

# Primjena postupaka nitriranja u izradi dijelova poljoprivrednih strojeva

---

Šakota, Hrvoje

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:151:958669>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-19**



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**

Hrvoje Šakota

Diplomski sveučilišni studij Mehanizacija

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

**Diplomski rad**

Osijek, 2021.

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

Hrvoje Šakota

Diplomski sveučilišni studij Mehanizacija

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

**Diplomski rad**

Osijek, 2021.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Hrvoje Šakota

Diplomski sveučilišni studij Mehanizacija

**PRIMJENA POSTUPAKA NITRIRANJA 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
2.2. Oblici trošenja.....	5
3. ZAŠTITA OD TROŠENJA.....	7
3.1. Izbor materijala triboelemenata.....	8
3.2. Zaštita površina od trošenja.....	9
4. TOPLINSKA OBRADA.....	12
4.1. Vrste postupaka toplinske obrade.....	12
4.2. Toplinsko-kemijska obrada.....	15
5. NITRIRANJE.....	17
5.1. Materijali za nitiranje.....	18
5.2. Postupci nitiranja.....	19
5.2.1. Nitiranje u plinu.....	20
5.2.2. Nitiranje u solnim kupkama.....	21
5.2.3. Nitiranje u plazmi.....	22
6. PRIMJENA NITRIRANJA.....	25
6.1. Primjena nitiranja u strojogradnji.....	26
6.2. Primjena nitiranja u izradi dijelova poljoprivrednih strojeva.....	27
7. ZAKLJUČAK.....	30
8. POPIS LITERATURE.....	31
9. SAŽETAK.....	34
10. SUMMARY.....	35
11. POPIS TABLICA.....	36

12. POPIS SLIKA.....37

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

BASIC DOCUMENTACION CARD

## 1. UVOD

Tribologija je znanost i tehnika o površinama koje su u dodiru i relativnom gibanju te o pojavama koje pritom nastaju. Pojam tribologije prvi put je službeno naznačen 1966. godine u izvještaju Radne Grupe Ministarstva prosvjete i znanosti Ujedinjenog Kraljevstva, koju je vodio Peter Jost (Ivušić, 1998.).

U srednjem su vijeku postupke toplinske obradbe, osobito cementiranja mačeva i helebardi, preuzeli alkemičari, pa su i do danas sačuvani primjerci recepata s pomalo egzotičnim i nepotrebnim dodacima drvenom ugljenu kao sredstvu za pougljičenje. Prva poznata sustavna opažanja znanstvenog značenja potječu iz 1720. od R.A.F. Reaumura, koji je uočio promjenu obujma čelika kaljenjem i pokušao ju je znanstveno objasniti. Da bi se potpuno definirao određeni postupak toplinske obradbe, treba, prema dijagramu postupka, kvantificirati parametre. Za utvrđivanje temperature postupka najčešće služe ravnotežni dijagrami stanja (npr. dijagram željezo-ugljik), odnosno tzv. dijagrami TTS (engl. Time, Temperature, Solution - vrijeme, temperatura, otapanje), dok se za utvrđivanje potrebne intenzivnosti ohlađivanja obično upotrebljavaju dijagrami TTT (engl. Time, Temperature, Transformation - vrijeme, temperatura, pretvorba). Integralna (prava, čista) toplinska obradba postupak je u kojem se ugrijava cijela masa obratka, a kemijski se sastav ne mijenja namjerno. Nasuprot tome, pri termodifuzijskim se obradbama hotimice mijenja kemijski sastav površinskih slojeva obratka radi promjene njihove strukture, a time i svojstva (LZMK, 1976.).

## **2. TROŠENJE MATERIJALA**

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama (Grilec i sur., 2017.).

Trošenje predstavlja oštećenje površine ili odstranjenje materijala s jedne ili s obje strane dviju čvrstih površina koje su u dodiru tijekom gibanja. Djelatni uvjeti trenja utječu na međupovršinsko trošenje u danom tribosustavu. U većini slučajeva do trošenja dolazi površinskim interakcijama na neravninama. Svojstva čvrstog tijela su promijenjena, barem na površini ili blizu površine kada je materijal na površini istisnut, ali i kada je malo ili nimalo materijala izgubljeno zbog promjena na mikro i nanorazini. Trošenje može biti ili poželjno ili nepoželjno ponašanje materijala. Poželjno trošenje predstavlja pisanje olovkom, obrada odvajanjem strugotina, poliranje i struganje, što zahtijeva kontrolirano trošenje. Nepoželjno trošenje je gotovo u svim strojnim primjenama kao kod ležajeva, brtvila, nazubljenih alata i bregastih osovina (Kovačević i Vrsaljko, 2011.).

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina (Ivušić, 1998.).

Posljedice su trošenja promjene geometrije površina uzajamno pokretnih dijelova. Istraživanja su pokazala kako je preko 50 % zastoja strojarskih sustava izazvano trošenjem strojarskih pokretnih sklopova (Dunder, 2015.).

### **2.1. Mehanizmi trošenja**

Premda postoji neizbrojno veliki broj slučajeva trošenja, većina je autora suglasna da su samo četiri osnovna mehanizma trošenja (Ivušić, 1998.):

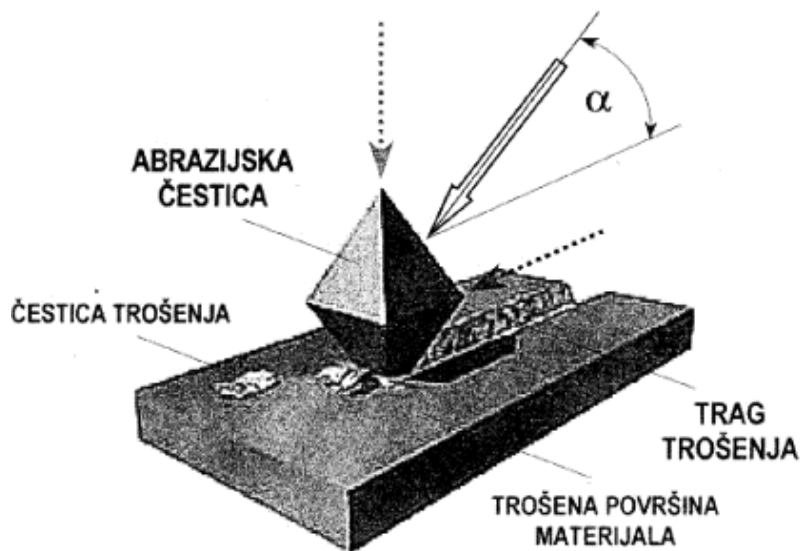
- Abrazija,
- Adhezija,
- Umor površine,



– Tribokorozija.

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikro-rezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja. Postoje dvije vrste situacija u kojima može doći do abrazivnog trošenja. Abrazija gdje su dva tijela u kontaktu i abrazija gdje su tri tijela u kontaktu (Grilec i sur., 2017.).

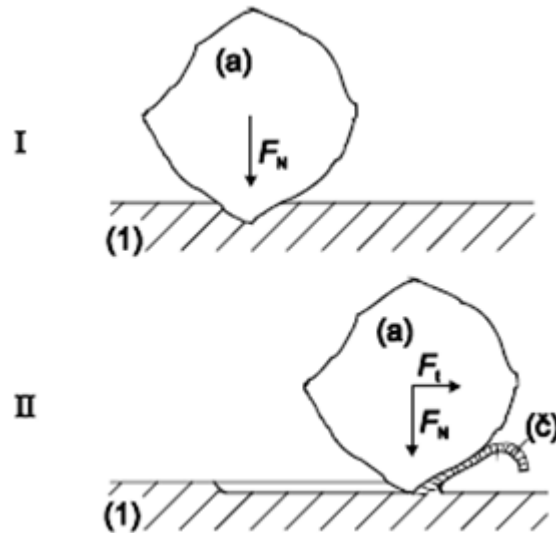
Teorijski, abrazija se može prikazati kao proces mikrorezanja između pravilne četverostrane piramide i ravne površine kao što će biti prikazano slikom 1. U tom slučaju materijal četverostrane piramide je veće tvrdoće od materijala ravne površine, piramida djeluje na ravnu površinu silom pod kutom  $\alpha$  te uslijed toga i geometrije piramide dolazi do mikrorezanja, odvajanja čestica trošenja i pojave traga trošenja. Abrazivna sredstva mogu biti: kamen, ugljen, cement, keramika i sl. Pošto su abrazivi uglavnom mineralnog podrijetla, često se abrazija zove i mineralno trošenje (Šušnjar, 2015.)



Slika 1. Teorijski model abrazije (Izvor: Šušnjar, 2015.)

Pošto se mehanizmi trošenja prikazuju jediničnim događajima, abrazija se može prikazati kao proces mikrorezanja u dvije faze jediničnog događaja. Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze, prikazane slikom 2.:

- I faza - prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$ ,
- II faza - istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_t$ .



Slika 2. Jedinični događaj abrazije (Izvor: Ivušić, 1998.)

Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza. Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze:

- Faza I - Nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina,
- Faza II - Raskidanje adhezijskog spoja. Čestica trošenja ostaje spontano “nalijepljena” na jednom članu kliznog para,
- Faza III - Otkidanje čestice (eventualno). Oblik čestica trošenja ovisi o uvjetima, a uglavnom je listićast (Ivušić, 1998.).

Otpornost na adhezijsko trošenje ovisi o sklonosti stvaranju mikrozavarenih spojeva kliznog para i jakosti uspostavljenih adhezijskih veza. Osnovni kriterij za ocjenu otpornosti na adhezijsko trošenje materijala tribopara je njihova tribološka kompatibilnost. Tribološka kompatibilnost je prikladnost za rad u kliznom paru i bolja je za materijale koji nisu sklони

mikrozavarivanju u međusobnom dodiru. Suprotna je metalurškoj kompatibilnosti tj. uzajamnoj topljivosti metala u krutom stanju (Grilec i sur., 2015.).

