

Primjena postupaka cementiranja u izradi dijelova poljoprivrednih strojeva

Radić, Anto

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

**Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek /
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:151:755966>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Sveučilište Josipa Jurja
Strossmayera u Osijeku

**Fakultet
agrobiotehničkih
znanosti Osijek**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Agrobiotechnical
Sciences Osijek - Repository of the Faculty of
Agrobiotechnical Sciences Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK**

Anto Radić

Diplomski sveučilišni studij Mehanizacija

**PRIMJENA POSTUPAKA CEMENTIRANJA U IZRADI DIJELOVA
POLJOPRIVREDNIH STROJEVA**

Diplomski rad

Osijek, 2021.

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK**

Anto Radić

Diplomski sveučilišni studij Mehanizacija

**PRIMJENA POSTUPAKA CEMENTIRANJA U IZRADI DIJELOVA
POLJOPRIVREDNIH STROJEVA**

Diplomski rad

Osijek, 2021.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Anto Radić

Diplomski sveučilišni studij Mehanizacija

**PRIMJENA POSTUPAKA CEMENTIRANJA U IZRADI DIJELOVA
POLJOPRIVREDNIH STROJEVA**

Diplomski rad

Povjerenstvo za ocjenu i obranu diplomskog rada:

1. izv. prof. dr. sc. Ivan Plaščak, predsjednik
2. prof.dr.sc. Goran Heffer, mentor
3. dr. sc. Ivan Vidaković, član

Osijek, 2021.

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. TROŠENJE MATERIJALA..... | 2 |
| 2.1. Mehanizmi trošenja..... | 2 |
| 2.1.1. Abrazija | 2 |
| 2.1.2. Adhezija | 5 |
| 2.1.3. Umor površine..... | 5 |
| 2.1.4. Tribokorozija..... | 6 |
| 2.2. Oblici (tipovi) trošenja | 7 |
| 3. ZAŠTITA OD TROŠENJA..... | 9 |
| 3.1. Zaštita od trošenja izborom materijala triboelemenata..... | 9 |
| 3.2. Zaštita od trošenja modificiranjem i prevlačenjem površina..... | 10 |
| 4. TOPLINSKA OBRADA | 12 |
| 4.1. Vrste postupaka toplinske obrade | 12 |
| 4.2. Toplinsko-kemijska obrada..... | 14 |
| 5. CEMENTIRANJE | 16 |
| 5.1. Čelici za cementiranje..... | 17 |
| 5.2. Postupci cementiranja | 19 |
| 5.2.1. Cementiranje uz pougljičenje u krutom sredstvu | 20 |
| 5.2.2. Cementiranje uz pougljičenje u tekućim sredstvima..... | 22 |
| 5.2.3. Cementiranje uz pougljičenje u plinovitom sredstvu | 23 |
| 5.2.4. Cementiranje uz pougljičenje u vakuumskoj peći..... | 25 |
| 5.2.5. Cementiranje uz pougljičenje u plazmi | 25 |
| 6. PRIMJENA CEMENTIRANJA | 27 |
| 6.1. Primjena cementiranja u strojogradnji | 27 |
| 6.2. Primjena cementiranja u izradi dijelova poljoprivrednih strojeva..... | 29 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 33 |
| 8. POPIS LITERATURE..... | 34 |
| 9. SAŽETAK..... | 37 |
| 10. SUMMARY | 38 |
| 11. POPIS TABLICA | 39 |
| 12. POPIS SLIKA | 40 |

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA
BASIC DOCUMENTATION CARD

1. UVOD

Smanjenje trenja i trošenja putem modifikacije površina trenutno je jedno od glavnih pravaca triboloških istraživanja u svijetu. Tehnologije modifikacije površina intenzivno se razvijaju, ali su njihovo vrednovanje i racionalna primjena nemogući bez poznavanja kemijskih, strukturnih i triboloških karakteristika površinskih slojeva (Marković i Milinović, 2009.).

Toplinska obrada materijala važna je u pogledu poboljšavanja svojstava materijala. U praksi se izbor materijala vrši prema njegovim svojstvima (fizikalnim i mehaničkim). Često se tražena svojstva koja zadovoljava visokokvalitetni i skupi materijal (visokolegirani metali, superlegure, ...) mogu postići izborom jeftinijega manje kvalitetnog materijala prikladnom toplinskom i mehaničkom obradom. Toplinskom obradom materijala najviše se obrađuju čelici (Gabrić i Šitić, 2015.).

Jedan od oblika toplinske obrade je cementiranje čelika, koje se sastoji od pougljičenja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Cilj je ostvarivanje tvrdoće na površinskim slojevima (otpornost na trošenja) i zadržavanje žilavosti u jezgri (otpornost na udarna opterećenja). Temperatura cementiranja iznosi od 870-930 °C, a najčešće iznosi 927 °C. Udio ugljika na površini i dubina cementiranja ovise o temperaturi i trajanju cementiranja, te o sastavu sredstva za cementiranje (Gorščak, 2004.).

Cilj ovog rada je objasniti tehnologiju cementiranja čelika te njezinu primjenu u svrhu zaštite radnih površina dijelova poljoprivrednih strojeva od različitih oblika trošenja.

2. TROŠENJE MATERIJALA

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodir s drugim krutim tijelom, fluidom ili česticama (Ivušić, 1998.).

U većini slučajeva vrijedi da je povećano trenje popraćeno većim trošenjem, ali i obrnuto. Posljedica trošenja je gubitak s površine bilo da se radi o potpunom gubitku ili premještanju materijala prema dodirnim površinama. U slučaju prijenosa materijala s jedne na drugu površinu konačni volumen, odnosno gubitak mase, na međupovršini je nula. Trošenje ne predstavlja samo gubitak materijala nego i oštećenje površine provodi se na temelju izgleda trošene površine i obliku čestica trošenja. Na potrošenoj površini nikad se ne pojavljuje samo jedan mehanizam trošenja, nego kombinacija mehanizama (Pavlović, 2020.).

Kovačević i sur. (2011.) navode da trošenje započinje pojavom jednog mehanizma, a nastavlja drugim. Pri tome se svi mehanizmi, osim zamora, pojavljuju uz postupno odstranjenje materijala.

2.1. Mehanizmi trošenja

Prema DIN 50320, postoje četiri osnovna mehanizma trošenja (Đurkić, 2018.):

- Abrazija
- Adhezija
- Umor površine
- Tribokorozija.

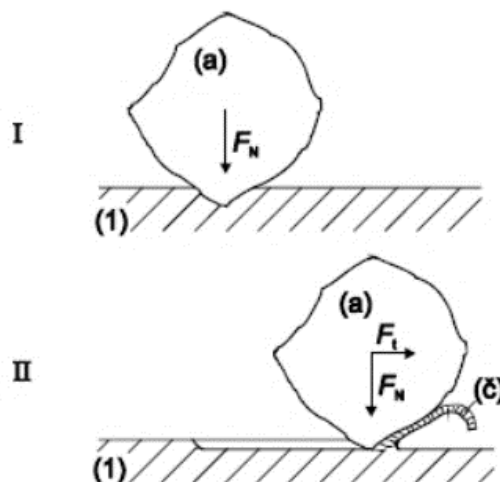
2.1.1. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama.

Jedinični događaj abrazije sastoji se od:

1. faza: prodiranje abraziva u površinu materijala pod djelovanjem normalne komponente sile F_N ,

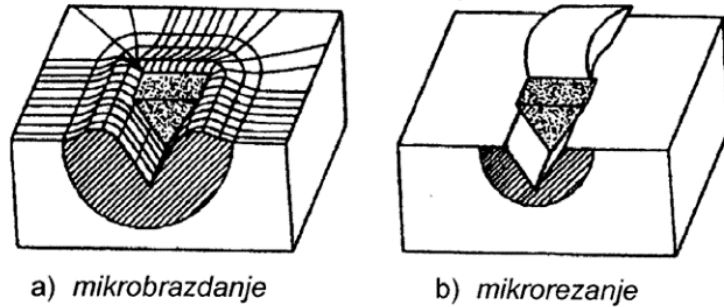
2. faza: istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja pod utjecajem tangencijalne komponente sile F_T (Ivušić, 1998.).



Slika 1. Jedinični događaj abrazije (Izvor: Ivušić, 1998.).

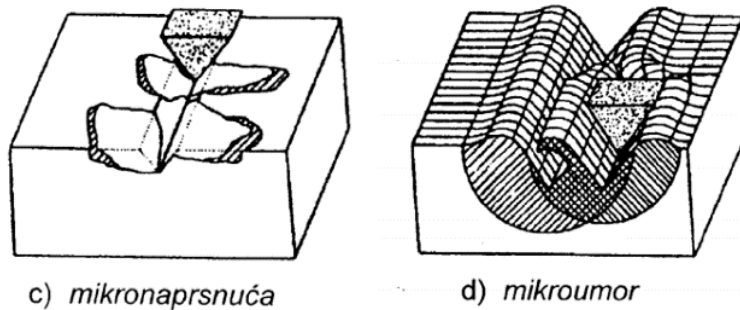
Prema Grilecu i sur. (2015.), abraziju je moguće analizirati s nekoliko različitih gledišta:

1. Ovisno o strukturi tribosustava u kome se zbiva abrazija:
 - a) Abrazija u dodiru dva tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela – abrazivno tijelo i abrazivno protutijelo
 - b) Abrazija u dodiru tri tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i protutijelo), te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova te djeluju abrazijski.
2. Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine:
 - a) Mikrobrazdanje – odnošenje materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice, uz uvjet da se rubovi brazde odvoje od površine u obliku produkata trošenja (Slika 2.a).
 - b) Mikro rezanje – odnošenje materijala jednako volumenu zarez nastalog prolaskom abrazivne čestice (Slika 2.b).



Slika 2. Shematski prikaz mikrobrazdanja i mikrorezanja (Izvor: Grilec i sur., 2015.)

- c) Mikronaprnuća – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina (Slika 3.c)
- d) Mikroumor – odnošenje materijala mehanizmima umora površine nastalim učestalim izmjeničnim opterećenjem (Slika 3.d).

