

# Utjecaj vrste nitriranja na abrazijsko trošenje

---

**Klobučar, Philip**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2018**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:853862>

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

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



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
SPECIJALISTIČKI STUDIJ STROJARSTVA**

**ZAVRŠNI RAD**

**Philip Klobučar**

**UTJECAJ VRSTE NITRIRANJA NA  
ABRAZIJSKO TROŠENJE**

Mentor:

Tomislav Božić, dipl. ing.

Karlovac, srpanj 2018.



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Trg J. J. Strossmayera 9

HR • 47000 Karlovac • Croatia

tel. +385 (0)47 843-510

fax. +385 (0)47 843-579

e-mail: [referada@vuka.hr](mailto:referada@vuka.hr)



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni / **specijalistički studij**:.....Strojarstvo

Usmjerenje:.....Proizvodno strojarstvo      Karlovac, 04.05.2018.

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student...Philip Klobučar..... Matični broj: 0111415030

Naslov:    Utjecaj vrste nitriranja na abrazijsko trošenje

Opis zadatka:

Završni rad sastoji se od dva dijela, teorijskog i eksperimentalnog.

U teoretskom dijelu rada obraditi termodifuzijske procese nitriranja klasičnog, kratkotrajno-kompleksnog i ionitriranja. Sukladno standardima i propisima obraditi načine kontrole kvalitete odnosno dokazivanja valjanosti provedenih procesa.

Eksperimentalni dio rada izvoditi prema zadanom planu pokusa.

Probne uzorke pripremiti na način koji odgovaraju laboratorijskom ispitivanju abrazijskog trošenja koje je konačni zadatak rada. Procese nitriranja obaviti na u realnoj proizvodnji, onako kako industrija to radi bez posebno diktiranih parametara izvođenja. U suradnji sa laboratorijem FSB-a Zagreb nakon provedenih procesa izvršiti ispitivanje abrazijskog trošenja. Temeljem rezultata ispitivanja izvršiti analizu rezultata i donijeti zaključke o ovisnosti abrazijskog trošenja kao funkcija vrste procesa.

Rad izraditi sukladno pravilniku za izradu završnih radova VuKa.

Zadatak zadan:  
04.05.2018.

Rok predaje rada:  
08.06.2018.

Predviđeni datum obrane:  
15.06.2018.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KARAKTERISTIKE NITRIRANJA</b> .....	<b>5</b>
2.1. POSTUPAK PROVEDBE NITRIRIRANJA .....	7
2.2. DEFORMACIJE.....	11
<b>3. MIKROSTRUKTURA NITRIRANOG ČELIKA</b> .....	<b>12</b>
<b>4. ČELICI ZA NITRIRANJE</b> .....	<b>14</b>
<b>5. POSTUPCI NITRIRANJA</b> .....	<b>17</b>
5.1. PLINSKO NITRIRANJE .....	17
5.2. IONITRIRANJE (PLAZMA NITRIRANJE) .....	20
5.3. NITRIRANJE U SOLNIM KUPKAMA.....	23
<b>6. PROBLEMI</b> .....	<b>26</b>
6.1. KOD PLINSKOG NITRIRANJA .....	26
6.1.1. Čistoća površine .....	26
6.1.2. Disocijacija plina.....	26
6.1.3. Površinske promjene boje .....	26
6.1.4. Eksfolijacija ljuske.....	27
6.1.5. Narančina kora.....	27
6.1.6. Okrhnuća ljuske .....	27
6.1.7. Ljuštenje .....	28
6.1.8. Urušavanje ljuske .....	28
6.2. KOD NITRIRANJA U SOLNIM KUPKAMA .....	28
6.3. KOD IONITRIRANJA .....	28
6.3.1. Dio se pregrijava.....	28
6.3.2. Gubitak nitriranja .....	29
6.3.3. Izbijanje luka .....	29
6.3.4. Okrhnuća ljuske.....	29
6.3.5. Niska površinska tvrdoća .....	29
6.3.6. Ljuštenje .....	30
<b>7. PRIMJENA</b> .....	<b>30</b>
<b>8. SIGURNOST</b> .....	<b>31</b>
<b>9. TROŠENJE</b> .....	<b>32</b>
9.1. ABRAZIJA .....	32

9.2.	OTPORNOST NA ABRAZIJU .....	37
9.3.	ABRAZIJSKO TROŠENJE.....	38
9.4.	SVOJSTVA OTPORNOSTI NA TROŠENJE.....	39
9.5.	ODABIR MATERIJALA OTPORNIH NA ABRAZIJSKO TROŠENJE .....	39
9.6.	EKPERIMENTALNO ODREĐIVANJE OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE.....	41
<b>10.</b>	<b>ISPITIVANJE TROŠENJA NA ABRAZIJU .....</b>	<b>42</b>
10.1.	PROVEDBA IPITIVANJA.....	42
10.2.	NAČIN OBRADRE REZULTATA .....	46
<b>11.</b>	<b>REZULTATI ISPITIVANJA.....</b>	<b>47</b>
<b>12.</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>49</b>
<b>13.</b>	<b>LITERATURA.....</b>	<b>51</b>