Umor površine i potpovršina (dubinska površina) uočen je za vrijeme cikličkih promjena naprezanja: ponovljenog kotrljanja (rolling) odnosno ponovljenog klizanja (sliding). Ponovljeni ciklusi opterećenja i rasterećenja kojima se materijal podvrgava mogu izazvati stvaranje potpovršine ili površinskih pukotina, koje na kraju, nakon kritičnog broja ciklusa, mogu rezultirati u prekidu površine i stvaranju velikih fragmenata, ostavljajući velike jame (pits – ‘pitting’). Prije te kritične točke nakon više ciklusa dolazi do zanemarivog trošenja, što je suprotno od mehanizama trošenja uzrokovanog adhezijskim ili abrazijskim trošenjem, gdje trošenje izaziva postupnu istrošenost (deterioration) od početka kretanja. Mehanizam zamora operativan je na međupovršini. Površine u kontaktu (‘mating’) doživljavaju velika naprezanja koja se prenose na međupovršinu. Maksimum tlačnih naprezanja javlja se na površini, a maksimum smičnih naprezanja javlja se na nekoj udaljenosti od površine. Kemijski potpomognute deformacije i lom rezultiraju u porastu trošenja površinskih slojeva u statičkim i dinamičkim uvjetima kotrljanja i klizanja (‘rolling and sliding’). Kemijski potpomognut rast pukotina (najčešće kod keramike) uobičajeno se označava kao statički zamor. U prisustvu dodatnih rasteznih naprezanja i vodene pare kod pukotine u keramici brzo dolazi do pucanja veza, brže stvaranje pukotina i ubrzanje trošenja zamorom (Kovačević i Vrsaljko, 2011.).

Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem (Grilec i sur., 2015.).

## **2.2. Oblici trošenja**

Korozija je spontano razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija-plina, kapljevine ili krutih agresivnih čestica, a zbog kemijskih ili elektrokemijskih procesa. Također, korozija je promjena na površini ili unutrinu koja izaziva gubitak materijala i promjenu svojstava. Postoji više vrsta korozije, te ona može biti opća ili selektivna. Od selektivnih tipova razlikujemo točkastu, kontaktnu, interkristalnu, napetosnu, koroziju u rasporu, eroziju, kavitaciju (Filetin i sur., 2013.).

Korozija kod kliznih ležajeva najčešće je izazvana korištenjem krivog maziva ili izborom krivog materijala ležaja za određene uvjete rada. Svojstva metalnih materijala kliznih ležaja unutar razmatranog tribološkog sustava trebaju biti nepromijenjena ili da se mijenjaju samo u dozvoljenim granicama tijekom dužeg vremenskog perioda. Stoga je bitno da materijal i mazivo budu kompatibilni jer korozija ovisi o njihovim kemijskim i mehaničkim interakcijama. Upotrebom krivog maziva dolazi do oksidacije koja se vidi na površini materijala. Korozija se može spriječiti tako da se izmjene karakteristike maziva tj. da se izabere pravilno mazivo ili izborom materijala ležaja koji je jače otporan na određeni tip korozije (Rac i Vencl, 2005.)

Erozija nastupa uz istovremeno djelovanje agresivnog medija i mehaničkog trošenja uzrokovanog nestrujavanjem ili udaranjem plina, tekućine ili pare koji sadržavaju krute čestice. Dijelimo je na eroziju česticama i eroziju kapljevnom. Erozija česticama je gubitak materijala s površine krutog tijela zbog relativnog gibanja (strujanja) fluida u kojem se nalaze krute čestice. Relativno gibanje se može opisati kao strujanje. Opasnost od pojedinih mehanizama trošenja je visoka kod abrazije, erozije, a niska je ali postoji kod tribokorozije. Erozija kapljevnom je trošenje izazvano strujanjem kapljevine ili plina s kapljicama. Situacija je slična kao kod erozije česticama ali bez krute faze. Zato je isključen abrazijski mehanizam trošenja pa ostaje umor površine kao najopasniji mehanizam trošenja. Također, ukoliko se radi o agresivnom mediju, prijeto opasnost i od intenzivne tribokorozije. Ako se kapljice gibaju brzinom 100 m/s govori se o eroziji kapljicama. Sraz tekućih kapljica koje udaraju u čvrstu površinu pri visokoj brzini je erozija udarom tekućine (erozija mlazom, erozija kapljevnom) (Grilec i sur., 2015.).

Kavitacija uključuje oštećenje površine materijala, uronjenog u tekućinu, zbog udara mjehurića isparene tekućine u površinu. Kavitacijsko trošenje je, ustvari, podvrsta tribokorozijskog trošenja. Javlja se kada se tlak u tekućini snizi na vrijednost tlaka isparavanja te dolazi do pojave mjehurića pare. Oni bivaju nošeni u područje višeg tlaka gdje implodiraju (Žnidarec, 2009.).

### 3. ZAŠTITA OD TROŠENJA

Osnovno razumijevanje prirode i posljedica interakcija materijala na atomskoj razini vodi do racionalnog oblikovanja materijala za odgovarajuće primjene. Novo područje mikro-nanotribologije odnosi se na eksperimentalna i teoretska istraživanja procesa na međupovršinama na atomskoj i molekularnoj razini pa sve do mikrorazine, što predstavlja most između znanosti i tehnike. Razvoj novog područja mikrotribologije, nanotribologije, molekularne tribologije ili tribologije na razini atoma omogućen je novim načinima modifikacije i manipulacije strukturama površina i međupovršina na nanoskali. Dodir na pojedinačnim neravninama važan je za istraživanja u sklopu temeljne tribologije (Bhushan i sur., 1995.).

Polimerni materijali se kao tribološki materijali primjenjuju čisti ili punjeni kao kompoziti, i to najčešće kao premazi ili čvrsta maziva (Kovačević i Vrsaljko, 2011.).

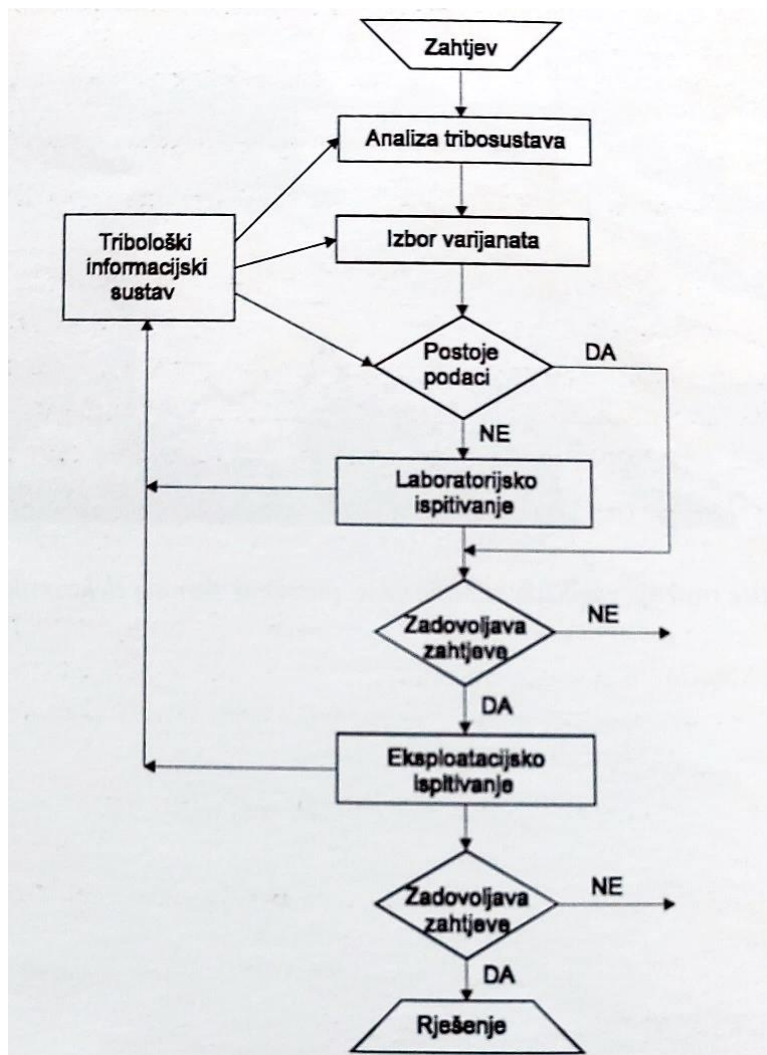
Metali se mogu premazati mazivima koja osiguravaju otpor na gibanje i rezultiraju malim trošenjem. Kod polimernih materijala dolazi do interakcije i bubrenja s mazivom, što još i pogoršava tribološka svojstva. Nedovoljno poznavanje tribologije polimernih materijala ilustrira činjenica da u temeljnim knjigama koje opisuju status polimerne znanosti i inženjerstva nema opisa triboloških svojstava kao što su faktor trenja, otpornost na trošenje i brazdanje i sl. (Kovačević i sur., 2009.).

Tribološke mjere označavaju postupke i metode koje imaju za cilj postizanje prihvatljivih vrijednosti trenja i trošenja u realnim tribosustavima. Osim konstrukcijskih mjera, kojima je svrha izbjegavanje ili smanjenje utjecaja uzroka trošenja, glavne tribološke mjere su:

- Izbor materijala triboelemenata,
- Zaštita površina od trošenja,
- Uhodavanje,
- Podmazivanje (Ivušić, 1998.).

### 3.1. Izbor materijala triboelemenata

Izbor materijala elemenata tribosustava od odlučujuće je važnosti za ispravno funkcioniranje svakog tribosustava. Taj izbor je specifičan po tome što za njega postoji relativno malo brojčanih pokazatelja. Zato je put do optimalnog rješenja mukotrpan i trebao bi se sastojati od nekoliko faza kako je prikazano na slici 3. (Ivušić, 1998.).



Slika 3. Faze izbora materijala triboelemenata (Izvor: Ivušić, 1998.)