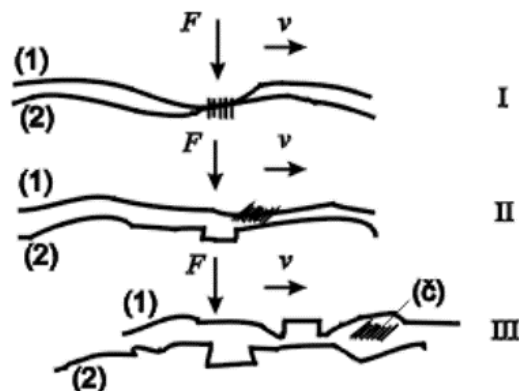


Slika 3. Shematski prikaz mikronaprnuća i mikroumora (Izvor: Grilec i sur., 2015.)

3. Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala
 - a) Čista abrazija – tvrdoća abraziva je veća od tvrdoće površine podloge. Površina izbrazdana, a čestice trošenja su oblika spiralne strugotine.
 - b) Selektivna abrazija – u abradiranom materijalu postoji doza tvrđa od abraziva. Abraziv reže samo zahvaćeni sloj mekše faze.
 - c) Nulta abrazija – cijela abradirana površina tvrđa od abrazivna. Površina ima polirani izgled, a čestice trošenja trebale bi biti sitne ljuskice koje potječu od vanjskog graničnog sloja (Ivušić, 1998.).

2.1.2. Adhezija

Adhezija se definira kao prijelaz materijala s jedne tarne plohe na drugu pri relativnom gibanju, zbog procesa zavarivanja krutih faza. Do trošenja dolazi kada sile otpora na elastičnu i plastičnu deformaciju, kao i sile otpora na brazdanje i kidanje adhezijskih veza postanu veće od kohezijskih sila (Ivušić, 1998.).



Slika 4. Jednični događaj adhezije (Izvor: Ivušić, 1998.).

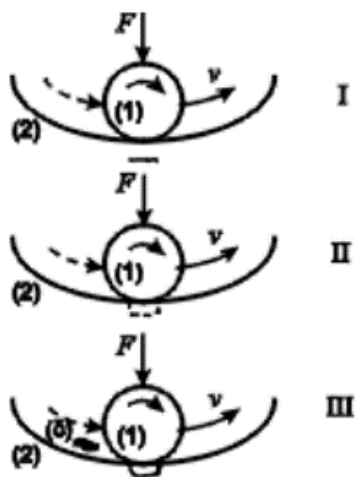
- U prvoj (I.) fazi pod utjecajem sile F dolazi do zavarivanja krutih faza, odnosno nastaje adhezijski spoj.
- U drugoj (II.) fazi adhezijski spoj se raskida, a čestica ostaje nalijepljena na jednoj tarnoj plohi.
- U trećoj (III.) fazi dolazi do mogućeg otkidanja nalijepljene čestice, a njen oblik ovisit će o uvjetima obrade (najčešće je listićav).

Čestice mogu ostati trajno ili privremeno nalijepljene na površinu. Otpornost kliznog para na adhezijsko trošenje ovisit će o sklonosti tarnog para stvaranju zavarenih spojeva. Oni materijali koji u paru nisu skloni mikrozavarivanju su tribološki kompatibilni materijali (Ivušić, 1998.).

2.1.3. Umor površine

Ivušić (1998.) navodi da umor površine karakterizira odvajanje čestica s površine uslijed periodički promjenjivih opterećenja.

Jedinični događaj umora površine prikazan je na slici 5.



Slika 5. Jedinični događaj umora površine (Izvor: Ivušić, 1998.).

Grilec i sur. (2015.) navode da se odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprežanja opisuje u tri faze:

- I. faza: stvaranje mikropukotine, redovito ispod površine
- II. faza: napredovanje mikropukotine
- III. faza: ispadanje čestice trošenja

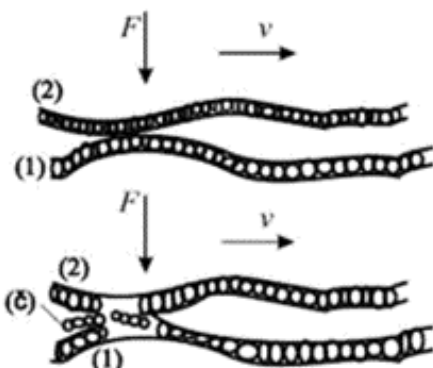
U prvoj fazi dolazi do stvaranja mikropukotine redovito ispod površine jer je najveće smično naprežanje kod koncentriranog dodira uvijek ispod površine. Ova faza naziva se još i faza inkubacije jer nema nikakvog odvajanja čestica. U drugoj fazi mikropukotine rastu i izbijaju na samu površinu te iz njih izlaze sitne kuglaste čestice koje su tako sitne da se ne mogu definirati kao gubitak materijala, ali su itekako značajne kao pokazatelj stanja procesa trošenja umorom površine. U trećoj fazi dolazi do ispadanja čestica trošenja. Te čestice uglavnom imaju oblik pločice ili iverka i krupne su, a njihovim ispadanjem na površini ostaju rupice pa se ovakav oblik trošenja naziva još i rupičenje (Ivušić, 1998).

2.1.4. Tribokorozija

Tribokorozija je trošenje pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem. Opisuje se s dvije faze jediničnih događaja:

I. faza: stvaranje sloja produkata korozije

II. faza: mjestimično razaranje sloja produkata korozije (Grilec i sur., 2015.).



Slika 6. Faze jediničnog događaja tribokorozije (Izvor: Ivušić, 1998.).

U prvoj fazi pod djelovanjem sile F na tribopar dolazi do stvaranja ili obnavljanja sloja produkata korozije. U drugoj fazi nastaje lokalno razaranje nastalog sloja produkata korozije (Ivušić, 1998.).

2.2. Oblici (tipovi) trošenja

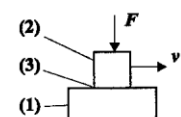
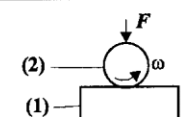
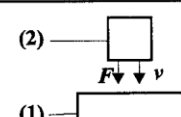
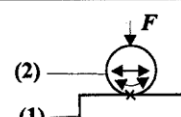
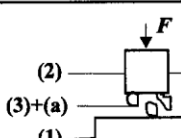
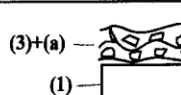
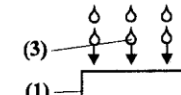
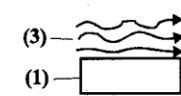
Kad god se površine kreću jedna po drugoj, dolazi do pojave trošenja – oštećenja na jednoj ili obje površine koje najčešće podrazumijeva i progresivan gubitak materijala (Domazet, 2011.).

U većini slučajeva, trošenje je štetno – uzrokuje povećanu zračnost između pomičnih komponenti, neželjenu slobodu kretanja, gubitak preciznosti, često vibracije, povećano mehaničko opterećenje i još brže trošenje, te ponekad i umor materijala. Gubitak relativno male količine materijala može biti dovoljan uzrok prestanka rada velikih i kompleksnih strojeva. Ipak, ponekad su (kao kod trenja) velika trošenja poželjna - npr. brušenje, mljevenje i poliranje koriste pojavu trenja za brzo odstranjivanje materijala u kontroliranim uvjetima, a niska razina trenja ponekad je i poželjna kod nekih procesa uhodavanja mehanizma. Primjenom odgovarajućih mjera cilj tribologije je postići da određeni tribosustav funkcionira pretežno u režimu tzv. normalnog trošenja. Svaki proces trošenja sastoji se najčešće od dva mehanizma trošenja ili više njih, koji djeluju istodobno ili u vremenskom slijedu, ovisno o vrsti tribosustava, relativnom gibanju i radnim uvjetima (Grilec i sur. 2015.).

Prema vrsti elemenata tribosustava, vrsti dodira, načinu i obliku relativnog gibanja razlikuju se sljedeći slučajevi trošenja (Ivušić, 1998.):

- klizno trošenje
- kotrljajuće trošenje
- udarno
- izjedanje (fretting)
- abrazijsko trošenja
- erozija česticama
- erozija kapljevnom
- kavitacija.

Tablica 1. Podjela slučajeva trošenja (Izvor: Ivušić, 1998.)

| | TIP TROŠENJA | HEMA TRIBOSUSTAVA ¹⁾ | RELATIVNO GIBANJE | MEHANIZMI TROŠENJA ²⁾ / STUPANJ OPASNOSTI ³⁾ | | | | POKAZATELJ OTPORNOSTI NA TROŠENJE |
|----|-------------------------|---|----------------------|---|----|----|----|--|
| | | | | AB | AD | UP | TK | |
| 1. | SKLIZNO |  | sklizanje | 4 | 1 | 3 | 5 | Kompatibilnost materijala |
| 2. | KOTRLJAJUĆE |  | kotrljanje | 4 | 4 | 1 | 5 | Dinamička izdržljivost površine |
| 3. | UDARNO |  | udarci | 3 | 3 | 1 | 5 | |
| 4. | IZJEDANJE (fretting) |  | vibracije | | | | 1 | Konstruktivske mjere |
| 5. | ABRAZIJA |  | sklizanje | 1 | | 4 | 5 | Udio i mikrotvrdoća tvrde faze |
| 6. | EROZIJA ČESTICAMA |  | strujanje | 1 | | 2 | 5 | Udio i mikrotvrdoća tvrde faze/dinamička izdržljivost površine |
| 7. | EROZIJA KAPLJEVINOM |  | strujanje | | | 1 | 4 | Dinamička izdržljivost površine |
| 8. | KAVITACIJA |  | strujanje | | | 1 | 4 | |

3. ZAŠTITA OD TROŠENJA

3.1. Zaštita od trošenja izborom materijala triboelemenata

Izbor odgovarajućih materijala za izradu dijelova strojeva je važna i odgovorna zadaća konstruktora i tijesno je povezana s funkcionalnošću i radnom sposobnošću dijelova strojeva u različitim sklopovima. Izbor materijala je ovisan o mehaničkim svojstvima materijala, kao što su statička i dinamička čvrstoća, površinska tvrdoća, otpornost na habanje i koroziju, svojstva trenja, masti itd., te u velikoj mjeri utječe na postupak i ekonomičnost izrade. Za što jednostavniju izradu i obradu materijal mora imati dobru mehaničku obradivost, zavarljivost, livnost, kovnost, stišljivost i mora biti pogodan za toplinsku obradu. Za izradu strojnih dijelova najčešće se upotrebljavaju sljedeći materijali: čelik, čelični lijev, sivi lijev, legirani obojeni metali i legirani laki metali, a ponekad i polimerni materijali, keramika, drvo, tekstil, itd. Najčešće upotrebljavani materijal je čelik, koji u najvećoj mjeri zadovoljava potrebe visoke volumenske i površinske čvrstoće, temperaturne postojanosti, žilavosti, itd. Na svojstva čelika u velikoj mjeri utječe se različitim postupcima izrade i obrade, dodatkom legiranih elemenata i s odgovarajućom kemijskom i toplinskom obradom (Jelaska, 2005).