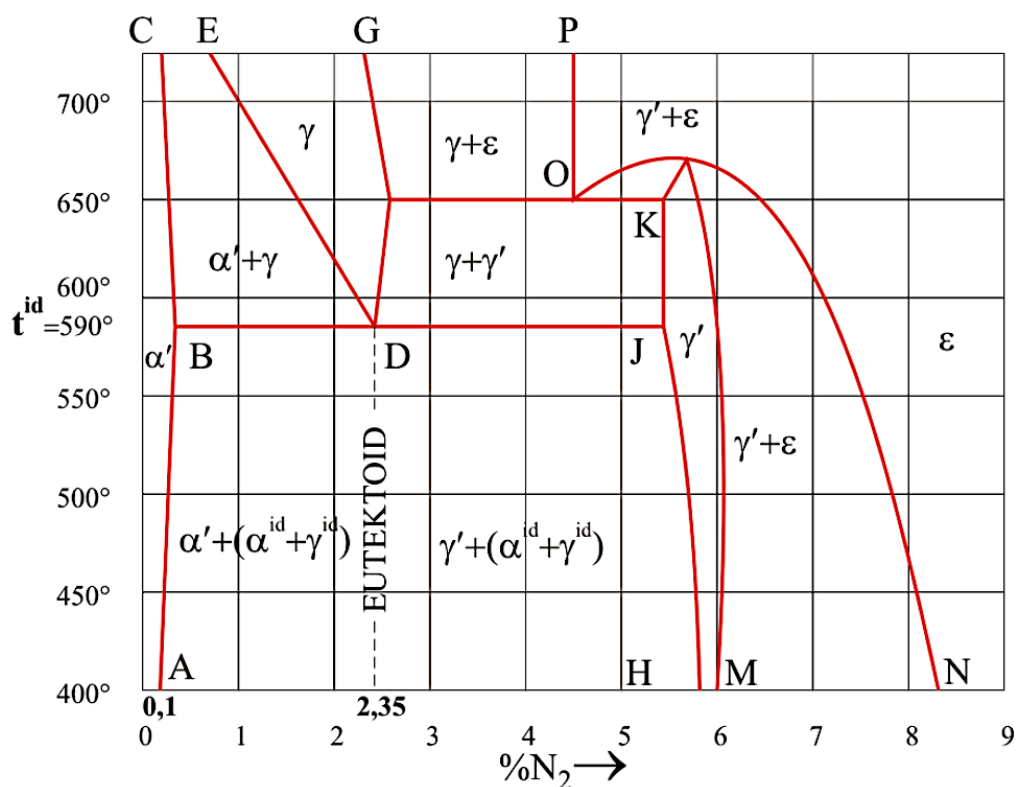
Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija te uz stručnu literaturu.

Zahvaljujem se prof. Tomislavu Božiću, dipl. ing. na mentorstvu i stručnoj pomoći tijekom izrade rada. Posebno bi se htio zahvaliti djelatnicima odjela toplinske obrade Adriadiesel d.d., također, dr.sc. Krešimiru Grilecu, dipl. ing. sa FSB-a Zagreb i Centru za Toplinsku Obradu i njihovim djelatnicima Tihomiru Šoškiću te drugima, bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć.

Philip Klobučar

## 1. UVOD

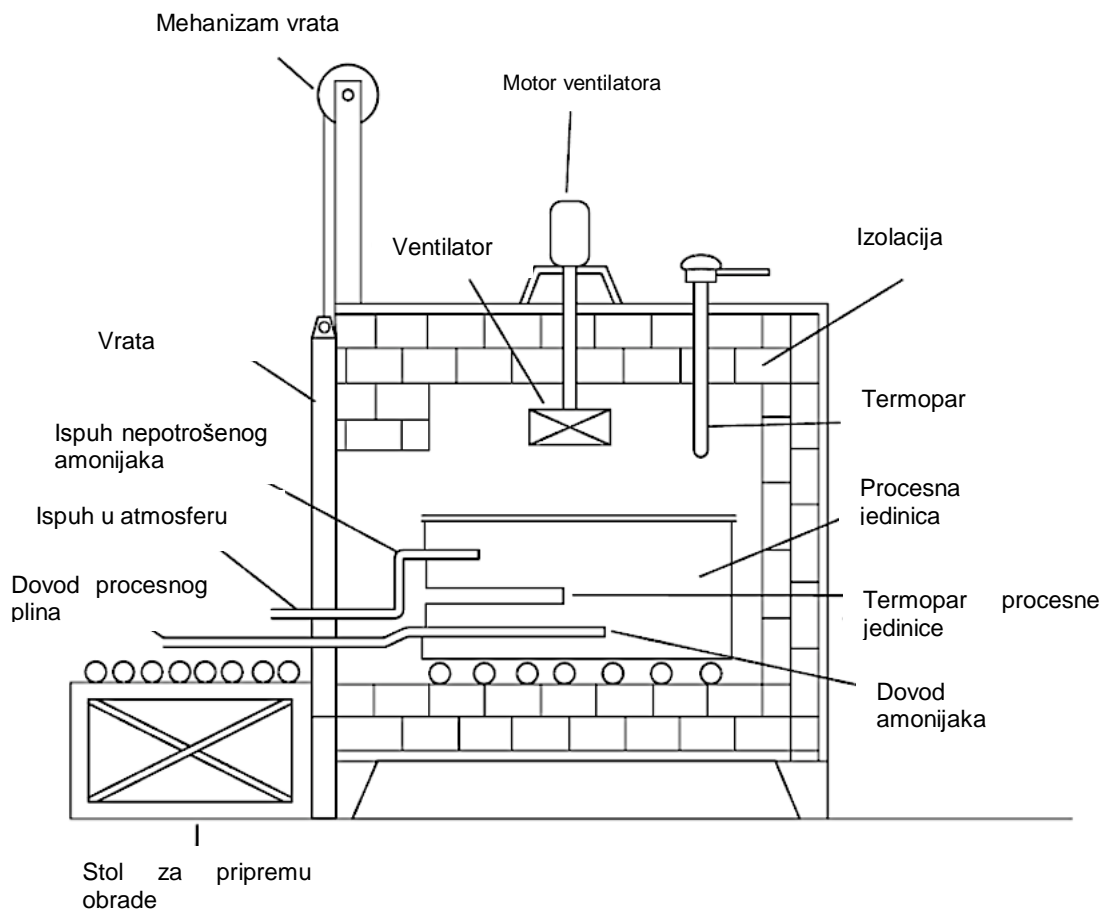
Nitriranje je toplinsko-kemijska obrada kod koje se čelik najprije toplinski obrađuje, a zatim površina obogaćuje dušikom. Nitirati se mogu sve vrste čelika i željeznih slitina, ali je učinak najveći kod čelika i slitina koji sadrže legirne elemente, koji stvaraju temperaturno stabilne nitride: krom, molibden, vanadij, aluminij i neki drugi. Postoji velik broj vrsta čelika koji sadrže prva tri kemijska elementa, prvenstveno radi drugih razloga (prokaljivost, otpornost prema popuštanju itd.), pa je zato nitriranje primjereno relativno velikom broju konstrukcijskih i alatnih čelika. Posebno su za nitriranje primjereni čelici legirani aluminijem. [1]