Valja napomenuti da otpornost na trošenje nije jedinstveno svojstvo materijala. Slično kao što u mehanička svojstva spadaju čvrstoća, tvrdoća, modul elastičnosti, itd., tako se otpornost na trošenje sastoji od otpornosti na adheziju, abraziju, umor površine, eroziju, kavitaciju itd.

Neophodno je dakle otpornost na trošenje, kao svojstvo materijala, pridružiti određenom mehanizmu trošenja ili njihovoj kombinaciji. Pri analizi tribosustava i izboru varijantnih rješenja uputna je uporaba nekog tribološkog informacijskog sustava (Ivušić i Filetin, 1991.).

### **3.2. Zaštita površina od trošenja**

Znanstveno stručna disciplina koja se bavi postupcima oplemenjivanja površina radi njene zaštite od trošenja i korozije naziva se inženjerstvo površina (engl. „surface engineering“). Primjena postupaka oplemenjivanja površina trenutno je najistraživanije područje tribologije. Postoji velik broj ovih postupaka i unutar tih postupaka njihovih različitih varijanti, a njihov broj stalno raste. Na osnovi temeljnih fizikalnih i kemijskih zakonitosti procesa, izvršena je podjela i klasifikacija postupaka oplemenjivanja površina. Osnovna je podjela na postupke modificiranja i na postupke prevlačenja. Kod postupaka modificiranja površinski sloj nastaje od polazne površine prema unutrašnjosti metala dok se kod postupaka prevlačenja površinski sloj stvara na polaznoj površini (Grilec i sur., 2015.).

Idealna tribološka prevlaka općenito treba ispuniti slijedeće zahtjeve:

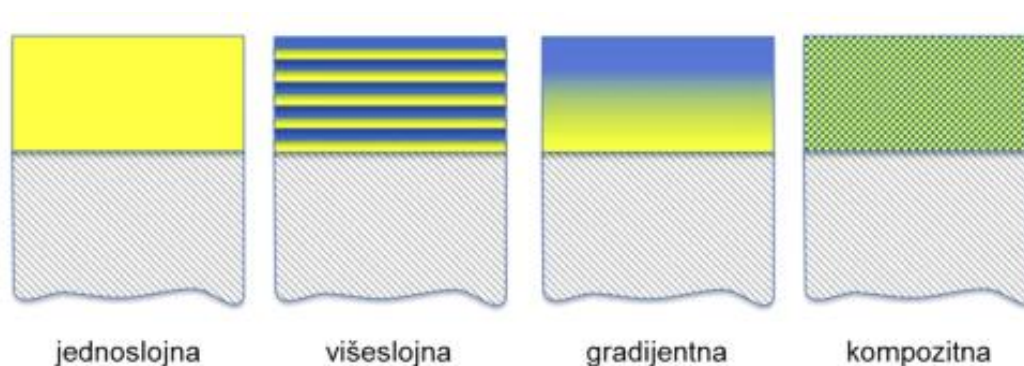
- zadovoljavajuću tvrdoću zbog otpornosti na abraziju,
- zadovoljavajuću žilavost zbog sprječavanja odvajanja od podloge,
- dobru prionjivost (adheziju) na podlogu,
- dobru kemijsku postojanost,
- aktivnost pri stvaranju tribološkog filma na površini prevlake,
- postupnu prilagodljivost podlozi (Poretti, 2008.).

Tvrde prevlake (eng. hard coatings) najčešće se koriste za tribološku zaštitu reznih alata te su uobičajeno sastavljene od nitrida, borida i karbida prijelaznih metala (TiN, CrN, TiAlN, TiBN, TiCN, itd.). Izbor odgovarajuće tvrde prevlake ovisi o specifičnom tribološkom sustavu (materijal obratka, parametri obrade i materijal alata). Glavna uloga tvrdih prevlaka je poboljšanje svojstava alata i produljenje njegovog vijeka trajanja te unaprjeđenje produktivnosti. Osim zaštite površine alata od trošenja, prevlake se koriste radi poboljšanja podmazivanja, povećanja kemijske postojanosti i otpornosti na koroziju. Prevlake uglavnom

nemaju utjecaja na svojstva osnovnog materijala (podloge), ali mogu značajno promijeniti mehanička, toplinska, optička i električna svojstva površine podloge (osnovnog materijala) (Ormuž, 2021.)

Prema mikrostrukтури tvrde prevlake mogu se podijeliti na sljedeće osnovne vrste (slika 4.):

- jednoslojne prevlake (eng. single layer coatings) – sadrže jednu strukturnu fazu,
- višeslojne prevlake (eng. multilayer coatings) – sadrže više slojeva različitog sastava s jasnim prijelazom između slojeva,
- gradijentne prevlake (eng. gradient coatings) – slojevi čiji se sastav postupno mijenja od jednog do drugog sloja, prijelaz između slojeva nije jasno izražen,
- kompozitne prevlake (eng. composite coatings) – jedna faza raspršena u kontinuiranoj matrici.



Slika 4. Vrste struktura tvrdih prevlaka (Izvor: Kovačić, 2015.)

Kod prevlaka nanesenih u cilju povišenja otpornosti na trošenje i visoke temperature te povišenja korozijske postojanosti povezanost svojstava prevlake i podloge još je naglašenija nego kod ostalih vrsta prevlaka. Osim složenosti oblika alata, što ih čini vrlo nepogodnim za prevlačenje, alatni čelici za topli rad zbog niske tvrdoće imaju ograničenu nosivost površine. Ona mora biti takva da pri nanošenju prevlake ne dođe do njezinog deformiranja što bi utjecalo na deformiranje i ljuštenje prevlake, što uvelike ograničava njihovu primjenu. Tvrde prevlake uvijek treba nanijeti na dovoljno tvrdu podlogu kako bi se postigla optimalna svojstva prevlake. Kod podloga niže tvrdoće uslijed opterećenja dolazi do plastične deformacije koja uzrokuje pucanje i u konačnici ljuštenje tvrde, ali krhke prevlake. Na prionjivost, a time i na svojstva prevlake prvenstveno utječe osnovni materijal. Za dobru



prionjivost prevlake nužna je kvalitetna predobrada površine, njena čistoća i u mnogim slučajevima potporni međusloj (npr. nitrirani sloj) (Kovačić, 2015.).

Pored mehaničkog i kemijskog čišćenja površine, prije nanošenja same prevlake uobičajeno se provodi ionsko čišćenje površine otprašivanjem (eng. sputtering). Iako mehaničko i ionsko čišćenje površine otprašivanjem mogu uzrokovati neravnine na površini koje mogu poboljšati adheziju prevlake zbog stvaranje mehaničkih veza sa podlogom, različite nepravilnosti i nečistoće mogu uzrokovati lokalni porast naprežanja (Babić, 2017.).

Jedna od podjela postupaka oplemenjivanja površina, definirana prema vrsti prevlake, prikazana je tablicom 1. (Ivušić, 1998.).

Tablica 1. Podjela postupaka oplemenjivanja površina (Izvor: Ivušić, 1998.)

<p style="text-align: center;"><b>I VRSTA</b> Nanošenje druge vrste materijala</p>	<p style="text-align: center;"><b>II VRSTA</b> Promjena sastava na površini</p>	<p style="text-align: center;"><b>III VRSTA</b> Promjena mikrostrukture na površini</p>
<p><u>A. Navarivanje</u> A1 Plinsko A2 Elektrolučno A3 Plazmom</p> <p><u>B. Naštrcavanje</u> B1 Plamenom B2 Električnim lukom B3 Plazmom B4 Eksplozijom</p> <p><u>C. Platiranje - oblaganje</u> C1 Lemljenjem C2 Eksplozivnim spajanjem C3 Difuzijskim spajanjem</p> <p><u>D. Mješovito</u> D1 Otvrđnjavanje iskrenjem D2 Prevlačenje praškom D3 Organske prevlake D4 Bojanje D5 Vruće uranjanje</p>	<p><u>E. Elektrotaloženje</u> E1 Elektroliza E2 Metalizacija E3 Anodizacija E4 Elektroforeza</p> <p><u>F. Taloženje iz parne faze</u> F1 Fizikalno (PVD) F2 Kemijsko (CVD)</p> <p><u>G. Kemijsko taloženje</u> G1 Kemijsko platiranje G2 Fosfatiranje G3 Kromiranje</p> <p><u>H. Intersticijsko otvrdnuće</u> H1 Cementiranje H2 Nitiranje H3 Karbonitriranje H4 Sulfonitriranje H5 Boriranje</p> <p><u>I. Difuzijska obrada</u> I1 Siliciranje I2 Aluminiziranje I3 Kromiranje I4 Vanadiranje</p> <p><u>J. Kemijska obradba</u> J1 Nagrizanje J2 Oksidiranje</p>	<p><u>K. Mehanička obradba</u> K1 Sačmarenje K2 Valjanje K3 Strojna obradba</p> <p><u>L. Toplinska obradba</u> L1 Plameno kaljenje L2 Indukcijsko kaljenje L3 Kokilno lijevanje</p> <p><u>M. Termomehanička obradba</u> M1 Martensitno deformacijsko otvrdnjavanje</p>

## 4. TOPLINSKA OBRADA

Unošenjem toplinske energije u površinski sloj strojnih dijelova izrađenih od čelika i željeznih ljevova omogućava se površinsko kaljenje (Grilec i sur., 2015.).

Toplinska obrada sastoji se u promjeni toplinskog stanja metala u krutom stanju. Promjenom toplinskog stanja mijenjaju se fazni sastav i struktura, a time i svojstva metala. Posljedice promjene su poboljšanje jednih svojstava, uz često pogoršanje drugih (npr. porast tvrdoće i čvrstoće, ali pad žilavosti i rastezljivosti). Toplinska obrada najviše se izvodi na čeliku (Gabrić i Šitić, 2015.).

