u području toplinskog naštrcavanja. Zavarivanje 52; 2009. str. 19-30.
- [41] Watson S. A. Electroless Nickel Coatings, Nickel Development Institute, Technical Series No 10055; 1989.
- [42] Esih I., Dugi Z. Tehnologija zaštite od korozije, Zagreb: Školska knjiga; 1990.
- [43] Surtec eurosjaj. Fosfatiranje [online]. Dostupno na: <https://www.surtec-eurosaj.com/bs/article/39/fosfatiranje>. (02.10.2020.)
- [44] Cemat [online]. Dostupno na: <http://www.cemat.com>. (03.10.2020.)
- [45] Esih I., Dugi Z. Tehnologija zaštite od korozije. Zagreb: Školska knjiga; 1990.
- [46] Burakovsky T., Wierzchon T. Surface Engineering of Metals. Washington DC: CRC Press; 1998
- [47] Choy K. L. Chemical vapour deposition of coatings. Progress in Materials Science 48; 2003. str. 57-170.
- [48] Vahlas C., Caussat B.G., Serp P., Angelopoulos G. N. Principles and applications of CVD power technology. Materials Science and Engineering R, 53; 2006. str. 1-72.
- [49] Stamenković Lj. Hemijska depozicija prevlaka iz parne faze. Zaštita materijala 48; 2007. 2. str. 25-48.
- [50] Landek D., Postupci modificiranja površina (podloge za vježbu), Zagreb: FSB; 2012.
- [51] Sinha A. K. Physical Metallurgy Handbook, McGraw-Hill. London; 2003.
- [52] Čikara D. D., Raić K. T. Nanošenje tankih filmova CVD postupcima. Metalurgija- Journal of Metallurgy. str. 329-342.
- [53] Stewart S., Ahmed R. Rolling contact fatigue of surface coatings-a review. Wear 253; 2002. str. 1132-1144.
- [54] Wikipedia. Titanijev nitrid [online]. Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Titanijev_nitrid. (03.10.2020.)
- [55] Panjan P., Čekunda M. Zaštita orodij s trdimi PVD-prevlekami. Institut Jožef Stefan; 2005.
- [56] Raidenbach, F. „ASM Handbook, Volume 5, Surface Engineering”, ASM International. Metals Park. SAD: Ohio; 1994.
- [57] Rubig. Heat treatment [online]. Dostupno na: <https://www.rubig.com/en/heat-treatment/hard-coating-plastitr/#c6925>. (05.10.2020.)

- [58] Kunst H. Verschleißschutz – Ein Ratgeber für die Anwendung erschleißhemmender Schichten. Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik (AWT). Wiesbaden; 1997.
- [59] Laser-ing. Elektrokemijska zaštita metala [online]. Dostupno na: <http://www.laser-ing.hr/blog/elektrokemijska-zastita-metala/>. (03.10.2020.)
- [60] Juraga I., Alar V., Šimunović V., Stojanović I. Korozija i metode zaštite od korozije.
- [61] Paluba [online]. Dostupno na: <http://www.paluba.info/smf/index.php?topic=9767.0>. (03.10.2020.)
- [62] Galvanizacija. Cinčanje [online]. Dostupno na: <http://galvanizacija.com/cincanje/>. (03.10.2020.)
- [63] Galvanizacija. Kromiranje [online]. Dostupno na: <http://galvanizacija.com/kromiranje/>. (03.10.2020.)
- [64] Chrom. Galvanizacija [online]. Dostupno na: <http://www.chrom.hr/galvanizacija/>. (03.10.2020.)
- [65] Sumicarbide. DLC coating offers a competitive edge for machining aluminium [online]. Dostupno na: <https://sumicarbide.com/dlc-coating-offers-a-competitive-edge-for-machining-aluminum/>. (05.10.2020.)
- [66] Imenik.rs [online]. Dostupno na: <https://imenik.rs/bas-celik-1-ada>. (08.10.2020.)
- [67] Corda-orodjarna. Lasersko kaljenje [online]. Dostupno na: <http://corda-orodjarna.si/lasersko-kaljenje/>. (08.10.2020.)
- [68] Pjeskarenje [online]. Dostupno na: https://pjeskarenje.hr/izlozeni_proizvodi/popularni_proizvodi/707/stroj_za_pjeskarenje_jaf_e_10/. (08.10.2020.)
- [69] Mecadent. Krune i mostovi na cementiranje [online]. Dostupno na: <http://www.mecadent.co.rs/krune-i-mostovi-na-cementiranje.php>. (08.10.2020.)
- [70] Wikipedia. Cementiranje [online]. Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Cementiranje_%C4%8Delika. (08.10.2020.)
- [71] Nitrexheattreat. Nitriding application materials [online]. Dostupno na: <https://www.nitrexheattreat.com/nitriding-applications-materials/applications/>. (08.10.2020.)
- [72] Horgas V. Termodifuzijski postupci boriranja čelika-Završni rad. Zagreb; 2015.
- [73] Wikiwand. Elektroplatiranje [online]. Dostupno na: <https://www.wikiwand.com/hr/Elektroplatiranje>. (08.10.2020.)