Zaštita površina dijelova izloženih trošenju provodi se izborom materijala koji ima izraženo svojstvo otpornosti na određeni mehanizam trošenja. Budući da je u promatranom slučaju trošenja dominantni mehanizam abrazije, izbor materijala se obavlja prema uputama prikazanim u tablici (Poretti, 2008.).

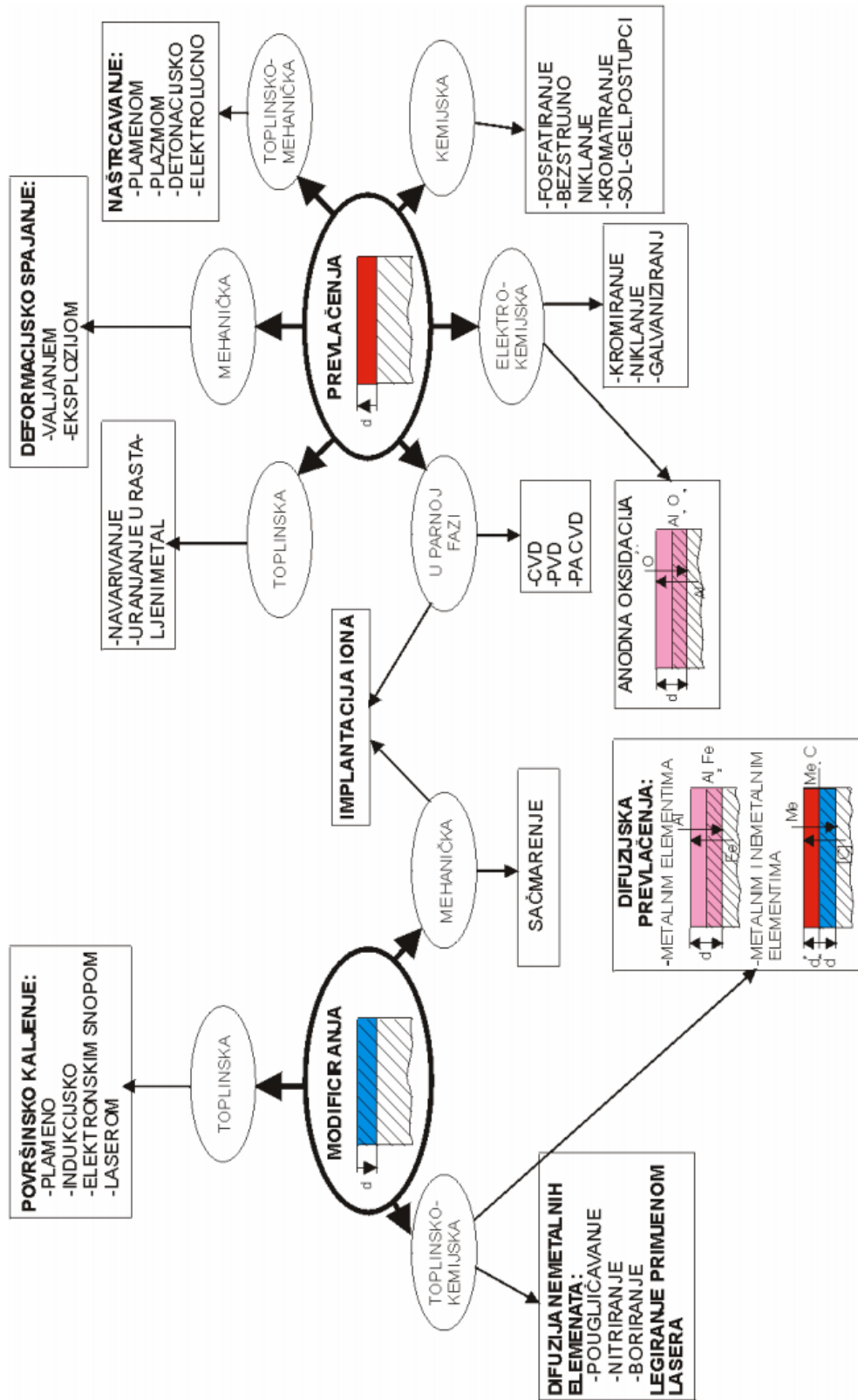
Tablica 2. Upute za izbor materijala u uvjetima abrazije (Izvor: Grilec i sur. 2015.)

| Radni uvjeti | Zahtijevana svojstva | Materijal |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">visoka naprezanjaudarci | <ul style="list-style-type: none">visoka žilavostotvrdnjavanje hladnom deformacijom | <ul style="list-style-type: none">austenitni manganski čelikguma |
| <ul style="list-style-type: none">niska naprezanjasklizanje | <ol style="list-style-type: none">visoka tvrdoćažilavost manje važnabrza izmjena dijelova | <ul style="list-style-type: none">kaljeni ili drugačije otvrdnuti metalni materijalinavareni slojevikeramika |

| | | |
|--|--|---|
| | <ol style="list-style-type: none"> 1. niska cijena osnovnog materijala 2. trajanje izmjene manje važno | <ul style="list-style-type: none"> • keramika • kamene pločice • beton |
| | <ol style="list-style-type: none"> 1. najveća otpornost na trošenje 2. cijena nevažna | <ul style="list-style-type: none"> • volframov karbid (tvrđi metal) |
| <ul style="list-style-type: none"> • visoka naprezanja • jaki udarci | <ul style="list-style-type: none"> • Visoka žilavost | <ul style="list-style-type: none"> • Ljevovi i čelici • Zavareni slojevi |
| <ul style="list-style-type: none"> • Vlaga i korozija | <ul style="list-style-type: none"> • Otpornost na koroziju | <ul style="list-style-type: none"> • Korozijski postojani čelici • Keramika • Guma • Polimeri |
| <ul style="list-style-type: none"> • Niska naprezanja • Sitne čestice • Slaba abrazivnost čestica | <ul style="list-style-type: none"> • Niski koeficijent trenja | <ul style="list-style-type: none"> • Poliuretan • Teflon • Glatke metalne površine |
| <ul style="list-style-type: none"> • Visoka temperatura | <ul style="list-style-type: none"> • Otpornost lomu i toplinskim šokovima • Opća otpornost pri povišenim temperaturama | <ul style="list-style-type: none"> • Ljevovi i čelici legirani kromom • Neke keramike |
| <ul style="list-style-type: none"> • Minimalno trajanje zastoja | <ul style="list-style-type: none"> • Laka izmjena | <ul style="list-style-type: none"> • Bilo koji materijal koji se lako pričvršćuje ili nanosi |
| <ul style="list-style-type: none"> • Zakrivljene i nepravilne površine i oblici | <ul style="list-style-type: none"> • Bilo koje ili kombinacije gornjih svojstava | <ul style="list-style-type: none"> • Navareni slojevi • Materijali koji se nanose lopaticom |
| <ul style="list-style-type: none"> • Jako teški rad pri visokim temperaturama | | <ul style="list-style-type: none"> • Navareni slojevi |

3.2. Zaštita od trošenja modificiranjem i prevlačenjem površina

Modificiranje površinskih slojeva metalnih materijala može se provesti primjenom postupaka koji se u osnovi razlikuju prema vanjskom djelovanju koje može biti mehaničko, toplinsko ili toplinsko-kemijsko (Razum, 2016.):



Slika 7. Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja površina

(Izvor: Stupišek i Matijević, 2000.)

4. TOPLINSKA OBRADA

Kod obrada djelovanjem topline (toplinska obrada), predmet se namjerno podvrgava temperaturno-vremenskim ciklusima kako bi se postigla željena mikrostruktura, a time i željena (mehanička, fizička i kemijska) svojstva (Stupnišek i Cajner, 2001.).

Pri visokim temperaturama, na koje se izradak zagrijava prilikom toplinske obrade, moguće su kemijske reakcije površine metala s okolnom atmosferom u peći (kod čelika dolazi do pojave razugljčenja i oksidacije površine u kontaktu s atmosferom). Te reakcije su nepoželjne pa treba poduzeti mjere za njihovo sprječavanje, osim tada kad se namjerno mijenja kemijski sastav površine, u kontroliranoj atmosferi, čime se poboljšavaju svojstva metala. Danas se mogu koristiti razni postupci toplinskih obrada, a koji će se primijeniti ovisi o svrsi i namjeni obratka te kakve učinke i promjene se na njemu želi dobiti, tj. izazvati. Najčešće se dijele prema dubini do koje dopire utjecaj toplinske obrade. To je značajno i stoga što brojni elementi strojeva imaju izrazite zahtjeve samo na svojstva površine (Gabrić i Šitić, 2015.).

4.1. Vrste postupaka toplinske obrade

Jedna od podjela postupaka oplemenjivanja površina, definirana prema vrsti prevlake, prikazana je tablicom 3..