Osnovni parametri toplinske obrade su temperatura ( $t$ ) i vrijeme ( $\tau$ ). Izvedeni parametri iz osnovnih su: brzina zagrijavanja, vrijeme progrijavanja, držanje na određenoj temperaturi, brzina hlađenja. Precizna kontrola temperature i vremena potrebna je za izradu visokokvalitetnih dijelova i komponenata s navedenim svojstvima. Stupanj hlađenja iz toplinske obrade pri visokoj temperaturi također je vrlo važan procesni parametar. Svi metali i legure mogu se termički obrađivati (Novak, 2018.).

### 4.1. Vrste postupaka toplinske obrade

Postupaka toplinske obrade ima vrlo mnogo. 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“. Npr. zupčanici, cilindri (tj. košuljice) motora, rukavci u ležajevima jesu elementi od kojih se traži otpornost površine na trošenje. Druga skupina postupaka je zanimljiva za one strojne elemente kod kojih očekujemo i tražimo od „jezgrenog sloja“ točno određena svojstva – koja su uvijek samo odraz faza i strukture (npr. tvrdoća kao svojstvo koje se možda najlakše izmjeri) (Gabrić i Šitić, 2015.).

Razlikuju se sljedeći postupci toplinske obrade:

1. Integralna toplinska obrada:
  - žarenje I. reda,

- žarenje II. reda,
  - gašenje fazno promjenljivih slitina (kaljenje),
  - gašenje fazno nepromjenljivih slitina (homogenizacija),
  - popuštanje,
  - precipitacijsko otvrdnjivanje (starenje, dozrijevanje).
2. Toplinska obrada površinskih slojeva:
- Obrada bez promjene kemijskog sastava (plameno zagrijavanje, indukcijsko zagrijavanje, zagrijavanje visokom energijom),
  - Termodifuzijska (termokemijska) obrada (cementiranje, karbonitriranje, nitriranje i nitrokarburiranje, boriranje, termodifuzija metala itd.) (LZMK, 1976.).

Postupak žarenja, prikazan na slici 5., sastoji se od sljedećih faza:

- sporog zagrijavanja čeličnog obratka do određene temperature,
- zadržavanja na toj temperaturi (trajanje ovisi o veličini presjeka obratka) ili osciliranja oko temperature žarenja,
- sporog hlađenja do temperature okoline (Pomenić, 2020.).



Slika 5. Dijagram toplinske obrade žarenja (Izvor: Deželić, 1988.)

Brzina hlađenja nakon žarenja mora biti podešena prema svojstvima čelika. Kod legiranih čelika, kod kojih su linije pretvorba u TTT-dijagramu pomaknute udesno prema višim vremenima, hlađenje mora biti izrazito sporo kako se izradak ne bi zakalio. Postupak žarenja bira se u ovisnosti o početnom stanju (fazama i strukturi). Pri odabiru postupka treba voditi računa o tome da se povećanjem temperature žarenja povećava trošak energije, radnog

vremena, opreme, a povećava se i opasnost od oksidacije i razugljičenja površine izratka (Gabrić i Šitić, 2015.).

Kaljenje čelika toplinska je obrada s ciljem postizanja što veće tvrdoće nakon gašenja i postizanje što jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku. Kaljivost čelika se prema euronormi 52-83 definira samo kao sposobnost pretvorbe u austenit (Krumes, 2000.).

Postupak kaljenja sastoji se od:

- ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i progrijavanja na toj temperaturi,
- držanja na temperaturi austenitizacije (sa svrhom otapanja ugljika i legirajućih elemenata u austenitu),
- gašenja (sa svrhom postizanja martenzitne mikrostrukture) (Stupnišek i Cajner, 2001.).

Postupci površinske toplinske obrade bez promjene kemijskog sastava (ugrijavanje plamenom, indukcijom, visokom energijom) sastoje se od ugrijavanja kojim se u kratkom vremenu samo u površinske slojeve obratka unosi radi austenitizacije ograničena količina topline. Kaljenje, tj. otvrdnjavanje pretvorbom austenita u martenzit, bainit itd., zbiva se prema već opisanome mehanizmu, ali s tom razlikom što se nije austenitizirala cijela masa, pa nema prokaljivanja. Zbog posebno brzog ugrijavanja određenih lokaliteta do temperature austenitizacije remeti se redosljed otapanja (npr. ferita i karbida) i otežava homogenizacija austenita. Uređaj za plameno ugrijavanje površinskih slojeva sastoji se od plamenika i sapnica, pa se površinski sloj odmah nakon austenitizacije gasi vodom. Gorivi plin najčešće je smjesa acetilena i kisika, no primjenjuje se i posebno pripremljena smjesa prirodnog plina i kisika. Takvo je ugrijavanje posebno prikladno za nelegirane i niskolegirane konstrukcijske čelike za poboljšavanje (obično se proizvodi prethodno poboljšaju) ili za obratke od sivog lijeva, osobito za one velikih dimenzija, npr. za vodilice postolja alatnih strojeva, ali i za svomjake, vratila, koljenaste i grebenaste osovine te zupčanike. Postupak je pogodan za veće serije, jer gotovo za svaki oblik i dimenzije obratka treba izraditi poseban sustav plamenika i sapnica. Uza sve prednosti, kao što su kratko ugrijavanje, neznatna opasnost od deformacije ili puknuća obratka, jednolična kvaliteta zakaljivanja, neznatna oksidacija itd., ipak se taj postupak

primjenjuje samo za masovnu proizvodnju jer su troškovi njegove provedbe vrlo visoki (LZMK, 1976.).

## 4.2. Toplinsko-kemijska obrada

Toplinsko-kemijski (termokemijski) postupci jesu postupci toplinskih obrada koji se provode istodobnim kemijskim i toplinskim djelovanjem radi promjene sastava, strukture i svojstava površinskih slojeva proizvoda. Ugrijavanje i držanje proizvoda izvodi se u aktivnom mediju koji može biti u čvrstom, tekućem, plinovitom ili plazmatičnom stanju. Primjenom ovih postupaka povisuje se otpornost na trošenje, i to više nego što je moguće toplinskim obradama bez promjene sastava površinskog sloja, povisuje se postojanost na korozijsko djelovanje okoline te se induciraju prenaprezanja povoljnog predznaka i veličine u površinskim slojevima predmeta. Ove obrade posebno su aktualne za proizvode nepravilnih geometrijskih oblika za koje je teško ili čak nemoguće izraditi odgovarajući oblik plamenika ili induktora (Golubić, 2019.).

Uz kemijsko i toplinsko djelovanje provodi se i termodifuzijska ili termokemijska obrada kojom se mijenjaju kemijski sastav, struktura i svojstva površinskih slojeva. Obradak se zagrijava i drži u aktivnom sredstvu, koje može biti u čvrstom, kapljevitom, plinovitom ili plazmatičnom stanju. Tijekom termokemijske obrade mogu se razlikovati tri procesa:

- oslobađanje kemijskog elementa iz aktivnog sredstva prevođenjem u atomno stanje, za što je potreban kemijski aktivator,
- adsorpcija atoma na površinski sloj metala. Adsorpcija može biti fizikalna (na temelju van der Waalsovih privlačnih sila) ili kemijska (kemisorpcija), kada se stvaraju čvrsti spojevi adsorbiranih atoma s atomima površinskih slojeva, adsorpcija je brz, egzoterman proces,
- difuzija adsorbiranih atoma u unutrašnjost (LZMK, 1976.).

Prema tehnologiji izvođenja, postupci se mogu podijeliti na:

- Cementiranje – pougljičavanje + kaljenje,
- Karbonitriranje – s kaljenjem ili bez kaljenja,

- Nitriranje,
- Nitrokarburiranje,
- Boriranje (Poretti, 2008.).

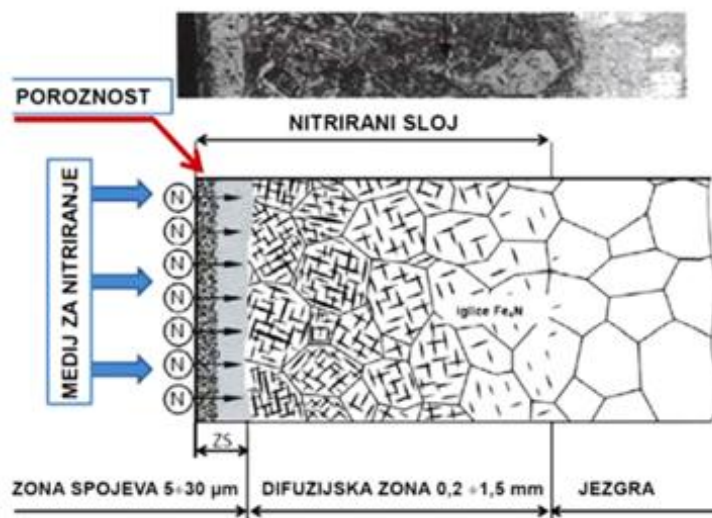
Termokemijskom obradom u površinske se slojeve uvode ugljik (pougljičenje), dušik (nitriranje), istodobno ugljik i dušik (karbonitriranje i nitrokarburiranje), bor (boriranje) itd., a eksperimentira se i s uvođenjem metala. Kratki opis navedenih termokemijskih obrada (LZMK, 1976.):

- Pod cementiranjem se razumijeva uvođenje ugljika (pougljičenje) ili istodobno ugljika i dušika (pougljičenje i podušičenje, karbonitriranje), te kaljenje da bi površinski slojevi čelika postali tvrdi. Cementiraju se proizvodi od nelegiranih i legiranih kvalitetnih ili plemenitih čelika, s najviše 0,25 % ugljika, koji će u radu biti izloženi trošenju i udarcima.
- Nitriranje je termo-kemijska obrada kojom se površinski slojevi obogaćuju dušikom, a nitrokarburiranje je istodobno obogaćivanje površinskih slojeva i dušikom i ugljikom. Za razliku od otvrdnjavanja pri cementiranju i karbonitriranju, prilikom nitriranja i nitrokarburiranja površinski slojevi otvrdnjavaju stvaranjem mješanaca u  $\alpha$ -željezu i stvaranjem nitrida ili karbonitrida s kromom, aluminijem, molibdenom i vanadijem, koji su legirni sastojci čelika.
- Prilikom boriranja površinski se slojevi čeličnog obratka obogaćuju borom, pa nastaju boridi željeza. Njihova je tvrdoća 1800-2100 HV<sub>0,2</sub>, što im daje izvanrednu otpornost na trošenje. Nakon boriranja na površini nastaje zona spojeva koja se sastoji od borida, a ispod nje je difuzijska zona nezasićena borom. Borirati se može u granulatu, solnoj kupelji ili plinu. Boriranje je prikladno za sve vrste čelika, iako se najbolje boriraju nelegirani čelici s 0,3-0,6 % ugljika.