**Slika 1.1.** Dijagram stanja Fe-N. Dušik je topiv u feritnoj matrici ako mu je maseni udio do 6%. Od 6 do 8% stvara se  $\gamma'$ -faza  $Fe_4N$ , dok iznad 8% nastaje  $\epsilon$ -faza  $Fe_3N$  [5].

Nitriranje je jedan od najvažnijih postupaka površinske termokemijske obradbe koji je u komercijalnoj primjeni od 20-ih godina 20. stoljeća. Pionirskim radom Adolpha

Machleta, koji je primijetio kroz eksperimentiranje da je dušik vrlo topiv u željezu. Difundirani dušik je doveo do povećanja tvrdoće površine kod običnog željeza i niskolegiranih čelika i znatno povećao otpornost prema koroziji. Prvi zahtjev za patent je podnesen 1908., a odobren pet godina kasnije, 1913. Iako je rad Machleta bio jako bitan, njegov rad je ostao uglavnom neprepoznat i zaboravljen. Usporedno, Adolph Fry u Krupp-ovim čeličanicama u Essenu u Njemačkoj radi svoja istraživanja. Zahtjev za patent podnosi 1921, tri godine nakon završetka Prvog svjetskog rata, odobren je 1924. Rradio je tehniku sličnu onoj A. Machleta, gdje se izvor dušika pomoću topline razdvajao na dušik koji je mogao difundirati u površinu. Baš kao i A. Machlet, A. Fry je upotrebljavao amonijak kao osnovni plin, ali nije upotrebljavao vodik za razrijeđivanje plina. Tako je nastao jedno-stupanjski proces nitriranja u plinu kakvog poznajemo i danas. Također je i otkrio da nitriranje stvara veliku površinsku tvrdoću samo na čelicima legiranim kromom, vanadijem, molibdenom, aluminijem, vanadijem i volframom koji svi tvore stabilne karbide. A. Fry je također bio zadužen za razvoj grupe čelika pod nazivom "Nitralloy" koji su u upotrebi još i danas.

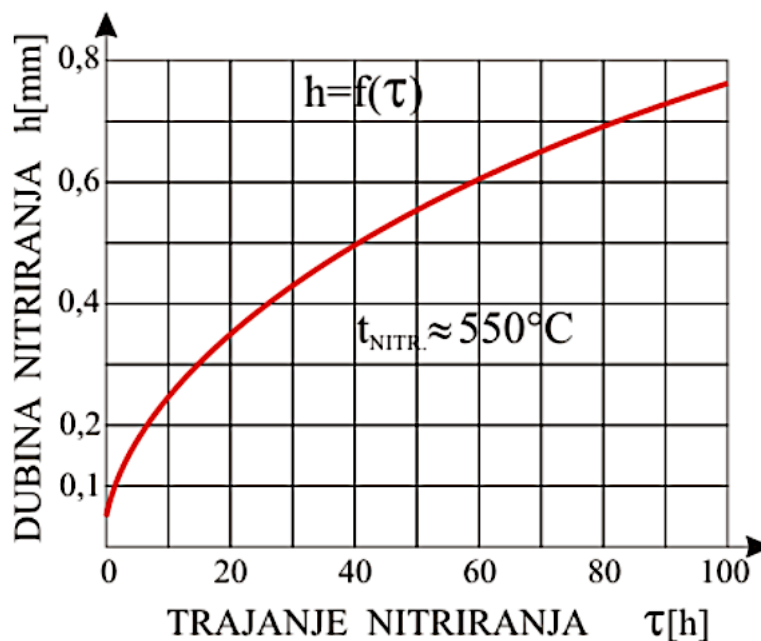


**Slika 1.2.** Shematski prikaz jednostavne peći za nitriranje.



Istraživački rad H. W. McQuaida i W.J. Ketchama u Timken Detroit Axle Company u Detroitu, MI, SAD, fokusirao se na temperature procesa. Odabrane temperature su se kretale između 540°C i 650°C. Gornja temperatura je značajno niža od one koju je koristio A. Machlet, koja se kretala od 480°C do 980°C. Zaključili su da više temperature nitiranja imaju utjecaj na tvrdoću legiranih čelika, ali mali utjecaj na sklonost prema apsorpciji pri tim temperaturama. Također su ustanovili da više temperature povećavaju rizik od stvaranja mrežaste strukture nitrida, naročito na rubovima, zbog veće topljivosti dušika u željezu. Kada su prisutne, mrežaste strukture nitrida uzrokuju prerane greške na površini čelika u obliku pukotina i odlamanja. [2]