Tablica 3. Podjela postupaka oplemenjivanja materijala (Izvor: Poretti, 2008.)

| I VRSTA Nanošenje druge vrste materijala | | II VRSTA Promjena sastava na površini | III VRSTA Promjena mikrostrukture na površini |
|--|--|---|---|
| A. Navarivanje A1 Plinsko A2 Elektrolučno A3 Plazmom | E. Elektrotaloženje E1 Elektroliza E2 Metalizacija E3 Anodizacija E4 Elektroforeza | H. Intersticijsko otvrdnuće H1 Cementiranje H2 Nitiranje H3 Karbonitriranje H4 Sulfonitriranje H5 Boriranje | K. Mehanička obrada K1 Sačmarenje K2 Valjanje K3 Strojna obrada |
| B. Naštrecavanje B1 Plamenom B2 Električnim lukom B3 Plazmom B4 Eksplozijom | F. Taloženje iz parne faze F1 Fizikalno (PVD) F2 Kemijsko (CVD) | I. Difuzijska obrada II Siliciranje | L. Toplinska obrada L1 Plameno kaljenje L2 Indukcijsko kaljenje L3 Kokilno lijevanje M. Termomehnička |

| | | | |
|---|---|--|--|
| C. Platiranje – oblaganje C1 Lemljenjem C2 Eksplozivnim spajanjem C3 Difuzijskim spajanjem | G. Kemijsko taloženje G1 Kemijsko platiranje G2 Fosfatiranje G3 Kromiranje | I2 Aluminiziranje I3 Kromiranje I4 Vanadiranje J. Kemijska obrada J1 Nagrizanje J2 Oksidiranje | obrada M1 Martenzitno deformacijsko otvrdnjavanje |
| D. Mješovito D1 Otvrdnjavanje iskrenjem D2 Prevlačenje praškom D3 Organske prevlake D4 Bojanje D5 Vruće uranjanje | | | |

Prema tehnologiji izvođenja postupci se mogu podijeliti u sljedeće skupine:

- I. Toplinsko-kemijski postupci (tradicionalni):
 - a) cementiranje – pougljičavanje + kaljenje
 - b) karboniranje – s kaljenjem ili bez kaljenja
 - c) nitriranje
 - d) nitrokarburiranje
 - e) boriranje
- II. Postupci u ioniziranom plinu (plazma):
 - a) nitriranje u plazmi
 - b) pougljičavanje u plazmi
 - c) raspršivanje lukom plazme
- III. Postupci taloženja iz parne faze:
 - a) kemijsko taloženje iz parne faze (CVD-postupak)
 - b) fizikalno taloženje iz parne faze (PVD-postupak)
- IV. Galvanski postupak nanošenja (elektrolitski):
 - a) niklanje
 - b) tvrdo kromiranje
 - c) fosfatiranje
 - d) alitiranje

- V. Postupak dobivanja karbidnih slojeva u solnoj ili fluidiziranoj kupki:
 - a) Toyota Difusion process (TD-postupak)
- VI. Kratkotrajni postupci visoke gustoće energije:
 - a) plameno kaljenje
 - b) indukcijsko kaljenje
 - c) impulsno kaljenje
 - d) visokofrekventno otporno kaljenje
 - e) laserski postupci modifikacije površinskih slojeva – kaljenje, rastaljivanje, spajanje i homogeniziranje prethodno nanesenih slojeva
 - f) elektronski snop – isti postupci kao kod lasera (Poretti, 2008.)

4.2. Toplinsko-kemijska obrada

U ovoj podskupini su postupci u kojima se, osim unošenja toplinske energije, unošenjem drugih kemijskih elemenata mijenja kemijski sastav a time i mikrostruktura i svojstva površinskih slojeva. Nemetalni se elementi mehanizmom difuzije unose u površinski sloj metalnog materijala. U industriji strojogradnje mnogo se primjenjuju postupci pougljičavanja, nitriranja te kombinirani postupci istovremene difuzije ugljika i dušika (karbonitriranje i nitrokarburiranje) kao i varijante sa sumporom ili s kisikom (Stupnišek i Matijević, 2000.)

Pougljičavanje se provodi u sklopu cjelovitog postupka cementiranja kojim se postiže visoka otpornost na umor površine kod čelika za cementiranje. U primjeni je veliki broj postupaka pougljičavanja od primjene posebnih granulata, solnih kupki i plinskih atmosfera (generatorskih, sintetičkih, ioniziranih). Premda je pougljičavanje najstariji princip toplinsko-kemijske obradbe čelika, ipak je i sada veoma raširena primjena, jer se postižu najviše otpornosti u uvjetima naprezanja površinskih slojeva pri mehanizmu umora površine. Kod nekih vrsta strojnih elemenata cementiranje je skoro nezamjenjivo u uvjetima visokih specifičnih pritisaka, na primjer kod zupčanika za prijenos snage. Prisutan je stalan razvoj tehnologija pougljičavanja; primjenjuju se senzori za kontrolu plinskih atmosfera i matematički modeli te programi za upravljanje procesima u cilju postizanja optimalnih profila koncentracija ugljika i mikrostrukture u cementiranom površinskom sloju čeličnih dijelova (Stupnišek i Virag, 1982.).

Postupci nitriranja također su u širokoj primjeni. Postoji veliki broj postupaka i tehnologija u solnim kupkama, plinskim i ioniziranim atmosferama. Najčešće se osim dušika u površinski sloj istovremeno uvode i drugi nemetalni elementi (C, O, S) tako da su to postupci nitrokarburiranja, nitrooksikarburiranja, sulfonitriranja i dr. U površinskom sloju čelika postiže se relativno tanka „zona spojeva“ nitrida odnosno karbonitrida tipa Fe_4N (gama) ili $Fe_{2-3}N$ (epsilon) koja daje visoku otpornost površine prema adhezijskom mehanizmu trošenja (Liščić i sur., 1991.).

Ispod zone spojeva je difuzijska zona u kojoj je dušik otopljen u feritu što doprinosi povećanju otpornosti na mehanizam umora površine. Budući da se postupci provode pri temperaturama do $580\text{ }^{\circ}C$, promjene dimenzija su relativno male, što omogućava izradu dijelova s uskim tolerancijama dimenzija, pri čemu je nitriranje završna obrada. Novije tehnologije nitriranja primjenjuju nove senzore za kontrolu plinske atmosfere i mikroprocesorske postupke upravljanja koji se temelje na matematičkim modelima za opis procesa. Nitrirani sloj ima, osim visoke otpornosti prema adhezijskom mehanizmu trošenja, i povećanu otpornost prema koroziji. Još veća otpornost prema koroziji postiže se dodatnim postupcima kontrolirane oksidacije kojima se postiže tanki sloj kompaktnog oksida tipa magnetita Fe_3O_4 . U primjeni su i postupci dodatne obrade u solnim kupkama (QPQ) i u plinskim atmosferama (EPILOX) (Stupnišek i Matijević, 2000.).

5. CEMENTIRANJE

Cementiranje čelika je postupak obrade koji se sastoji od:

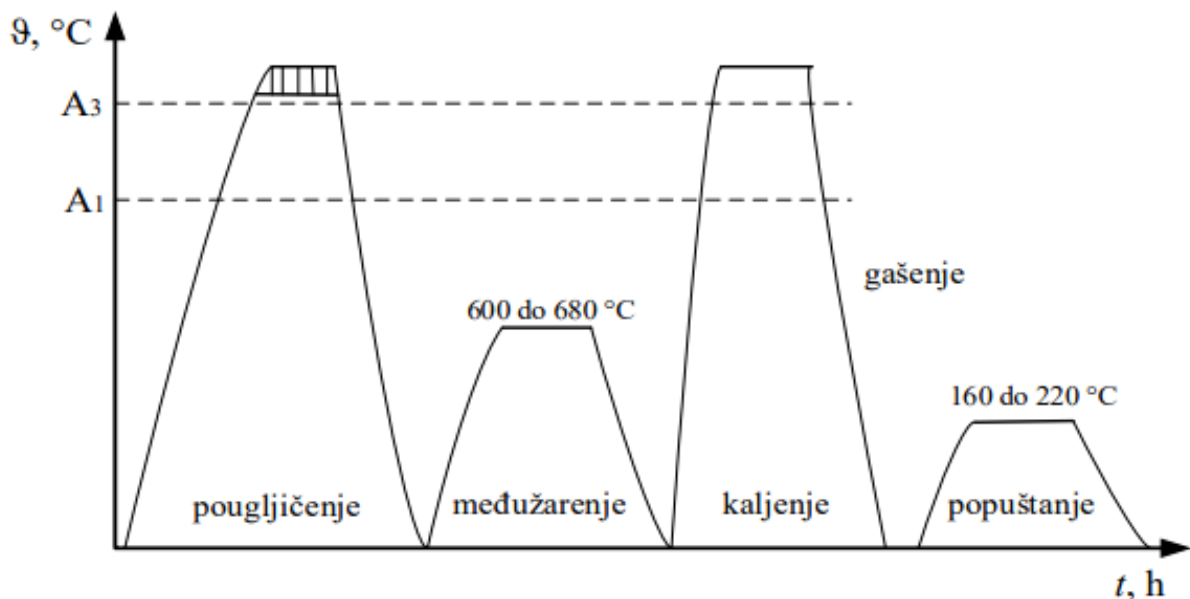
- termokemijske obrade pougljičenja (obogaćivanjem površinskog sloja proizvoda ugljikom)
- kaljenja (pougljičeni sloj se dovodi u martenzitnu strukturu) proizvoda i niskotemperaturnog popuštanja (Golubić, 2019.).

Cementiranje se primjenjuje za površinsku toplinsku obradu konstrukcijskih dijelova kod kojih se zahtijeva visoka tvrdoća na površini, a istovremeno jezgra mora zadržati visoku žilavost što doprinosi visokoj otpornosti prema udarnim naprezanjima (zupčanici, vratila, osovine i slično). Tako se ova toplinska obrada primjenjuje kod strojnih dijelova koji su izloženi površinskom trošenju i visokim dinamičkim naprezanjima. Ovim se postupkom obrađuju čelici za cementiranje koji sadrže manje od 0,25 % ugljika. U prvom dijelu ovoga postupka, pougljičavanju, u površinskom se sloju poveća sadržaj ugljika tako da se nakon kaljenja postigne visoka tvrdoća. Nepougljičeni dio (jezgra) strojnog dijela, radi nižeg sadržaja ugljika, kaljenjem dobiva znatno nižu tvrdoću. Sadržaj ugljika na samoj površini kreće se obično u granicama od 0,8 do 1,0 %, a prema jezgri ravnomjerno opada. Ovisno o uvjetima pougljičavanja postiže se odgovarajuća pougljičena dubina. Naknadnim se kaljenjem u površinskom sloju postiže martenzitna struktura s visokom tvrdoćom i otpornošću prema trošenju (Goršćak, 2004.).