- [74] Titan Sisak. Plameno naštrcavanje [online]. Dostupno na: <https://www.titansisak.hr/PlamenoNastrcavanje.html> (8.10.2020.)
- [75] Advanced plating tech. Electrolytic plating [online]. Dostupno na: <https://advancedplatingtech.com/electrolytic-plating/aluminum-chromate-conversion-services/>. (08.10.2020.)
- [76] Silcotek. What is a cvd coating [online]. Dostupno na: <https://www.silcotek.com/blog/what-is-a-cvd-coating>. (08.10.2020.)
- [77] PVD technologies [online]. Dostupno na: <https://www.rivestimentiinpvd.it/pvd-coating-properties-and-production/?lang=en>. (08.10.2020.)
- [78] Bob's watches [online]. Dostupno na: <https://www.bobswatches.com/watch-resources/pvd-and-dlc-coating-worth-it> . (08.10.2020.)

11. SAŽETAK

Naslov: Postupci modificiranja i prevlačenja površina

Ovaj rad sadrži opis procesa modificiranja i prevlačenja površina metalnih materijala. Procesii modificiranja i prevlačenja oboje se temelje na toplinskom, mehaničkom, kemijskom mehanizmu ili kombinaciji, a međusobno se razlikuju u poziciji novonastalog površinskog sloja. Opisane su sve varijante navedenih postupaka, poželjna svojstva koja se postižu u svakom pojedinom postupku (npr. otpornost na koroziju i trošenje, visoka čvrstoća i tvrdoća i postojanost na visokim temperaturama) te primjeri primjene u mehatronici.

Ključne riječi: modificiranje, prevlačenje, metalni materijali, toplinska obrada

12. ABSTRACT

Title : Procedures of Surface Modification and Coating in Mechatronics

This paper describes the existing procedures for modifying and coating metal surface surfaces. The modification and coating processes are both based on a thermal, mechanical, chemical mechanism or combination, and differ from each other in the position of the newly formed surface layer. All variants of the mentioned methods, desirable properties that are achieved in each individual procedure (e.g., corrosion and wear resistance, high strength and hardness and resistance to high temperatures) and examples of application in mechatronics are described.

Keywords : modification, coating, heat tretment, metal material

IZJAVA O AUTORSTVU ZAVRŠNOG RADA

Pod punom odgovornošću izjavljujem da sam ovaj rad izradio/la samostalno, poštujući načela akademske čestitosti, pravila struke te pravila i norme standardnog hrvatskog jezika. Rad je moje autorsko djelo i svi su preuzeti citati i parafraze u njemu primjereno označeni.

Mjesto i datum	Ime i prezime studenta/ice	Potpis studenta/ice
U Bjelovaru, <u>23.10.2020.</u>	<i>Marin Jambor</i>	<i>Jambor M.</i>

Prema Odluci Veleučilišta u Bjelovaru, a u skladu sa Zakonom o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju, elektroničke inačice završnih radova studenata Veleučilišta u Bjelovaru bit će pohranjene i javno dostupne u internetskoj bazi Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu. Ukoliko ste suglasni da tekst Vašeg završnog rada u cijelosti bude javno objavljen, molimo Vas da to potvrdite potpisom.

Suglasnost za objavljivanje elektroničke inačice završnog rada u javno dostupnom nacionalnom repozitoriju

Marin Jambor

ime i prezime studenta/ice

Dajem suglasnost da se radi promicanja otvorenog i slobodnog pristupa znanju i informacijama cjeloviti tekst mojeg završnog rada pohrani u repozitorij Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu i time učini javno dostupnim.

Svojem potpisom potvrđujem istovjetnost tiskane i elektroničke inačice završnog rada.

U Bjelovaru, 23. 10. 2020.

Jambor M.
potpis studenta/ice