Postupak nitiranja se temelji na difuziji dušika u površinski sloj obrađivanog predmeta. Nitiranje se provodi radi postizanja visoke površinske tvrdoće, poboljšanja otpornosti na trošenje i zamor, bolje korozijske otpornosti s neznatnim promjenama u dimenzijama i svojstvima obrađivanih predmeta. [3]



**Slika 1.3.** Dijagram ovisnosti dubine nitiranog sloja ( $h$ ) o trajanju procesa nitiranja  $h=f(\tau)$  [12].

Tajna uspjeha procesa nitiranja među ostalim je u tome što ne zahtijeva promjenu faze iz ferita u austenit, ili nadalje iz austenita u martenzit. Drugim riječima, čelik ostaje u feritnoj fazi (ili cementitnoj, što zavisi o sastavu slitine) tijekom cijelog procesa. Nadalje, zato što se proces hlađenja odvija slobodno, za razliku od naglog hlađenja ili kaljenja, nema promjene faze iz austenita u martenzit što znači da nema promjena

veličina na molekularnoj razini pa tako ni dimenzijskih promjena. Ono što može dovesti i dovodi do promjene dimenzija je otpuštanje zaostalih naprežanja uslijed povišene temperature samog procesa nitriranja.

Uspjeh bilo kojeg postupka toplinske obrade se mjeri u završnoj tvrdoći površine. Među ostalim, tvrdoća je bitan faktor u određivanju namjene materijala i mehaničkim svojstvima. Nitriraju se obično niskolegirani čelici da bi se očvrstnula površina i poboljšala otpornost na koroziju.

Dodatno na klasične postupke nitriranja kao što su plinsko nitriranje, nitriranje u solnim kupkama koje koristi princip dekompozicije cijanida na cijanat i oslobađanje dušika iz soli za difuziju u površinu i ionsko ili plazma nitriranje koje se odvija u vakuumu u prisutnosti dušika i električnog polja, ustvari plazmi ioniziranih atoma koji velikom brzinom udaraju o površinu čelika, razvijeni su i neki novi postupci:

- Oksinitriranje, (Tenifer QPQ), gdje se nakon nitriranja u solnoj kupki predmeti hlade u oksidativnoj solnoj kupki AB1 na temperaturi 350-400°C [2] da bi se dodatno poboljšala otpornost na koroziju,
- Feritično karbonitriranje (kontrolirani proces koji koristi dušik i ugljik da poboljša površinske karakteristike niskolegiranih čelika)
- Izvedenice prethodna dva procesa
- Kontrolirano nitriranje, koji izvedenica klasičnog plinskog nitriranja gdje se svi parametri kontroliraju kompjuterski.

Nitriranje je proces koji dostigao svoju zrelost i postao opće prihvaćen. Nitriranje u solnim kupkama i plinu su se usporedno razvijali od prve polovice dvadesetog stoljeća. Procesi su pronašli svoje mjesto u niskotehnoškim i visokotehnoškim primjenama i postaju sve bolje objašnjeni što pomaže procesnim inženjerima, metalurzima, proizvođačima peći za obradu i ostalim inženjerima.

Razvoj i napredak u procesima i tehnikama je potaknut među ostalim i zbog brige o okolišu i promjene u zakonodavstvu. To je imalo za rezultat da su se uvele efikasnije, djelotvornije i ekonomičnije metode i oprema. Napredak se može zamijetiti kod procesa kao što su, nitriranje u plinu, solnim kupkama, fluidiziranom mediju (bazi) i plazmi.

## 2. KARAKTERISTIKE NITRIRANJA

Definicija: *Nitriranje* (nj. Nitrieren ili Aufsticken, en. Nitriding) je prema DIN 17014-  
“žarenje u sredstvu koje odaje dušik N, s ciljem da se dobije površina obogaćena  
dušikom”. [4]

Kako je i vidljivo iz same definicije, nitriranje je proces površinske toplinske obrade kojim se želi postići da se na površini obrađenih predmetadobije struktura otporna na trošenje. Ta otpornost na trošenje koja se ovim postupkom dobiva, posljedica je stvaranja nitrida, tj. dušikovih spojeva sa željezom, odnosno dušikovih spojeva s elementima kojima su čelici za nitriranje legirani. Sa željezom dušik stvara željezne nitride  $Fe_2N$  i  $Fe_4N$ , a s legirajućim elementima legirne nitride, kao npr.  $AlN$ ,  $CrN$  itd.

Jedinstvene prednosti čine ga nezamjenjivim u slučajevima kada je potrebna:

- visoka otpornost na trošenje,
- otpornost na abraziju,
- otpornost na koroziju,
- postizanje visoke površinske tvrdoće,
- postizanje površinske otpornosti na popuštanje (sve do temp. nitriranja),
- kod visokih okretnih momenata (koljenasto vratilo).

Nitrirati se može svaki, pa i nelegirani čelik, a i željezni ljevovi, ali do velikog povišenja tvrdoće na površini dolazi samo onda, ako u čeliku ima već spomenutih legirajućih elemenata nitridotvoraca. Kod nelegiranih čelika prilikom nitriranja dolazi do velikog povećanja tvrdoće na površini obrađenog predmeta.

Kod primjene postupka nitriranja, u najvećem broju slučajeva, a osobito kad su predmeti izvrgnuti većim površinskim tlakovima, kao i zbog toga da se od raspoloživog čelika dobije optimum njegovih mehaničkih svojstava, predmeti se prije nitriranja poboljšavaju (tj. podvrgavaju se kaljenju i naknadnom popuštanju, višem od buduće temperature nitriranja).