Cilj cementiranja je dobivanje što veće tvrdoće (do 800 HV) površinskog dijela, otpornost na trošenje, otpornost na umor površine te, u konačnici, zadržavanje početnih svojstava jezgre kako bi imala što veću otpornost na udarna opterećenja (žilavost) (Gojić, 2010.).

U praksi se rječju „cementiranje“ najčešće obuhvaća proces u širem smislu riječi, tj. proces pougljičenja i kaljenja. U cjelini gledano, ne bi imalo nikakvog smisla pougljičavati neki predmet, a poslije toga ga ne kaliti, pa je s te strane opravdano cementiranjem smatrati kompletni postupak (Kraljević, 2020.).

Slika 8. prikazuje dijagram iz kojega su vidljivi procesi koji obuhvaćaju cjelokupni postupak cementiranja.



Slika 8. Dijagram postupka cementiranja (Izvor: Stupnišek i Cajner, 2001.).

5.1. Čelici za cementiranje

Čelici za cementiranje predstavljaju konstrukcijske čelike kojima se nakon obrade odvajanjem čestica pougljičava (cementira) rubni sloj. Nakon cementiranja rubnog sloja provodi se kaljenje kako bi se postigla visoka otpornost na trošenje rubnih slojeva, te povišena žilavost nepougljičene jezgre i na kraju niskotemperaturno popuštanje (Kožuh, 2010.).

Za cementiranje se koriste niskouglični ($< 0,25 \% C$) čelici, i to nelegirani i legirani sa zajamčenim kemijskim sastavom. Prema masenom udjelu nečistoća, ovi čelici spadaju u kvalitetne i plemenite čelike. Plemeniti čelici sadrže maseni udio sumpora i fosfora manji od $0,035 \%$, a kvalitetni čelici sadrže manje od $0,045 \%$ sumpora i fosfora (Golubić, 2019.).

U tablici 4. prikazan je pregled vrsta i svojstava čelika za cementiranje.

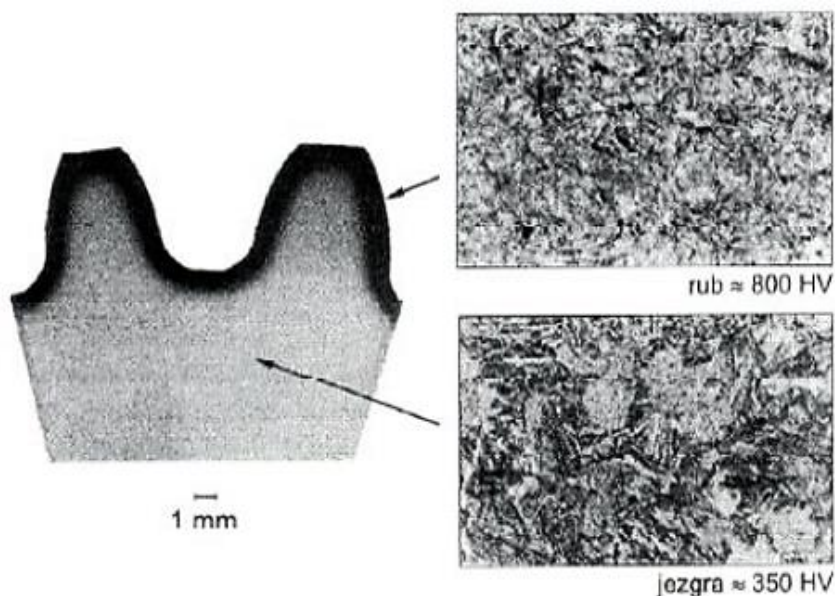
Tablica 4. Čelici za cementiranje (Izvor: Kožuh, 2010.).

| Oznaka čelika | Sastav „ostalo“ % | Tvrdoća u isporučenom stanju, HB | Slijepo kaljeno 30 mm | | | Kaljenje | |
|------------------|-------------------------|--|-------------------------|--------------------|-----------------|---------------------------|------------------|
| | | | Rp 0,2, N/mm2 min | Rm, N/mm2 | A5, % min | Jezgra, °C | Rub, °C |
| C10 | - | 90-126 | 295 | 490-640 | 16 | 880-920;voda | - |
| C15 | - | 103-140 | 355 | 590-790 | 14 | | |
| Ck10 | - | 90-126 | 295 | 490-640 | 16 | 880-920;voda | - |
| Ck15 | - | 103-140 | 355 | 590-790 | 14 | | |
| 15Cr3 | - | 118-160 | 440 | 690-890 | 11 | 870- 900;voda, ulje | - |
| 16MnCr5 | 1Cr | 140-187 | 590 | 780-1080 | 10 | 850-880;ulje | 810- 840;ulje |
| 20MnCr5 | 1,2Cr | 152-201 | 685 | 980-1280 | 7 | 850-880;ulje | 810- 840;ulje |
| 20CrMo5 | 0,25Mo 1,1Mn | 152-201 | 785 | 1080- 1380 | 7 | 850-880;ulje | 810- 840;ulje |
| 20MoCr4 | 0,4Cr | 140-187 | 590 | 780-1080 | 10 | 890-920;ulje | - |
| 15CrNi6 | 1,5Ni | 152-201 | 635 | 880-1180 | 9 | 840-870;ulje | 800- 830;ulje |
| 18CrNi8 | 2Ni | 170-217 | 785 | 1180- 1430;ulje | 7 | 840-870;ulje | 800- 830;ulje |

Budući da niskouglični čelici s 0,1-0,2 % C nisu skloni povišenju tvrdoće kaljenjem (tek čelici s 0,25 % C), potrebno im je radi zakaljivanja i povećanja otpornosti na abrazijsko trošenje povisiti sadržaj ugljika u rubnim slojevima (0,8-0,9 % C). Povišenje sadržaja ugljika postiže se postupkom pougljičavanja (npr. granulati, solna kupka, plin). Ugljikom obogaćeni rub postaje zakaljiv, tj. kaljenjem (gašenjem) s odgovarajuće temperature austenitizacije postaje sklon poprimanju mikrostrukture visokougličnog martenzita otpornog na trošenje. U području toplinske obradbe čelika postupak pougljičavanja i kaljenja pougljičenog sloja naziva

se cementiranje. Nakon cementiranja pougljičena jezgra ostaje feritno-perlitna ukoliko proizvod nije prokaljen, tj. nastaje niskougljični martenzit u slučaju prokaljivanja. Obje navedene mikrostrukture karakterizira visoka udarna radnja loma pa je konačni proizvod otporan na trošenje s znatnim iznosom žilavosti. Nakon cementiranja površinski slojevi sadrže visokougljični martenzit (Gabrić i Šitić, 2015.).

Slika 9. prikazuje mikrostrukturu cementita legiranog čelika 16MnCr5.



Slika 9. Mikrostruktura cementiranog zupčanika izrađenog iz čelika 16MnCr5

(Izvor: Kožuh, 2010.).

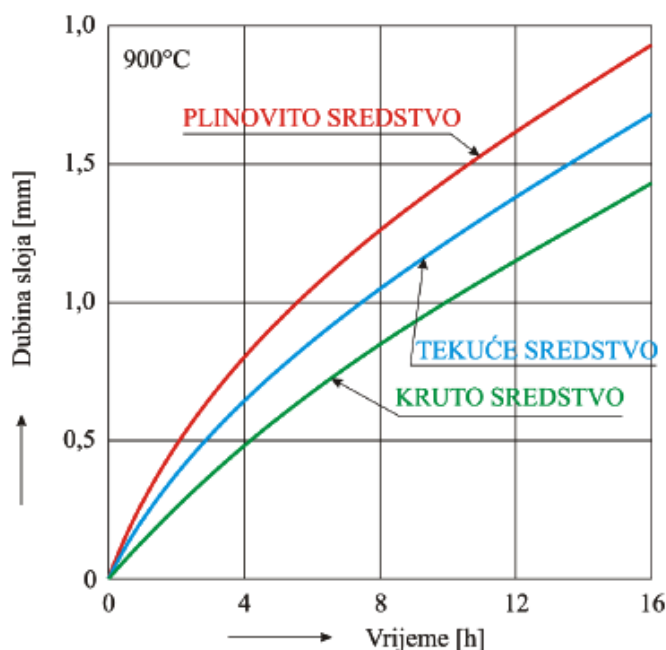
5.2. Postupci cementiranja

Postupci cementiranja s obzirom na izvor ugljika:

1. Cementiranje u krutim sredstvima – kao sredstvo za cementiranje koristi se granulat koji se sastoji od smjese drvenog ugljena kao nositelja ugljika, aktivatora BaCO_3 i veziva.
2. Cementiranje u tekućim sredstvima – provodi se u rastaljenim solima kalijeva i natrijeva cijanida i odgovarajućim aktivatorima.
3. Cementiranje u plinovitim sredstvima – sredstvo za cementiranje su plinske atmosfere koje sadrže spojeve ugljika (CO , CH_4 , itd.), te čine ovu metodu cementiranja znatno

bržom nego u granulatu, a moguća je i kvalitetnija regulacija C-potencijala atmosfere, kao i rad s više C-potencijala, odnosno promjenljivim C-potencijalom

4. Vakuumsko cementiranje – obrađivanje čelika u vakuumu u plinovitoj atmosferi koja može biti sastavljena od ugljika, ugljikovodika, smjese ugljikovodika te smjese ugljikovodika i dušika
5. Plazma cementiranje (ionizirani plinovi) – konstantan C-potencijal se regulira putem gustoće struje; dolazi do bombardiranja površine čelika koncentracijom ugljikovih iona (Gabrić i Šitić, 2015.)



Slika 10. Utjecaj vremena držanja izratka (na temperaturi cementiranja) na dubini cementiranog sloja za različita sredstva cementiranja

(Izvor: Gabrić i Šitić, 2015.)