## 5. NITRIRANJE

Nitriranje je toplinsko-kemijski postupak modificiranja površine koji se temelji na difuziji dušika u površinski sloj obrađivanog predmeta. Temperatura nitriranja ispod je temperature A1, pa stoga jezgra obrađivanog predmeta ne doživljava nikakve mikrostrukturne promjene, uz uvjet da je temperatura prethodno provedenog popuštanja ili žarenja bila viša od temperature nitriranja. Nitriranjem se postiže: visoka površinska tvrdoća, povećanje otpornosti na (osobito adhezijsko) trošenje, kontaktne pritiske, umor materijala, koroziju, trošenje i povećanje dinamičke izdržljivosti pri povišenim temperaturama te sniženje faktora trenja uz malo smanjenje žilavosti i povećanje hrapavosti površine te male ili nikakve deformacije (Kovačić, 2015.).

Povišenje tvrdoće rezultat je promjene kemijskog sastava površinskog sloja pri čemu nastaje zona spojeva i/ili difuzijska zona (slika 6.). Zona spojeva, često se naziva i „bijeli sloj“ debljine do 30  $\mu\text{m}$  sastoji se od nitrida željeza i nastaje kada se premaši rastvorljivost dušika u osnovnom materijalu. Osim željeznih nitrida, zona spojeva može se sadržavati i nitride legirajućih elemenata te karbonitride željeza i legirajućih elemenata. Debljina i sastav zone spojeva ovise o temperaturi nitriranja, vremenu nitriranja, sastavu obrađivanog materijala te postupku nitriranja (sredstvu za nitriranje) (Gojić, 2010.).



Slika 6. Mikrostruktura nitriranog sloja nakon plazmatskog ili plinskog nitriranja

(Izvor: Mateša, 2019.)

## 5.1. Materijali za nitriranje

Čelici za nitriranje čine posebnu skupinu konstrukcijskih čelika, koji mogu biti legirani s 1,0-2,5 % Cr, oko 1 % Al, oko 0,2 % Mo, V i Ni. S navedenim legirajućim elementima (osobito s Al) dušik stvara vrlo tvrde nitride tako da se dobiva vrlo veliki porast tvrdoće na površini predmeta (do 1200 HV<sub>0,1</sub>). Aluminijske čestice AlN koje očvršćuju feritnu rešetku i otežavaju gibanje dislokacija. Titan i krom također se koriste za povećanje površinske tvrdoće, iako se dubina sloja smanjuje s povećanjem njihovog udjela. Od legiranih elemenata kod čelika Al, Cr, V, W, Mo djeluju povoljno na nitriranje budući da stvaraju nitride koji ostaju stabilni sve do temperature nitriranja. Molibden kao nitridotvorac smanjuje rizik od raskrhnuća na temperaturi nitriranja (Krumes, 2000.).

Alatni čelici se nitriraju u solnoj kupki, plinu, ili plazmi pri odgovarajućim temperaturama (od 450 do 580 °C) s različitim trajanjima i s ciljem postignuća veće otpornosti na trošenje. Kako se nitrirani alat ne smije brusiti, nužno je da alat bude prethodno kaljen, popušten te brušen na mjeru (promjene dimenzija tijekom nitriranja su neznatne) (Novosel i sur., 1996.).

Za postupak nitriranja i nitrokarburiranja pogodni su svi čelici, čelični lijev, sivi lijev i titanove legure. Legirni čelici zbog izlučivanja nitrida u difuzijskom sloju dobivaju veću otpornost na trošenje i omogućuju primjenu većih površinskih pritisaka. Od svih legiranih elemenata koji se koriste u komercijalnim čelicima, aluminijski, krom, vanadij, volfram i molibden su posebno poželjni u postupku nitriranja iz razloga što tvore nitride koji su stabilni na temperaturama nitriranja. Molibden koji je ujedno i glavni nitridotvorac pomaže u sprječavanju krhkosti pri temperaturama nitriranja. Ostali legirni elementi kao nikal, bakar, silicij i mangan, ne pridonose značajnom povećanju karakteristika nitriranog sloja. Čelici koji se uglavnom primjenjuju za postupak nitriranja su oni koji sadrže jedan ili više elemenata nitridotvoraca. Pošto je aluminijski najbolji nitridotvorac, čelici sa povećanim sadržajem aluminijskog (0,85-1,5 % Al) pružaju najbolje rezultate nitriranja. Krom također pospješuje svojstva čelika nakon nitriranja. Ukoliko se traži visoka otpornost na trošenje, posebno su prikladni legirani čelici za hladni rad s 12 % Cr i 2 % V. Ako nakon nitriranja ili



nitrokarburiranja treba provesti ravnjanje, deformiranje ili valjanje, za to su prikladni nelegirani čelici (Filetin i Grilec, 2004.).

Nitriranje i nitrokarburiranje primjenjuje se tamo gdje želimo postići sljedeća svojstva:

- Poboljšana otpornost trošenju (prvenstveno adhezija),
- Povećanje tvrdoće u površinskom sloju,
- Veća dinamička izdržljivost ( manja osjetljivost na urez),
- Veća granica razvlačenja i vlačna čvrstoća,
- Poboljšana otpornost na koroziju ( osim kod nehrđajućih čelika),
- Postizanje površinske otpornosti na popuštanje (Režek, 2019.).

## **5.2. Postupci nitriranja**

Primjenom postupaka modificiranja i prevlačenja mogu se postići značajno drugačija svojstva površine obrađivanog materijala u odnosu na jezgru (Kovačić, 2015.).

To se, prije svega, odnosi na povišenje tvrdoće i otpornosti na trošenje, povećanje otpornosti na koroziju i smanjenje faktora trenja. Na taj način značajno se povećava vijek trajanja obrađivanog proizvoda. Kod postupaka modificiranja površinski sloj nastaje od polazne površine prema unutrašnjosti materijala, dok se kod prevlačenja površinski sloj stvara na polaznoj površini materijala (Gojić, 2010.).

Posljednjih desetljeća istraživanja su usmjerena prema razvoju dupleks postupaka koji se sastoje od dva ili više postupka modificiranja i/ili prevlačenja površina. Kombinacijom različitih toplinsko-kemijskih postupaka moguće je objediniti karakteristike obaju postupaka i postići kombinaciju svojstava koja se ne mogu postići svakim postupkom zasebno. Prilikom odabira postupaka ili površinske tehnologije neophodno je u potpunosti uzeti u obzir očekivane radne uvjete alata (Kovačić, 2015.).

Glavna podjela postupaka nitriranja u literaturi se uobičajeno provodi prema aktivnom mediju koji je izvor dušika. Aktivni medij može biti plinoviti (uglikovodici, endoplin), tekući (solne

kupke, npr. Tenifer), čvrsti (kalcijum cijanamid s aktivatorom) i ionizirane plinske atmosfere ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ , ...). Svaki od navedenih medija daje drugačija svojstva i strukturu nitriranog sloja (Režek, 2019.).

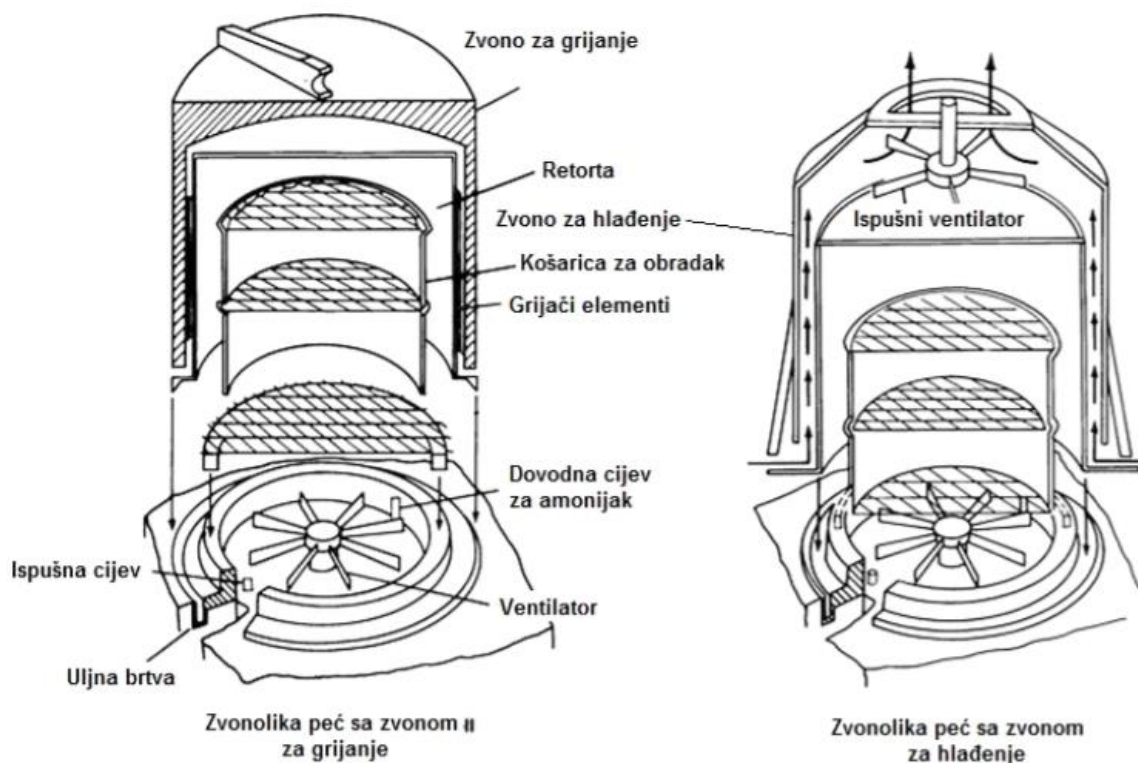
### 5.2.1. Nitiranje u plinu

Plinsko nitiranje je toplinsko-kemijski postupak u kojem disocijacijom amonijaka dušik difundira u površinu osnovnog materijala, pri temperaturama između 500 i 550 °C u trajanju od 4 do 100 sati. U praksi postoje dva načina plinskog nitiranja. Prvi od njih je nitiranje u disociranom amonijaku, a drugi od njih je onaj u kojem se osim disociranog amonijaka upotrebljava i još neki plin ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ , endo ili egzo plin) (Režek, 2019.).