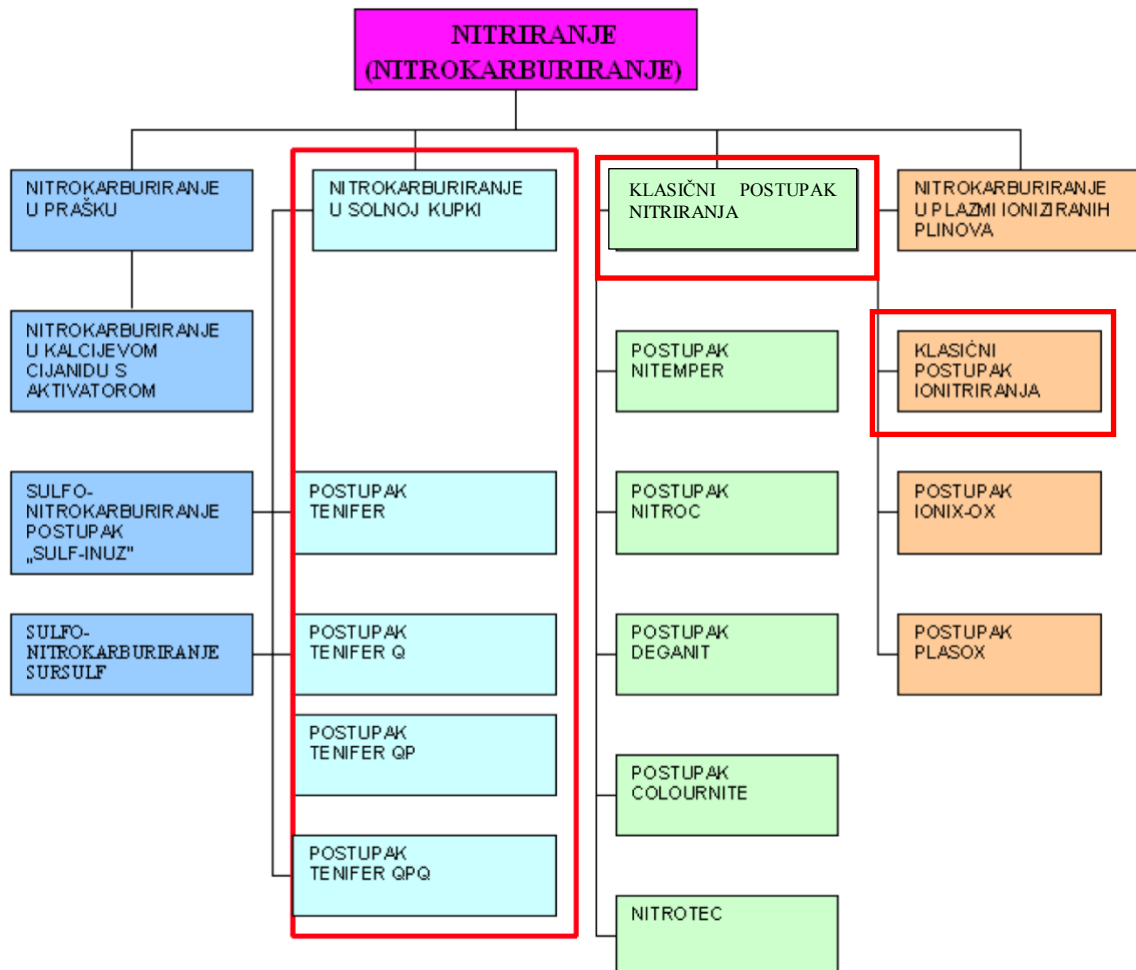
Poboljšavanje prije nitriranja ima još i tu vrlo važnu ulogu, da se dobije sitnozrnata struktura koja olakšava apsorpciju dušika, i koja je potrebna za stvaranje besprijekornog nitriranog sloja na površini. Nakon poboljšanja, a prije nitriranja, slijedi mehanička obradba, kojom treba ukloniti eventualna razugličenja na površini. Ako su dijelovi bili kod mehaničke obradbe izvrgnuti znatnom skidanju strugotine, velikoj

promjeni presjeka, većem broju operacija obradbe ili ravnanju, u cilju otklanjanja naprezanja od obradbe ili ravnanja, treba dijelove prije nitriranja žariti za otklanjanje napetosti, što se provodi na temperaturi od 500-600°C. Na taj se način mogu otkloniti uzroci eventualnih deformacija materijala prije finalne obradbe na mjeru i prije nitriranja. Kako se samo nitriranje provodi kod relativno niskih temperatura (490 do 560°C), dakle znatno ispod granice pretvorbe A<sub>1</sub>, i kako nakon nitriranja ne slijedi naglo ohlađivanje (kaljenje), tako se ovim postupkom dobivaju dijelovi praktično bez ikakvih deformacija, iskrivljenja i naprezanja. To je svakako jedno od najvećih praktičnih prednosti nitriranja, i razlog da se ovaj postupak upotrebljava za dijelove koji su veoma osjetljivi na deformacije. [4]

Kod navedenog poboljšanja prije nitriranja, treba paziti da temperatura popuštanja, bude viša nego što će biti temperatura nitriranja. Osim toga treba znati da bi se čvrstoća postignuta poboljšavanjem mogla smanjiti zbog predugog držanja na temperaturi nitriranja. Nitriranjem se postiže znatno povišenje dinamičke izdržljivosti, tj. otpornosti na zamor, a smanjuje se i opasnost od djelovanja ureza, što u modernoj tehnici kod visokonapregnutih dijelova izvrnutih visokim brzinama rotacije ima osobito značenje. Nitriranjem se također postiže postojanost predmeta na koroziju, tako da su nitrirani dijelovi odmah i zaštićeni protiv korozije. Zbog primanja dušika na površini predmeta nakon nitriranja može se konstatirati da dolazi samo do vrlo neznatnog povećanja volumena, odnosno tzv. "debljanja površine", koje je ovisno o dubini nitriranog sloja i trajanju nitriranja. No ono je redovito unutar granica dopuštenih mjernih odstupanja. [4]

## 2.1. Postupak provedbe nitriranja

Postoji niz postupaka nitriranja (nitrokarburiranja) u plinovima, solnim kupkama i ioniziranim plinovima (slika 1.4). Svaki od navedenih postupaka daje konkretna svojstva i strukturu rubnog sloja.