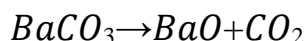
5.2.1. Cementiranje uz pougljičenje u krutom sredstvu

Ovakav način pougljičavanja spada među jedne od najstarijih postupaka koji se uspio održati do danas. Najčešće se primjenjuje u slučaju malog broja proizvoda koje treba pougljičiti. Primarno su to predmeti koje nakon cementiranja neće biti potrebno kaliti s temperature pougljičavanja. Smjesa koja se upotrebljava za cementiranje je mješavina drvenog ugljena, aktivatora i vezivnog sredstva u obliku zrnatog granulata veličine 3-5 mm (Vulin, 2020.).

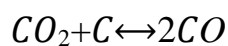


Slika 11. Kruto sredstvo za cementiranje (granulat) (izvor: Gabrić i Šitić, 2015.)

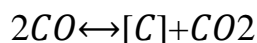
Kao aktivator u procesu cementiranja može se koristiti natrijev karbonat $[Na_2CO_3]$, ali najčešće se koristi barijev karbonat $[BaCO_3]$ koji se pri povišenim temperaturama raspada na barijev oksid i ugljični dioksid:



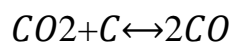
Ugljični dioksid reagira s ugljikom iz granulata stvarajući ugljikov monoksid:



Pri tome se stvara ravnoteža plinskih atmosfera što u kontaktu s površinom čelika uzrokuje pougljičavanje:



Dolazi do ugradnje ugljika u austenitno zrno koje difuzijom prodire u unutrašnjost jezgre. Prisutnost drvenog ugljena izaziva reakciju ugljičnog dioksida i obnavljanje ugljičnog monoksida. Ovim postupkom se omogućava obnova cijelog procesa i kontinuirana regeneracija plinske atmosfere:



Proces pougljičavanja izgleda tako da se kutije izrađene od niskougljičnog čelika pune granulatnom smjesom visine 13-50 mm. Potom se na taj sloj slažu predmeti, vodeći računa o razmaku i o njihovom položaju. Nakon toga se predmeti pokrivaju s ostatkom smjese. Kutije se zatvaraju poklopcem premazanim glinom ili šamotom radi sprječavanja ulaska zraka. Stavlja se u zagrijanu peć na 600-700 °C, postupno se povećava temperatura na razinu pougljičavanja 850-950 °C (ovisno o materijalu i o potrebama). Po završetku procesa kutija se vadi iz peći, a predmeti se odvajaju od granulata (Gabrić i Šitić, 2015.).

Prednosti procesa pougljičenja u krutom sredstvu:

- jednostavnost,
- minimalna ulaganja u opremu,
- dovoljno zadovoljavajuća kvaliteta procesa.

Nedostaci procesa pougljičenja u krutom sredstvu:

- nepogodan za serijsku proizvodnju,
- nemogućnost kontrole i regulacije C-potencijala,
- opasnost od nastajanja karbida,
- opasnost od lokalnog razugljičavanja u fazi ohlađivanja (Havidić, 2018.).

5.2.2. Cementiranje uz pougljičenje u tekućem sredstvu

Izvodi se u rastaljenim solima natrijeva ili barijeva klorida + aktivator (koji je opet natrijev cijanid NaCN). Zbog otrovnosti cijanida prostorije i postupak podliježu strožim propisima zaštite zdravlja. Struktura pougljičenog sloja ista je kao i kod pougljičavanja u krutom sredstvu (Gabrić i Šitić, 2015.)

Prema Pinjušić (2020.), solne kupke se mogu svrstati u dvije skupine:

1. Aktivne solne kupke – uz cijanide sadrže i aktivatore (barijev ili stroncijev klorid) koji podržavaju i oslobađaju ugljik potreban za pougljičenje, snižavaju temperaturu taljenja i viskoznost kupke. Proces se provodi na temperaturama od 900 do 1000 °C pri čemu se postiže udio ugljika od 0,5% do 1,2%. Tijekom procesa kontrolira se sadržaj cijanida, te C-potencijal. U slučaju potrebe kupka se nadopunjava najčešće gotovim smjesama soli cijanida i aktivatora. Pošto su cijanidi vrlo otrovni, obratke je nakon procesa kaljenja potrebno neutralizirati držeći ih 5-10 min u spremnicima s otopinom željezovog sulfata. Zatim se detaljno ispiru 5 min toplom vodom.
2. Neaktivne solne kupke – primjenjuju se za karbonitriranje pri temperaturi do 850 °C i dubine do 0,5 mm, što postiže rezultat od 0,4 % do 0,6 % ugljika na površini obratka. Sam proces je otvoren i u doticaju sa zrakom. Kontrolira se samo sadržaj cijanida, te ako je sadržaj mali, kupka se nadopunjuje svježom soli.

Dubine pougljičenja zavise o C-potencijalu, vremenu pougljičenja i temperaturi pri kojoj se odvija proces te o vrsti čelika.

Prednosti pougljičenja u tekućim sredstvima:

- jednostavnost postupka,
- mala ulaganja u opremu,
- jednolično postignute dubine pougljičenja,
- prikladan za serijsku i masovnu proizvodnju.

Nedostaci pougljičenja u tekućim sredstvima:

- nemogućnost konstantnog kontroliranja i reguliranja sastava kupke i C-potencijala,
- zbrinjavanje cijanida,
- neutralizacija otpadnih soli i voda (Gorščak, 2004.).

5.2.3. Cementiranje uz pougljičenje u plinovitom sredstvu

Cementiranje u plinovitim sredstvima je moderan način pougljičenja, vrlo sličan već spomenutim postupcima, ali bez kontrole nad nastalim plinom u površini izratka. Ovdje se, međutim, potrebni plinovi razvijaju u generatorima kontroliranim procesom smjese plina (uglični monoksid CO, vodika H₂, vodene pare). Jednostavno se regulira C-potencijal i ima veliku primjenu u velikoserijskim proizvodnjama (automobilska industrija) (Stupnišek i Virag, 1982.).

Za pougljičenje se koriste i razni gorivi plinovi, koji u kontaktu s užarenom površinom čeličnog izratka disociraju i stvore već poznate uvjete pougljičenja. Razvijen je postupak uvođenja kapljevito metanola (metilnog alkohola CH₃·OH) u komoru s čeličnim izradcima za pougljičenje, gdje isparava na temperaturi pougljičenja i oslobađa potrebne plinske komponente za proces pougljičenja (Gorščak, 2004.).

Šalov (2019.) navodi da je pougljičenje u plinovitim sredstvima moderan način pougljičenja, kod kojega se jednostavno reuglira C-potencijal i koji ima veliku primjenu u velikoserijskim proizvodnjama. Peći za pougljičenje mogu biti jamske, komorne i prolazne.

Prilikom pougljičenja u plinu nužno je imati pod kontrolom temperaturu, vrijeme i sastav atmosfere pougljičenja. Temperaturu je poželjno držati oko 925 °C kako bi se ostvarilo razumno brzo pougljičenje bez negativnih posljedica i kako bi se ostvarila preciznija kontrola dubine pougljičenja. Kako bi postigli što bolje rezultati pougljičenja u plinu obratci se ugrijavaju na temperaturu pougljičenja u gotovo neutralnoj atmosferi poput endo-plina. Kada je temperatura u presjeku obratka jednaka, u peć se uvodi plin za obogaćivanje. Kontrola temperature bi trebala biti preciznosti ± 3 °C pomoću pravilno postavljenih termoparova (Stupnišek i Virag, 1982.).

Ovisno o vrsti plinske atmosfere moguće su tri reakcije pomoću kojih se kontroliraju atmosfere, a one mogu biti:

1. Uz prisustvo ugljičnog monoksida kod kojega se sadržaj CO₂ kontrolira kontinuirano mjerenjem apsorpcije infracrvenog zračenja.
2. Uz prisustvo ugljičnog monoksida i vodika kod kojega C-potencijal mjerimo na temelju kontroliranja sadržaja vodene pare (H₂O) određivanjem točke kondenzacije.
3. Uz prisustvo metana, a C-potencijal atmosfere je moguće kontrolirati preko odnosa parcijalnih pritisaka vodika i metana u zavisnosti o temperaturi (Gabrić i Šitić, 2015.).

U nastojanju postizanja potpune kontrole C-potencijala u procesu pougljičenja, poznajemo još dvije metode pomoću kojih ugljikovodicima određujemo koncentraciju nekih od sastojaka (CO₂, O₂, vodena para), a to su metoda upotrebom tzv. kisikove sonde s kojom se mjeri parcijalni pritisak kisika, te metoda mjerenjem infracrvenim plinskim analizatorom koji radi tako da emitirano zračenje dijeli u dvije zrake gdje jedna prolazi kroz uzorak plinske atmosfere iz peći, a druga kroz referentni plin. Na izlazu detektor mjeri razliku apsorbiranih zraka (Gorščak, 2004.).

Prednosti pougljičenja u plinu:

- velikoserijska i masovna proizvodnja,
- kontrola nastalog plina uz površinu izratka,
- veći izbor različitih metoda.

Nedostaci pougljičenja u plinu:

- opasnost od zapaljivosti, požara i eksplozije,
- otrovnost plinova (Pinjušić, 2020.).

Postoji par inačica plinskog pougljičenja. Jedna od njih je plinsko pougljičenje čvrstim sredstvima kod kojeg se u pretkomori peći proizvodi plin za pougljičenje od drvenog ugljena i aktivatora. Druga inačica je plinsko pougljičenje uz isparavanje u peći za pougljičenje, gdje smjese (terpentin, aceton, etilni alkohol) isparavaju uz Ni-katalizator (Vulin, 2020.).

5.2.4. Cementiranje uz pougljičenje u vakuumskoj peći

Za razliku od plinskog pougljičenja, kod vakuumske se C-potencijal određuje zasićenjem ugljika na površini čelika i vremenom pougljičenja kod određenih temperatura. Postupak se odvija na temperaturi 900 do 1040 °C i u plinskoj atmosferi koja može biti sastavljena od vodika, ugljikovodika, smjese ugljikovodika i smjesa ugljikovodika i dušika (Liščić, 1981.).

Vakuumska peć je najčešće izrađena od grafita ili keramike, zbog visokih tlakova koji smiju biti do 0,4 bara. Razlog je sprječavanje prevelikog taloženja ugljika u peći (Vulin, 2020.).