Prije postupka nitiranja čelici moraju biti kaljeni i popušteni, a temperatura popuštanja mora biti barem 30 °C viša od temperature nitiranja, kako bi se osigurala strukturalna stabilnost tokom nitiranja. Plinsko nitiranje može biti jednostruko ili dvostruko. Kod jednostrukog postupka temperature nitiranja iznose između 495 i 525 °C. Ovim postupkom nastaju tvrdi, ali krhki dušikom obogaćen sloj, poznat i kao bijeli sloj. Dvostruki postupak, ima prednost u smislu smanjenja debljine bijelog nitridnog sloja. Prva faza je, osim u duljini trajanja, replika jednokratnog postupka, a zatim slijedi druga faza postupka na temperaturama od 550 do 560 °C. Više temperature tijekom druge faze osiguravaju smanjenje tvrdoće sloja, ali i postizanje veće dubine sloja. Dvostruko nitiranje primjenjuje se za predmete koji se kasnije mogu brusiti i lepati (Krumes, 2000.).

Plinsko nitiranje provodi se u struji amonijaka koji se pri temperaturi postupka od 480-520 °C raspada. Oslobođeni dušik u atomnom stanju difundira zatim kroz površinu čelika u unutrašnjost obratka. Plinski se nitiraju specijalni čelici legirani aluminijem, kromom i molibdenom, s kojim se dušik spaja u nitride. Time se sprečava stvaranje zone spojeva sa željeznim nitridima  $\text{Fe}_2\text{N}$  ili  $\text{Fe}_4\text{N}$ , koji bi nitrirani sloj činili suviše krhkim. Posebno tvrdi površinski slojevi nastaju na čelicima legiranim aluminijem. Nakon plinskog nitiranja obradak se ohlađuje razmjerno sporo, u peći (slika 7.), pa nema opasnosti od toplinskih naprezanja i deformiranja (LZMK, 1976.).

Za razliku od nitriranja i nitrokarburiranja u solima, gdje se mogu koristiti praktički svi željezni materijali, kod plinskog nitriranja čisto željezo i bifazne Fe-C legure nakon nitriranja daju tanak i krhak sloj koji je neupotrebljiv. Znatno poboljšanje nitriranih svojstava dati će tek jaki nitridotvorci kao što su Al, V, Cr, Mo, Ti i Nb. Peći za nitriranje izvode se od vatrootpornog čelika (X15 CrNiSi 25 20 s oko 2,0 % Si) koji nije u stanju apsorbirati dušik. Naprave i stalci za peć izrađuju se od Ni-legure ili od istog vatrootpornog čelika (Tadić, 2012.).



Slika 7. Shema peći za plinsko nitriranje (Izvor: Tadić, 2012.)

### 5.2.2. Nitriranje u solnim kupkama

Nitriranje u solnim kupkama je termokemijski postupak kojim se obradak uranja u soli koje sadrže cijanide (NaCN) s kalcijevim cijanatom (KCNO). Ovaj postupak jedan je od najjednostavnijih i najraširenijih postupka toplinske obrade. Postupak nitriranja u solnoj kupki je jednostavan za provedbu zato jer je potrebno nadzirati samo tri parametra: temperaturu, vrijeme obrade i sastav solne kupke. Najuobičajeniji postupak nitriranja u solnim kupkama je

TENIFER postupak. Osim samog postupka nitriranja TENIFER, postoje varijante: TENIFER Q, TENIFER QP, TENIFER QPQ. Slova u nazivu Q i P potječu od engleskih riječi „Quenching“ (gašenje) i „Polishing“ (poliranje), a odnose se na naknadnu obradu. Tako postupak TENIFER QPQ označuje da je na nekom obratku bilo provedeno nitriranje i naknadna oksidacija. Solna kupka u kojoj se vrši nitriranje sastoji se od soli TF1, dok u kupci u kojoj se vrši hlađenje i naknadna oksidacija je sol AB1 (Augusta, 2011.).

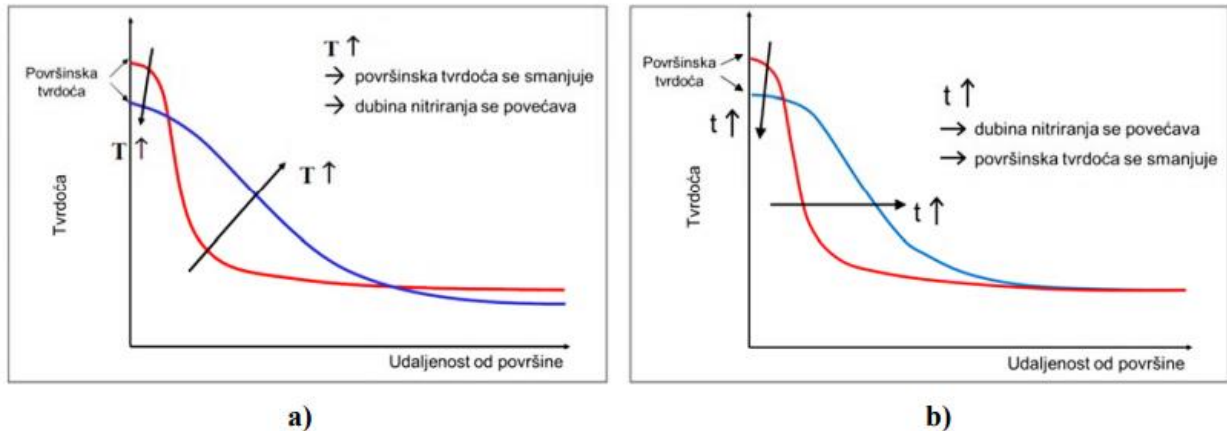
### 5.2.3. Nitriranje u plazmi

Plazmatsko nitriranje je toplinsko-kemijski postupak koje je razvijen kao alternativa plinskom nitriranju. Ono se provodi u vakuumu zbog veće oslobođene energije ioniziranog plina, pri čemu obrađivani predmet predstavlja katodu dok stjenka retorte (vakuumaska komora) predstavlja anodu. Molekule uvedenog plina za nitriranje u vakuumske komori se pod djelovanjem visokog napona (400-1200 V) disociraju i ioniziraju. Ioni velikom brzinom udaraju i difundiraju u površinu obrađivanog predmeta pri čemu ionizirani plin istovremeno služi i kao sredstvo za nitriranje i kao izvor topline za odvijanje procesa (udaranje iona razvija toplinu na površini obrađivanog predmeta). Udaranjem iona na površinu obrađivanog predmeta izbijaju se ili otpošuju atomi željeza koji se pritom vežu sa atomima dušika iz plazme stvarajući željezne nitride koje se adsorbiraju ili talože na površini obrađivanog predmeta. Također, udaranjem iona dolazi do čišćenja površine obrađivanog predmeta od kisika i drugih nečistoća. Dodatkom argona postiže se još učinkovitije čišćenje zbog dodatnog otpošivanja oksida izazvanog sudarima iona argona i površinskog sloja (Kovačić, 2015.).

Na svojstva, sastav i dubinu nitriranog sloja utječu: temperatura, vrijeme procesa, sastav plinova i parametri plazme. Određeni, ali manji, utjecaj imaju i kemijski sastav i mikrostruktura obrađivanog predmeta, prethodna toplinska obrada te hrapavost površine (Mateša, 2017.).

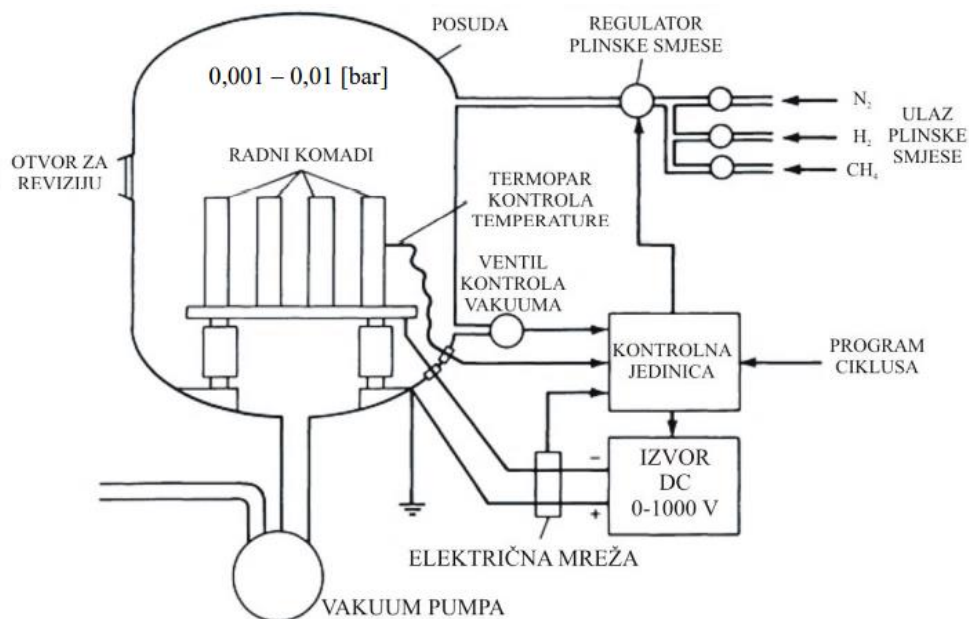
Utjecaj pojedinih parametra je različit, ali u pravilu viša temperatura povećava dubinu zone spojeva i difuzijske zone, ali smanjuju površinsku tvrdoću (slika 8. a). Povećanjem vremena plazmatskog nitriranja povećava se dubina nitriranog sloja, ali se smanjuje površinska tvrdoća

(slika 8. b). Legirajući elementi povećavaju tvrdoću nitriranog sloja, ali smanjuju dubinu uz oštriji prijelaz tvrdoće od površine prema jezgri (Mateša, 2019.).