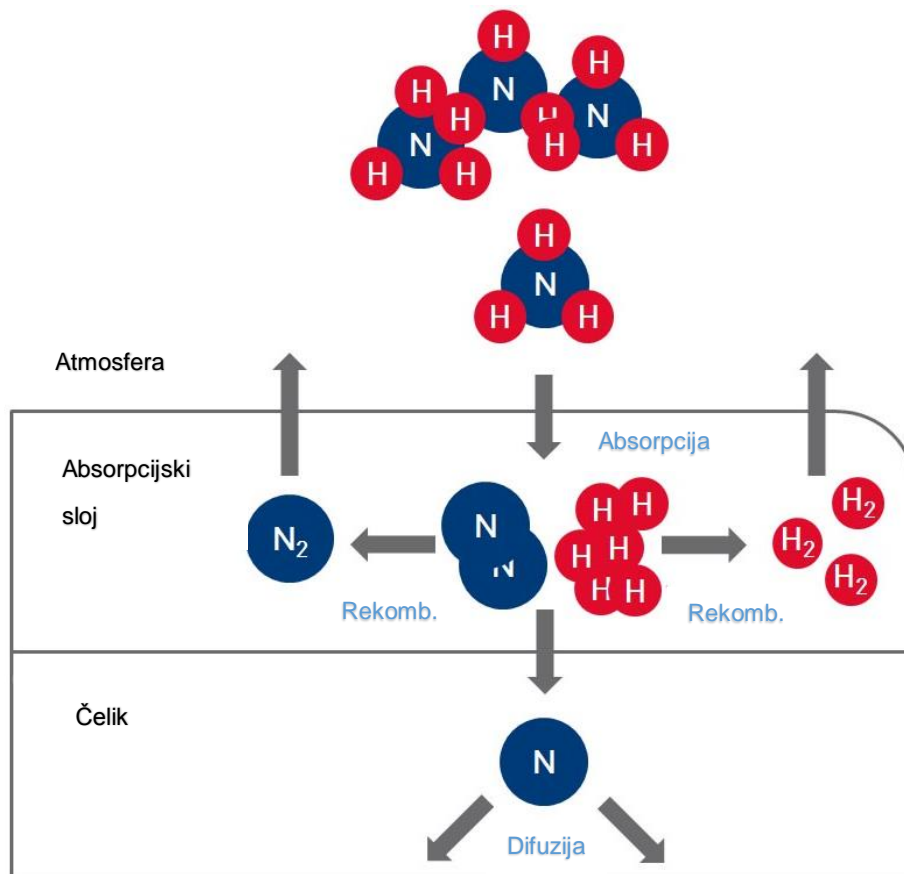
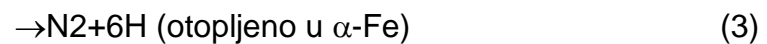
Slika 2.1. Pregled postupaka nitriranja (nitrokarburiranja).

Bitni parametri koji se moraju uzeti u obzir da bi se uspješno ostvario proces nitriranja u pogledu metalurgije i deformacija su:

- Izvor dušika,
- toplina,
- vrijeme,
- sastav čelika.

Kod plinskog nitriranja izvor dušika gotovo uvijek potiče od raspadanja (ili dekompozicije) amonijaka.

Amonijak se počinje raspadati pod utjecajem topline, obično od grijača u peći. Pri uobičajenim temperaturama nitriranja od 500 do 570°C, amonijak je u nestabilnom stanju i raspada se na sljedeći način [4] (slika 5):



**Slika 2.2.** Shematski prikaz procesa plinskog nitriranja.

Amonijak se raspada prema jednadžbi (1). U trenutku raspada, dušik će postojati kao atomarni N “in statu nascendi” i kao takav sposoban je difundirati u metal.

U tijeku nitiranja opažaju se tri faze:

- Disocijacija  $\text{NH}_3$ ,
- ulazak N u  $\alpha$ -Fe, u početku u čvrstu otopinu, da bi se kasnije spojio u  $\text{Fe}_4\text{N}$ , te,
- difuzija u dubinu.

U peć za nitiranje treba stalno dovoditi novi  $\text{NH}_3$ , jer su "neiskorišteni" atomi N nakon disocijacije  $\text{NH}_3$  prešli u molekularno stanje ( $\text{N}_2$ ), a molekularni dušik nije u stanju difundirati. To dovođenje se kontrolira stupnjem disocijacije amonijaka

$$\beta = \frac{N_2 + H_2}{NH_3} \cdot 100, \% \quad , \quad K = \frac{p^2 NH_3}{p_{N_2} \cdot p_{H_2}}$$

p... parcijalni tlakovi

O toj vrijednosti bitno ovisi apsorbirana količina dušika i kvaliteta nitiranog sloja.

Prevelik stupanj disocijacije  $\text{NH}_3$  Kočio bi apsorpciju dušika u čelik, jer bi  $\text{H}_2$  (također povišen u tom slučaju) "zapunio" pore u površini i tako spriječio pristup dušiku. Zato se treba držati uputa iz tablice 1.