Prednosti vakuumske pougljičenja:

- čistoća obrađivanih predmeta,
- nema potrebe za endotermnim generatorom,
- više radne temperature, kraće vrijeme, veće debljine sloja pougljičenja,
- bolja mehanička svojstva. se

Nedostaci vakuumske pougljičenja:

- skupa oprema,
- nužan kompromis i balans između procesnih uvjeta radi zadovoljenja potrebnih zahtjeva (dubine pougljičenja, brzine i smanjenja rizika od čađe) (Pinjušić, 2020.).

5.2.5. Cementiranje uz pougljičenje u plazmi

Kod plazma pougljičenja konstantan C-potencijal se ne održava pomoću kisikove sonde već se regulira putem gustoće struje. Glavna karakteristika plazma pougljičenja je bombardiranje

površine čelika koncentracijom ugljikovih iona. Da bi to postigli najprije moramo postaviti čelične predmete u visokotemperaturnu peć, s razmakom među predmetima od 6 mm i oni služe kao katode (Liščić, 1981.).

Čelik se tijekom postupka pougljičenja u plazmi zagrijava do zasićenja ugljikom pri temperaturama 850-1040 °C (Domazet, 2011.).

Unutrašnja konstrukcija peći služi kao anoda te se između katode i anode formira plazma. Plin koji se koristi za plazma pougljičenje je smjesa ugljikovodika (metan ili propan), vodika i argona ili dušika. Za ionizaciju plina se koristi istosmjerni napon od 350 V do 1 kV pri tlaku od 0,013 do 0,33 bara. Atom ugljika u reakciji s površinom obratka difundira u površinu materijala, što čini ovaj postupak bržim od drugih postupaka (Havidić, 2018.).

Ciklus plazma pougljičavanja, nakon zagrijavanja na temperaturu pougljičavanja, sastoji se od dvije faze:

1. Vrijeme pougljičavanja tijekom kojeg je prisutno jako strujno tinjajuće pražnjenje plazme
2. Difuzijska faza – faza bez plazme; faza tijekom koje se visoki površinski sadržaj ugljika snizi na željenu razinu te se postiže tražena dubina pougljičavanja (Vulin, 2020.).

Prednosti plazma pougljičenja:

- skraćeno vrijeme postupka u odnosu na druge,
- povećanje difuzije ugljika i bolja topivost u austenitu,
- niža potrošnja plina i niža cijena,
- nije opasno za okoliš.

Nedostaci plazma pougljičenja:

- visoka cijena opreme,
- nepogodan za velike predmete (Pinjušić, 2020.).

6. PRIMJENA CEMENTIRANJA

6.1. Primjena cementiranja u strojogradnji

Cilj cementiranja je dobivanje što veće tvrdoće površinskog dijela, te otpornosti na trošenje i umor površine, uz zadržavanje početnih svojstava jezgre, kako bi imala što veću otpornost na udarna opterećenja. Na sljedećim slikama prikazani su neki od karakterističnih primjera strojnih dijelova s cementiranim površinama.

Slika 12. prikazuje primjer kotrljajućih ležaja čije su naliježne površine prstenova i radnih elemenata cementirane zbog velikog opterećenja i kontaktnog trenja koji nastaju tijekom rada ležaja.



Slika 12. Cementirani kotrljajući ležaji

(Izvor: <https://windfarmmanagement.skf.com/carburization-or-black-oxidization/>)

Na slici 13. prikazan je primjer cementiranih vratila za prijenos snage i gibanja.



Slika 13. Primjena cementiranja na vratilima
(Izvor: <https://www.sst.net/service/casehardening/>)

Slika 14. prikazuje primjenu cementiranja na različitim vrstama zupčanika.



Slika 14. Primjena cementiranja na zupčanicima (Izvor: <https://www.messer-us.com/heat-treatment-and-powder-metals/thermochemical-heat-treatment-processes>)

6.2. Primjena cementiranja u izradi dijelova poljoprivrednih strojeva

U izradi dijelova poljoprivrednih strojeva cementiranje se primjenjuje kod proizvoda čije radne površine su izložene velikim mehaničkim opterećenjima i trošenju. Primjeri takvih proizvoda su:

- radna vratila (pogonsko, koljenasto, bregasto, kardansko)
- zupčanici mjenjača, diferencijala, ...
- lančanici pogonskih i transportnih lanaca, ...
- valjni ležaji (kuglični, valjkasti, bačvasti, ...), itd.

Slika 15. prikazuje primjenu cementiranja na bregastom vratilu traktora, točnije na vrhovima izbočenih dijelova vratila (bregova) i mjestima nalijeganja ležaja (rukavcima).



Slika 15. Primjena cementiranja na bregastom vratilu traktora Fendt (Radić, 2021.)

Kod kardanskog vratila cementiranje se obavlja na bokovima zuba nazubljenog dijela vratila i križevima kardana, što je prikazano na slici 16.



Slika 16. Primjena cementiranja na kardanskom vratilu traktora Fendt (Radić, 2021.)

Kod pogonskog vratila cementiranje se obavlja na bokovima zuba nazubljenog dijela, mjestima nalijeganja ležaja te mjestima nalijeganja zupčanika i zamašnjaka, što je prikazano slikom 17.



Slika 17. Primjena cementiranja na pogonskom vratilu traktora Fendt (Radić, 2021)

Postupak cementiranja kod poluge upravljača obavlja se na mjestu nalijeganja ležaja, bokovima zuba i mjestu nalijeganja nazubljene letve upravljača prikazanom na slici 18.



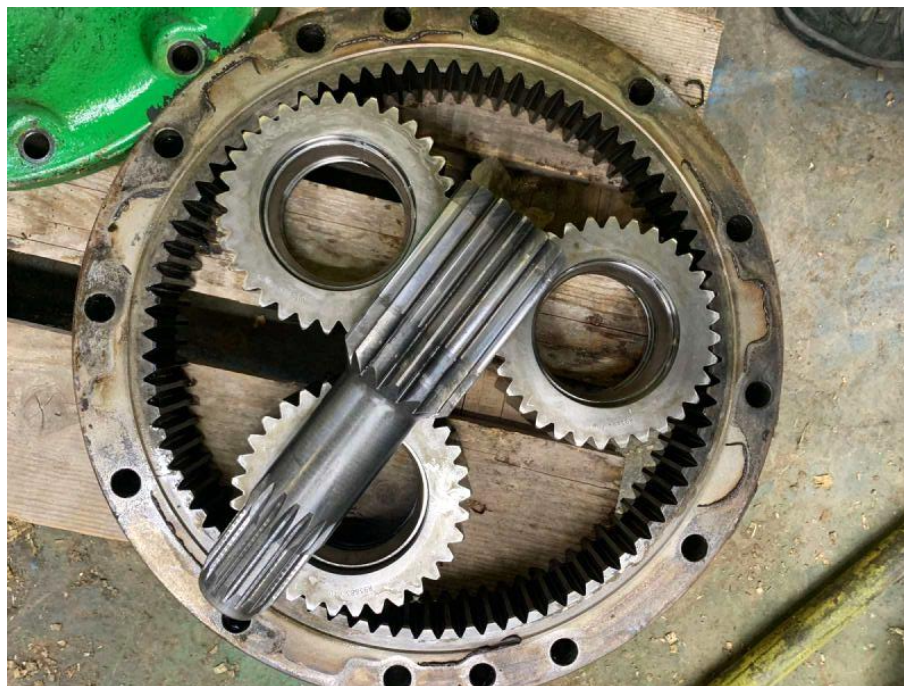
Slika 18. Primjena cementiranja na poluzi upravljača traktora Fendt (Radić, 2021.)

Cementiranje zupčanika diferencijala obavlja se na bokovima zuba i unutarnjim dijelovima koji su u dodiru sa vratilom prikazanim na slici 19.



Slika 19. Primjena cementiranja na zupčaniku diferencijala traktora Fendt (Radić, 2021.)

Slika 20. prikazuje cementirane zupčanike planetarnog prijenosa bočnog prijenosnika traktora. Cementiraju se bokovi zuba koji su izloženi velikom opterećenju i trošenju.



Slika 20. Primjena cementiranja na zupčanicima planetarnog prijenosa bočnog prijenosnika traktora John Deere (Radić, 2021.)

Kod lančanika se cementiraju bokovi zuba i mjesta nalijeganja ležaja, prikazano na slici 21.



Slika 21. Primjena cementiranja na lančaniku hedera kombajna Claas (Radić, 2021.)

6. ZAKLJUČAK

Cementiranje čelika obuhvaća toplinsko-kemijske postupke koji se u pravilu sastoje od različitih načina obogaćivanja površinskih slojeva čelika ugljikom (pougljičenje) i procesa kaljenja (gašenja, naglog ohlađivanja), uslijed čega se ostvaruje tvrdi površinski sloj na cementiranom proizvodu, koji time postaje otporniji na trošenje.

U radu su prikazani tipovi i tehnološke osnove postupaka cementiranja te vrste materijala koji su prikladni za izvođenje istih postupaka. Prikazani su i karakteristični strojni dijelovi koji se obvezno cementiraju prije stavljanja u primjenu.

Cementiranje dijelova poljoprivrednih strojeva primjenjuje se u svrhu povećanja tvrdoće njihovih površina. Budući da se u poljoprivrednoj proizvodnji primjenjuju brojni strojevi, uređaji i alati koji su tijekom eksploatacije izloženi utjecaju čestica tla i drugih agresivnih medija, njihove radne površine se postupcima cementiranja otvrdnjavaju i time im se ostvaruje značajno veća otpornost na različite oblike trošenja.

Na odabranim primjerima dijelova traktora objašnjeni su razlozi primjene postupka cementiranja i učinci koji se ostvaruju navedenom obradom.