Slika 8. Utjecaj temperature nitriranja (a) i vremena nitriranja (b) na tvrdoću i dubinu nitriranog sloja (Izvor: Mateša, 2019.)

Za razliku od nitriranja u amonijaku ovo je postupak novijeg datuma. Na slici 9. prikazana je shema procesa plazmatskog nitriranja. Ovaj proces se provodi u komori ispunjenoj razrijeđenim plinovima ( $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ) pri niskom tlaku. Električna vodljivost u razrijeđenim plinovima (vakuumu) vrlo je velika (Gabrić i Šitić, 2015.).



Slika 9. Shema postupka plazmatskog nitriranja (Izvor: Deželić, 1988.)

Nitriranje u plazmi je najnovije razvijen postupak nitriranja i kao takav ima brojne prednosti pred nitriranjem u solnim kupkama i plinskim nitriranjem. To su:

- Kraća vremena nitriranja (ekonomičnije),
- Široke mogućnosti variranja parametara, a time i dobivanje različitih svojstva nitriranog sloja, lakša i preciznija kontrola parametara,
- Ekološki prikladan, za razliku od nitriranja u solnim kupkama di su kupke iznimno otrovne,
- Postupak je prikladan za dijelove i velikih i malenih masa,
- Lakša automatizacija,
- Mogućnost nitriranja svih čelika i lijevova na bazi željeza,
- Mogućnost parcijalnog nitriranja,
- Manje deformacije,
- Mogućnost kontroliranja dubine nitriranog sloja (Režek, 2019.).

Nitrirani dijelovi najčešće se primjenjuju za:

- rezne alate,
- dijelove motornih vozila (zupčanici, osovine, radilice),
- alate za topli rad (prešanje, lijevanje, kovanje),
- vodilice,
- dijelove pumpi (rotori, osovine),
- alate za preradu polimera (ubrizgavanje),
- dijelove u industriji precizne mehanike (Novosel i sur., 1996.).

## 6. PRIMJENA NITRIRANJA

### 6.1. Primjena nitriranja u strojogradnji

S gledišta otpornosti na trošenje nitriranje se primjenjuje s jedne strane za rotirajuće dijelove izvrnute trošenju, a s druge strane za dijelove reverzirajućih i drugih translatornih mehanizama, osobito vodilica. Predmeti nitrirani u solnim kupeljima iskazuju povoljna klizna svojstva kod teških uvjeta suhog trenja pa se ovo nitriranje primjenjuje kod onih elemenata i konstrukcija kod kojih postoje slabe mogućnosti podmazivanja, a koji rade u teškim uvjetima trenja, ili pri povišenim temperaturama (do najviše 480 °C) (Krumes, 2000.).

Nitriranje se najčešće primjenjuje za:

- dijelove motornih vozila: zupčanici, radilice, osovine,
- dijelovi u industriji precizne mehanike,
- dijelove pumpi (rotori, osovine),
- rezne alate,
- translatorne mehanizme, vodilice (Augusta, 2011.).

Na slici 10. prikazani su alati za precizno izrađivanje i obradu strojnih dijelova koji su podvrgnuti nitriranju radi veće otpornosti na trošenje i duži vijek trajanja.



Slika 10. Nitrirani alati za precizno izrađivanje i obradu strojnih dijelova

(Izvor: <https://www.shutterstock.com/search/nitrided+steel> )

Rezultati istraživanja na području povećanja otpornosti prema toplinskom umoru alatnih čelika za topli rad impliciraju mogućnost primjene različitih vrsta nitriranja (Kovačić, 2015).

Također je potrebno nitrirati razne strojne dijelove koji se obrađeni, ali je potrebno obaviti nitriranje radi teških uvjeta u kojima će raditi. Dijelovi su često podvrgnuti velikom trenju, visokim temperaturama, različitim naprezanjima i zbog toga je potrebno obaviti ovu operaciju. Neki od tih dijelova biti će prikazani na slici 11.



Slika 11. Razni strojni dijelovi kojima je potrebno nitriranje  
(Izvor: <https://www.hot-online.de/heat-treatment-nitriding/> )

U strojogradnji su zupčanici (slika 12.) od velike važnosti te je potrebno obavljati nitriranje kako bi se njihov životni vijek produžio. Ovom operacijom povećava im se otpornost na mehaničko trošenje, korozijsko trošenje, te na razna naprezanja materijala.

Trenutno se za nitriranje koristi poseban čelik 38CrMoAlA, u kojemu aluminij i dušik imaju veliki afinitet, koji je glavni legirajući element za stvaranje nitrida i poboljšanje čvrstoće nitriranog sloja (<https://www.vacfurnace.com/carburizing-and-nitriding> ).





Slika 12. Nitrirani zupčanici (Izvor: <https://www.xk-machining.com/en/heat.html> )

## 6.2. Primjena nitiranja u izradi dijelova poljoprivrednih strojeva

Različiti su dijelovi na poljoprivrednim strojevima koji zahtijevaju nitiranje. Jedan od njih je bregasto vratilo koje je na slici 13. Kod bregastog vratila nitiranje se obavlja na bregovima vratila koji su u zahvatu sa ventilima motora i pod djelovanjem su trenja. Također je potrebno nitrirati bokove zubaca zupčanika vratila jer su izloženi velikom trenju i naprezanjima.

Kod koljenstog vratila, koje je prikazano na slici 14., nitiranje se obavlja na mjestu nalijeganja letećeg ležaja zbog trenja koje se javlja prilikom rada vratila. Također se nitiranje obavlja na bokovima zubaca nazubljenog dijela vratila radi smanjenja utjecaja trenja i naprezanja, te zbog smanjenja umora materijala.



Slika 13. Bregasto vratilo traktora Fendt (Fotografija: Šakota, 2021.)



Slika 14. Koljenasto vratilo traktora Fendt (Fotografija: Šakota, 2021.)

Važniji dijelovi manjih pogonskih strojeva koji se koriste u poljoprivredi, poput motokultivatora, (vratila, zupčanici i sl.) također se nitriraju na mjestima koja su izložena intenzivnijem trošenju, budući da su opterećeni prenosom velike snage. Na slici 15. prikazan je primjer vratila diferencijala motokultivatora.



Slika 15. Vratilo diferencijala motokultivatora Goldoni (Fotografija: Šakota, 2021.)

Klipovi hidrauličnih cilindara podiznog mehanizma traktora, slika 16., nitriraju se zbog velikog trenja tijekom rada i njihovo bi trošenje uzrokovalo curenje ulja i kvar hidraulike.



Slika 16. Hidraulički cilindri podiznih mehanizama različitih traktora (Fotografija: Šakota, 2021.)

## ZAKLJUČAK

Danas se postupci nitriranja u plinu, solnim kupkama i plazmi često koriste u uvjetima gdje su mehanička i antikorozivna svojstva te otpornost na trošenje od velike važnosti. Niski troškovi s obzirom na primjenjivost za razne vrste čelika razlog su uspješne i česte primjene ovih tehnika. Niska žilavost nitriranog sloja (niža lomna žilavost) u odnosu na osnovni materijal može negativno utjecati na trošenje alata koji su izloženi visokim smičnim i/ili tlačnim naprezanjima te visokim temperaturama.

Negativne posljedice različitih oblika trošenja očituju se u promjeni oblika strojnih dijelova zbog čega dolazi do lošijeg rada i povećane potrošnje dijelova, a samim time i do većih novčanih izdvajanja za popravke. Da bi se izbjegle negativne posljedice, provode se različiti postupci, odnosno različite zaštitne mjere koje utječu na smanjenje trošenja strojnih dijelova .

U ovom radu obrazložena je jedna od tih mjera – primjena toplinsko-kemijske obrade nitriranja površine čelika kojom se obavlja zaštita strojnih dijelova. Ovom se mjerom ostvaruje poboljšana otpornost trošenju, povećanje tvrdoće u površinskom sloju, veća dinamička izdržljivost, veća vlačna čvrstoća, veća granica razvlačenja, poboljšana otpornost na koroziju, te još mnogo drugih prednosti koje utječu na životni vijek strojnih dijelova kod poljoprivrednih strojeva.