**Tablica 1.** *Orijentacija o stupnju disocijacije [4]*

$\vartheta_N, ^\circ\text{C}$	$\beta, \%$
<b>500</b>	18-25
<b>550</b>	25-40
<b>600</b>	40-60
<b>700</b>	55-70

Prijenos dušika je relativno spor proces i oslobađanje vodika iz amonijaka diktira brzinu procesa pa su vremena nitiranja duga, do 120h.

Ugljik sadržan u čeliku jako utječe na intenzivnost difuzije: ona se porastom %C snižava.

Niske vrijednosti topivosti dušika u  $\alpha$ -Fe, u kombinaciji sa visokim parcijalnim tlakovima koji su potrebni za apsorpciju dušika čine upotrebu dušika iz boce nemogućim. Molekularni dušik neće disociirati u atomarni dušik pri temperaturi procesa

nitiranja, i stoga neće biti difuzije. Zbog ovih razloga upotrebljava se amonijak. Površina čelika u kombinaciji sa toplinom djeluje kao katalizator pri raspadanju amonijaka na atomarni dušik koji onda difundira u površinu.

Trajanje nitiranja računa se od trenutka kada površina grijanih predmeta dostigne 500°C.

Nakon završenog nitiranja predmeti se ohlađuju u isključenoj peći uz pojačanu struju  $\text{NH}_3$  sve dok ona ne postigne oko 100°C. Ne dopušta se u peć pustiti struju zraka jer bi moglo doći do nastanka praskavca tj. do eksplozije u peći.

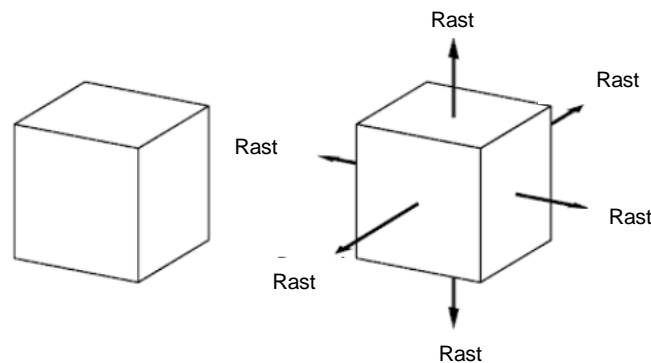
Prosječno treba računati s utroškom plina 50 do 80 l/h  $\text{m}^2$  (uz  $\beta \approx 30\%$ ).



## 2.2. Deformacije

Suprotno uvriježenom mišljenju deformacije se kod nitriranja ipak događaju. Promjene dimenzija proizašle od procesa nitriranja se definiraju kao jednolik rast na neposrednoj površini. Količina rasta je određena sljedećim faktorima i vidi se kao promjena dimenzija:

- Kemijski sastav čelika,
- disocijacija plina ili omjer plinova,
- temperatura procesa,
- vrijeme procesa pri procesnoj temperaturi koje utječe na debljinu zone spojeva.



**Slika 2.3.** *Ilustracija rasta volumena uslijed nitriranja. Veličina promjene je određena vremenom provedenim na zadanoj temperaturi procesa*

Deformacije koje se definiraju kao uvijanje i savijanje, i koje vode do promjene oblika mogu biti rezultat:

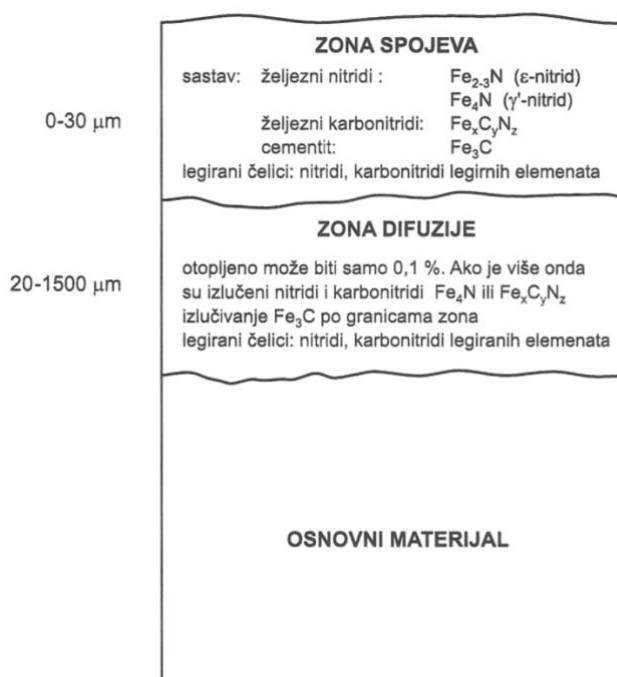
- Miješane zaostale faze koje su posljedica predugog vremena hlađenja pri poboljšavanju (prisutnost zaostalog austenita),
- zaostala naprezanja kao posljedica mehaničke obrade i propuštanje odrađivanja žarenja za redukciju zaostalih naprezanja,
- slaganje obradaka jedan na drugi u komori za obradu,

- biranje krive temperature obrade ako su prisutne zaostale faze. Ako je temperatura procesa viša od temperature kaljenja, bilo koja od zaostalih faza bi se mogla transformirati,
- neprovođenje stabilizirajućih procesa prije nitiranja (duboko pothlađivanje).

### 3. MIKROSTRUKTURA NITRIRANOG ČELIKA

Stvaranje nitrirane površine počinje kao serija početnih klica koje rastu na površini čelika. Te klice kasnije prerastaju u zonu spojeva (*slika 3.1.*). Ovaj sloj je vrlo tvrd i krhak i sastoji se od dvije miješane faze. Ovaj sloj ne difundira u čelik nego ostaje na samoj površini i raste sa vremenom, temperaturom i sastavom plina.