7. POPIS LITERATURE

1. Domazet, G. (2011.): smanjenje umora površine zupčanika izborom odgovarajućeg ulja. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
2. Đurkić, A. (2018.): Analiza trošenja kotrljajućih ležaja trakastog transportera za sjeme suncokreta u pogonu za prešanje tvornice ulja Čepin. Diplomski rad, Poljoprivredni fakultet u Osijeku
3. Gabrić, I.; Šitić, S. (2015.): Materijali II. Skripta, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split
4. Gojić, M. (2010.): Površinska obradba materijala Udžbenik, Metalurški fakultet Zagreb, Sisak
5. Golubić, S. (2019.): Tehnički materijali I dio. Udžbenik, Veleučilište u Bjelovaru
6. Goršćak, Đ. (2004.): Poboljšanje procesa difuzijskog stvaranja karbinih slojeva. Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
7. Grilec, K.; Jakovljević, S.; Marić, G. (2015.): Tribologija u strojarstvu. Udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
8. Haviđić, G. (2018.): Utjecaj pozicioniranja dijelova pri pougljičenju u krutom sredstvu na rezultate dubine pougljičenja. Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Strojarski odjel Karlovac
9. <https://windfarmmanagement.skf.com/carburization-or-black-oxidization/> (14.7.2021.)
10. <https://www.sst.net/service/casehardening/> (14.7.2021.)
11. <https://www.messer-us.com/heat-treatment-and-powder-metals/thermochemical-heat-treatment-processes> (15.7.2021.)
12. Ivušić, V. (1998.): Tribologija. Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb
13. Jelaska, D. (2005.): Elementi strojeva. Skripta, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split

14. Kovačević V.; Vrsaljko D., (2011.): Inženjerstvo površina – Tribologija. Nastavni materijali, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Zagreb
15. Kožuh, S. (2010.): Specijalni čelici. Skripta, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet Sisak
16. Kraljević, J. (2020.): Vrste toplinskih obrada i njihova primjena na dijelovima poljoprivredne tehnike. Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek
17. Liščić, B.; Stupnišek, M.; Cajner, F.; Filetin, T. (1991.): Toplinska obradba – Praktikum Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
18. Liščić, B. (1981.): Termokemijski postupci. Metalbiro, Zagreb
19. Marković, R.; Milinović, A. (2009.): Mikrostruktura i svojstva duplex (C+N) slojeva. Tehnički vjesnik, 16 (1), 25-29.
20. Pavlović, A. (2020.): Trošenje klipa i košuljice cilindra motora te zupčanika reduktora traktora. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
21. Pinjušić, K. (2020.): Utjecaj temperature na dubinu pougljičenja. Završni rad, Sveučilište u Karlovcu, Strojarski odjel Karlovac
22. Poretti, R. (2008.): Primjena tvrdih slojeva u zaštiti od trošenja radnih dijelova poljoprivredne mehanizacije. Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet Osijek.
23. Razum, T. (2016.): Ispitivanje prionjivosti tvrdih PACVD prevlaka na alatnom čeliku za topli rad. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
24. Stupnišek, M.; Cajner, F. (2001.): Osnove toplinske obrade metala. Udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb

25. Stupnišek, M.; Matijević, B. (2000.): Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja metala. Zbornik Znanstveno stručnog skupa s međunarodnim učešćem „Toplinska obradba metala i inženjerstvo površina“, Zagreb, 8.06.2000., 53-62
26. Stupnišek, M.; Virag, Z. (1982.): Novi matematički model plinskog pougljičavanja čelika. Sveučilišna naklada Liber, Zagreb
27. Šalov, B. (2019.): Tehnologija izrade pužnog vratila motokultivatora. Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek
28. Vulin, M. (2020.): Sklonost čelika pougljičavanju. Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Strojarski odjel Karlovac.

8. SAŽETAK

Cementiranje čelika je postupak obrade koji se sastoji od termokemijske obrade pougljičenja (obogaćivanjem površinskog sloja materijala ugljikom), kaljenja (dovođenjem pougljičenog sloja u martenzitnu strukturu) i niskotemperaturnog popuštanja proizvoda. Primjenjuje se za površinsku toplinsku obradu konstrukcijskih dijelova kod kojih se zahtijeva visoka tvrdoća na površini i povećana otpornost trošenju. U ovom radu prikazani su različiti tipovi postupaka cementiranja i njihove tehnološke osnove, te vrste materijala koji su prikladni za izvođenje iste obrade. Na odabranim dijelovima traktora, čije su površine tijekom rada izložene povećanom trošenju, objašnjeni su razlozi primjene postupaka cementiranja i učinci koji se njima ostvaruju.

Ključne riječi: termokemijska obrada, cementiranje, primjena cementiranja, zaštita od trošenja

9. SUMMARY

Steel carburising is a technological process consisting of thermochemical treatment of carbonization (by enriching of the surface layer of material with carbon), hardening (by bringing the carbon layer into the martensitic structure) and low-temperature tempering of the product. It is used for surface heat treatment of structural parts that require high surface hardness and increased wear resistance. This paper presents different types of carburising processes and their technological basis, as well as the types of materials that are suitable for performing the same treatment. On selected parts of the tractor, whose surfaces are exposed to increased wear during operation, the reasons for the application of carburising procedures and the effects they achieve are explained.

Key words: thermochemical treatment, carburizing, carburising application, wear resistance

10. POPIS TABLICA

| | | |
|------------|---|---------|
| Tablica 1. | Podjela slučajeva trošenja | str. 9 |
| Tablica 2. | Upute za izbor materijala u uvjetima abrazije | str. 10 |
| Tablica 3. | Podjela postupaka oplemenjivanja materijala | str. 13 |
| Tablica 4. | Čelici za cementiranje | str. 18 |

11. POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|---------|
| Slika 1. | Jedinični događaj abrazije | str. 3 |
| Slika 2. | Shematski prikaz mikrobrazdanja i mikrorezanja | str. 4 |
| Slika 3. | Shematski prikaz mikronaprnuća i mikroumora | str. 4 |
| Slika 4. | Jedinični događaj adhezije | str. 5 |
| Slika 5. | Jedinični događaj umora površine | str. 6 |
| Slika 6. | Faze jediničnog događaja tribokorozije | str. 7 |
| Slika 7. | Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja površina | str. 11 |
| Slika 8. | Dijagram postupka cementiranja | str. 17 |
| Slika 9. | Mikrostruktura cementiranog zupčanika izrađenog iz čelika 16MnCr5 | str. 19 |
| Slika 10. | Utjecaj vremena držanja izratka (na temperaturi cementiranja) na dubini cementiranog sloja za različita sredstva cementiranja | str. 20 |
| Slika 11. | Kruto sredstvo za cementiranje (granulat) | str. 21 |
| Slika 12. | Cementirani kotrljajući ležaji | str. 27 |
| Slika 13. | Primjena cementiranja na vratilima | str. 28 |
| Slika 14. | Primjena cementiranja na zupčanicima | str. 28 |
| Slika 15. | Primjena cementiranja na bregastom vratilu traktora Fendt | str. 29 |
| Slika 16. | Primjena cementiranja na kardanskom vratilu traktora Fendt | str. 30 |
| Slika 17. | Primjena cementiranja na pogonskom vratilu traktora Fendt | str. 30 |
| Slika 18. | Primjena cementiranja na poluzi upravljača traktora Fendt | str. 31 |
| Slika 19. | Primjena cementiranja na zupčanicu diferencijala traktora Fendt | str. 31 |
| Slika 20. | Primjena cementiranja na zupčanicima planetarnog prijenosa bočnog prijenosnika traktora John Deere | str. 32 |
| Slika 21. | Primjena cementiranja na lančaniku hedera kombajna Claas | str. 32 |

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijek
Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek
Sveučilišni diplomski studij, smjer Mehanizacija

Diplomski rad

Primjena postupaka cementiranja u izradi dijelova poljoprivrednih strojeva

Anto Radić

Sažetak:

Cementiranje čelika je tehnološki postupak koji se sastoji od termokemijske obrade pougljičenja (obogaćivanjem površinskog sloja materijala ugljikom), kaljenja (dovođenjem pougljičenog sloja u martenzitnu strukturu) i niskotemperaturnog popuštanja proizvoda. Primjenjuje se za površinsku toplinsku obradu konstrukcijskih dijelova kod kojih se zahtijeva visoka tvrdoća na površini i povećana otpornost trošenju. U ovom radu prikazani su različiti tipovi postupaka cementiranja i njihove tehnološke osnove, te vrste materijala koji su prikladni za izvođenje iste obrade. Na odabranim dijelovima traktora, čije su površine tijekom rada izložene povećanom trošenju, objašnjeni su razlozi primjene postupaka cementiranja i učinci koji se njima ostvaruju.

Rad je izrađen pri: Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek

Mentor: prof. dr. sc. Goran Heffer

Broj stranica: 40

Broj slika: 21

Broja tablica: 4

Broj literaturnih navoda: 28

Broj priloga: -

Jezik izvornika: hrvatski

Ključne riječi: termokemijska obrada, cementiranje, primjena cementiranja, otpornost trošenju

Datum obrane:

Stručno povjerenstvo za obranu:

1. doc. dr. sc. Ivan Plaščak, predsjednik
2. prof. dr. sc. Goran Heffer, mentor
3. dr.sc. Ivan Vidaković, član

Rad je pohranjen u: Knjižnica Fakulteta agrobiotehničkih znanosti u Osijeku, Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Vladimira Preloga 1.

BASIC DOCUMENTATION CARD

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek
University Graduate Studies, course Mechanization

Graduate thesis

Application of carburising processes in the production of parts

Anto Radić

Abstract:

Steel carburising is a technological process consisting of thermochemical treatment of carbonization (by enriching of the surface layer of material with carbon), hardening (by bringing the carbon layer into the martensitic structure) and low-temperature tempering of the product. It is used for surface heat treatment of structural parts that require high surface hardness and increased wear resistance. This paper presents different types of carburising processes and their technological basis, as well as the types of materials that are suitable for performing the same treatment. On selected parts of the tractor, whose surfaces are exposed to increased wear during operation, the reasons for the application of carburising procedures and the effects they achieve are explained.

Thesis performed at: Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek

Mentor: prof. dr. sc. Goran Heffer

Number of pages: 40

Number of figures: 21

Number of tables: 4

Number of references: 28

Number of appendices: -

Original in: Croatian

Key words: thermochemical treatment, carburising, carburising application, wear resistance

Thesis defended on date:

Reviewers:

1. doc. dr. sc. Ivan Plaščak, president
2. prof.dr.sc. Goran Heffer, mentor
3. dr.sc. Ivan Vidaković, member

Thesis deposited at: Library, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Vladimira Preloga 1.