## 7. POPIS LITERATURE

1. Augusta, D. (2011.): Dupleks postupak aluminiziranja i nitriranja čelika, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
2. Babić, D. (2017.): Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje TiN/TiCN prevlaka na visokolegiranim alatnim čelicima za hladni rad. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
3. Bhushan, B.; Israelachwili, J.N.; Landmann, U. (1995.): Nanotribology: friction, wear and lubrication at the atomic scale. Nature, vol. 374, 607-616
4. Cajner, F.; Landek, D.; Šolić S. (2006.): Karakterizacija nitrkoraburiranog sloja, Zbornik sažetaka MATRIB, Vela Luka, 22.-24-06.2006., Hrvatska
5. Deželić, R. (1988.): Metali. Udžbenik, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split
6. Dunder, M. (2015.): Elementi strojeva II – Trenje, trošenje i podmazivanje.  
<https://www.ffri.hr/~mdundjer/?fbclid=IwAR3utm3ATtdVc3YUQ3u2GvGOfXNcR2WTPyO77P4TqezLRkXHakausdcCmCo#> (12.08.2021.)
7. Filetin, T.; Grilec, K. (2004.): Postupci modificiranja i prevlačenja površina. Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb
8. Filetin, T.; Kovačićek, F.; Indof, J. (2013.): Svojstva i primjena materijala. Udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
9. Gabrić, I.; Šitić, S. (2015.): Materijali 2. Udžbenik, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije
10. Gojić, M. (2010.): Površinska obradba materijala. Udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet Sisak
11. Golubić, S. (2019.): Tehnički materijali. Udžbenik, Sveučilište u Bjelovaru

12. Grilec, K.; Jakovljević, S.; Marić, G. (2015.): Tribologija u strojarstvu. Udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
13. <https://adamant.dp.ua/en/2020/02/25/ionno-plazmennoe/> (26.08.2021.)
14. <https://www.hot-online.de/heat-treatment-nitriding/> (26.08.2021.)
15. <https://www.shutterstock.com/search/nitrided+steel> (26.08.2021.)
16. <https://www.vacfurnace.com/carburizing-and-nitriding> (26.08.2021)
17. <https://www.xk-machining.com/en/heat.html> (26.08.2021.)
18. Ivušić, V. (1998.): Tribologija. Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb.
19. Ivušić, V.; Filetin, T. (1991.): Kompjuterizirani tribološki informacijski sistem, Strojarsvo 35, 5/6, 357-361
20. Kovačević, V.; Vrsaljko, D. (2011.): Tribologija. Udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
21. Kovačević, V.; Vrsaljko, D.; Brostow, W. (2009.): Tribologija polimernih materijala Dio 2. Svojstva polimernih materijala i njihovo tribološko ponašanje. Polimeri, 30(3), 131-137
22. Kovačić, S. (2015): Utjecaj nitriranja i prevlačenja na svojstva alatnih čelika za topli rad. Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
23. Krumes, D. (2000.): Toplinska obradba. Udžbenik, Strojarski fakultet Slavonski Brod
24. Leksikografski zavod Miroslav Krleža - LZMK (1976.): Tehnička enciklopedija.
25. Mateša, I. (2017.): Utjecaj postupaka nitriranja na otpornost trošenju cijevi streljačkog oružja. Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
26. Mateša, I. (2019.): Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje nitriranih slojeva. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
27. Novak, S. (2018.): Primjena vakuumske pirolize u obradi otpada. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet Zagreb

28. Novosel, M.; Cajner, F.; Krumes, D. (1996): Alatni materijali. Udžbenik, Strojarski fakultet Slavonski Brod
29. Ormuž, J. K. (2021.): Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje PACVD prevlaka na visokolegiranim alatnim čelicima za hladan rad. Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
30. Pomenić, L. (2020.): Predavanja iz Materijala II - Postupci toplinske obrade čelika. Filozofski fakultet u Puli, Odjel za tehničke studije. [https://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr/pluginfile.php/106117/mod\\_folder/content/0/Predavanja/11%20Postupci%20toplinske%20obrade%20%C4%8Delika.pdf?forcedownload=1](https://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr/pluginfile.php/106117/mod_folder/content/0/Predavanja/11%20Postupci%20toplinske%20obrade%20%C4%8Delika.pdf?forcedownload=1) (24.08.2021.)
31. 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
32. Rac, A.; Vencl, A. (2005.): Metalni materijali kliznih ležaja. Akademska misao, Beograd
33. Režek, A. M. (2019.): Ispitivanje svojstava nitriranih prstena valjnog ležaja. Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
34. Stupnišek, M.; Cajner, F. (2001.): Osnove toplinske obrade metala. Udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
35. Šušnjar, M. (2015.) Trošenje drobilica za kamen. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
36. Tadić, I. (2012.): Dupleks postupak aluminiziranja i nitriranja čelika, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
37. Žnidarec, T. (2009.): Utjecaj mikrostrukture na tribomehanička svojstva čelika. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.

## 8. SAŽETAK

Nitriranje je toplinsko-kemijski postupak modificiranja površine koji se temelji na difuziji dušika u površinski sloj obrađivanog predmeta kojim se postiže povećanje otpornosti na trošenje. Nitriranje je samo jedna metoda zaštite površina od trošenja, te će se u ovom radu objasniti metode i postupci koji se koriste prilikom nitriranja i njihov učinak na nitrirani dio poljoprivrednih i drugih strojeva i alata. Također je ukazano na štetne posljedice različitih oblika trošenja materijala poljoprivrednih strojeva, te su opisani i navedeni čelici koji su prikladni za nitriranje. U zaključku je navedena važnost zaštite strojnih dijelova koji rade u teškim uvjetima i podložni su velikim opterećenjima, stoga su metoda nitriranja i druge metode zaštite od vrlo velike važnosti.

**Ključne riječi:** nitriranje, trošenje materijala, postupci nitriranja, primjena nitriranja



## 9. SUMMARY

Nitriding is a thermochemical process where surface is modified, which involves the introduction of nitrogen atoms into the component surface and increases wear resistance. Nitriding is only one method for surface protection and in this paper methods and procedures that are used for nitriding will be explained, as well as their impact on parts of agricultural and other machines and tools. It is also pointed to the harmful consequences of different types of wear on agricultural machinery and suitable steels for nitriding are described and listed. The conclusion emphasizes importance of machine parts protections, which works in rough conditions and are subjected to big loads, therefore nitriding and other methods of surface protection have big impact.

**Key words:** nitriding, material wear, nitriding processes, use of nitriding

## 10. POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela postupaka oplemenjivanja površina

Str. 11

## 11. POPIS SLIKA

Slika 1.	Teorijski model abrazije	Str. 3
Slika 2.	Jedinični događaj abrazije	Str. 4
Slika 3.	Faze izbora materijala triboelemenata	Str. 8
Slika 4.	Vrste struktura tvrdih prevlaka	Str. 10
Slika 5.	Dijagram toplinske obrade žarenja	Str. 13
Slika 6.	Mikrostruktura nitriranog sloja nakon plazmatskog ili plinskog nitriranja	Str. 17
Slika 7.	Shema peći za plinsko nitriranje	Str. 21
Slika 8.	Utjecaj temperature nitriranju(a) i vremena nitriranju (b) na tvrdoću i dubinu nitriranog sloja	Str. 22
Slika 9.	Shema postupka plazmatskog nitriranja	Str. 23
Slika 10.	Nitrirani alati za precizno izrađivanje i obradu strojnih dijelova	Str. 25
Slika 11.	Razni strojni dijelovi kojima je potrebno nitriranje	Str. 26
Slika 12.	Nitrirani zupčanci	Str. 27
Slika 13.	Bregasto vratilo traktora Fendt	Str. 28
Slika 14.	Koljenasto vratilo traktora Fendt	Str. 28
Slika 15.	Vratilo diferencijala motokultivatora Goldoni	Str. 29
Slika 16.	Hidraulički cilindri podiznih mehanizama različitih traktora	Str. 29

# TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

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

Diplomski rad

Primjena postupaka nitriranja u izradi dijelova poljoprivrednih strojeva

Hrvoje Šakota

## Sažetak:

Nitriranje je toplinsko-kemijski postupak modificiranja površine koji se temelji na difuziji dušika u površinski sloj obrađivanog predmeta kojim se postiže povećanje otpornosti na trošenje. U radu su opisani osnovni mehanizmi i oblici trošenja kojima su izloženi različiti dijelovi strojeva. Nitriranje je samo jedna metoda zaštite površina od trošenja, pa su u ovom radu objašnjene metode i postupci koji se koriste prilikom nitriranja te njihov učinak na nitrirani dio poljoprivrednih i drugih strojeva i alata. Također su opisani su i čelici koji su prikladni za izvođenje postupaka nitriranja. Na odabranim predstavnicima općih strojnih dijelova te dijelova poljoprivrednih strojeva objašnjeni su razlozi primjene nitriranja. U zaključku je navedena važnost zaštite strojnih dijelova koji rade u teškim uvjetima, pri čemu su izloženi velikom trenju i opterećenju, zbog čega im radne površine trebaju biti nitrirane.

**Rad je izrađen pri:** Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek

**Mentor:** prof. dr. sc. Goran Heffer

**Broj stranica:** 37

**Broj slika:** 16

**Broja tablica:** 1

**Broj literaturnih navoda:** 37

**Broj priloga:** -

**Jezik izvornika:** hrvatski

**Ključne riječi:** trošenje materijala, nitriranje, postupci nitriranja, primjena nitriranja

**Datum obrane:**

**Stručno povjerenstvo za obranu:**

1. izv. prof. 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, Mechanization

Graduate thesis

Application of nitriding processes in the production of parts of agricultural machinery

Hrvoje Šakota

**Abstract:**

Nitriding is a thermo-chemical process of surface modification based on the diffusion of nitrogen into the surface layer of a workpiece, which achieves an increase in wear resistance. The paper describes the basic mechanisms and forms of wear to which different parts of machines are exposed. Nitriding is only one method of protecting surfaces from wear, so this paper explains the methods and procedures used in nitriding and their effect on the nitrided part of agricultural and other machines and tools. Steels suitable for performing nitriding processes are also described. The reasons for the application of nitriding are explained on selected representatives of general machine parts and parts of agricultural machines. The conclusion states the importance of protecting machine parts that work in difficult conditions, where they are exposed to high friction and load, which is why their work surfaces need to be nitrided.

**Thesis performed at:** Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek

**Mentor:** prof. dr. sc. Goran Heffer

**Number of pages:** 37

**Number of figures:** 16

**Number of tables:** 1

**Number of references:** 37

**Number of appendices:** -

**Original in:** Croatian

**Key words:** material wear, nitriding, nitriding processes, application of nitriding

**Thesis defended on date:**

**Reviewers:**

1. izv. prof. 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.