Zona koja je odmah ispod zone spojeva se zove difuzijska zona (*slika 3.1.*). Ova zona je sastavljena od stabilnih nitrida koji se stvaraju u reakciji sa nitridotvornim elementima u čeliku.



**Slika 3.1.** Shematski prikaz površinskog sloja dobivenog nitiranjem [5]

Nitridi započinju svoj rast nukleacijom γ'-nitrida na površini u prisustvu atmosfere za nitiranje. Ovaj nukleacijski proces napreduje dok ne počne stvaranje ε-nitrida.

Ugljik utječe na količinu  $\gamma'$  i  $\varepsilon$ -nitrida, što je veći udio ugljika u čeliku u zoni spojeva će biti više  $\varepsilon$ -nitrida, a što je udio ugljika manji biti će više  $\gamma$ -nitrida [2].

Na debljinu zone spojeva udio ugljika ima skoro nikakav utjecaj. Iako nema utjecaj na debljinu, ugljik određuje sastav zone spojeva. Ako je debljina zone spojeva uvijet, onda treba pomno birati čelik da bi se dobila tražena površinska metalurgija [2].

Debljina zone se može kontrolirati odabirom procesa. Može se kontrolirati razrijeđivanjem atmosfere, dvostupanjskim Floe procesom ili ionitranjem [2].

Da li debljinu zone treba kontrolirati će ovisiti o primjeni obrađenog dijela i njegovim radnim uvjetima.



**Slika 3.2.** *Tipična struktura nitriranog obratka gdje se vidi na vrhu zona spojeva (bijeli sloj), zona difuzije i osnovni materijal [2]*

#### 4. ČELICI ZA NITRIRANJE

U pravilu nitriraju se svi čelici, sivi lijev, čelični lijev (u temperaturnom području 500 - 590 °C) i titanijeve legure (750 - 900 °C). Plinsko nitiranje se ne preporuča za ugljične čelike jer se dobiva krhka površina s malim porastom tvrdoće u difuzijskoj zoni. Legirani čelici, zbog izlučivanja nitrída u difuzijskom sloju, pružaju veću otpornost na trošenje i omogućuju primjenu većih površinskih tlakova [6].

Čelici za nitiranje čine posebnu skupinu konstrukcijskih čelika kao što su na primjer: Č4734 (30CrMoV9), Č4531 (34CrAlNi7), Č4739 (34CrAlMo5), koji su legirani s 1,0 do 2,5% Cr, oko 1% Al, oko 0,2% Mo, a mogu imati i V i Ni. S ovim legirajućim elementima, a osobito s Al, dušik iz sredstva za nitiranje stvara vrlo tvrde nitríde u fino dispergiranom obliku, tako da se poslije nitiranja bez naknadnog kaljenja (gašenja) dobiva izvanredno velik porast tvrdoće na površini predmeta (do 1200 HV0,1) [4].

Među nitridotvorcima kao što su aluminij, krom, vanadij i molibden, krom i aluminij najviše utječu na površinsku tvrdoću. 1% aluminija rezultira većim povećanjem tvrdoće nego 3% kroma, i ne zavisi o udjelu ugljika u čeliku jer aluminij ne tvori karbide i potpuno je slobodan za stvaranje nitrída. Manji udjeli molibdena i vanadija poboljšavaju otpornost kod kaljenja i smanjuju osjetljivost na krhkost kod kaljenja [7].

Viša površinska tvrdoća koja je rezultat dodatnih legiranih elemenata smanjuje tendenciju prijanjanju na površinu s kojom je u kontaktu i time je povećana otpornost na abraziju. Također, povećana površinska tvrdoća povišuje rizik pucanju pri mehaničkom opterećenju.

Posebni čelici za nitiranje obično se nitriraju nakon poboljšanja, a alatni nakon visokog popuštanja, ako su za takvo popuštanje i inače predviđeni (npr. alatni čelici za topli rad, brzorezni čelici).

Temperatura popuštanja prije nitiranja mora biti viša od buduće temperature nitiranja.

Površina predmeta što će se nitirati, mora biti čista od sloja oksida, razugličenja i masnoća. Površinu korozijski postojanih (austenitnih) čelika treba prije nitiranja depasivirati.

Za visoke zahtjeve na kvalitetu treba primjeniti sljedeći red operacija:

- gruba obrada odvajanjem čestica u stanju najbolje obradivosti čelika,
- poboljšanje,
- završna obrada odvajanjem čestica (brušenje),
- žarenje za redukciju zaostalih naprezanja ( $\sigma_p > \sigma_z > \sigma_N$ ),
- eventualno brušenje,
- nitriranje,
- lepanje [4].

**Tablica 2. Kemijski sastav prema DIN EN 10085:2001-07**

Material	Code designation	Material no.		C	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Al
Nitrodur 8515	31CrMo12	1.8515	min.	0.28	0.4	2.8	0.3	-	-	-
			max.	0.35	0.7	3.3	0.5	-	-	-
Nitrodur 8519	31CrMoV9	1.8519	min.	0.27	0.4	2.3	0.15	-	0.1	-
			max.	0.34	0.7	2.7	0.25	-	0.2	-
Nitrodur 8550	34CrAlNi7-10	1.8550	min.	0.30	0.4	1.5	0.15	0.85	-	0.8
			max.	0.37	0.7	1.8	0.25	1.15	-	1.2
Nitrodur 8509	41CrAlMo7-10	1.8509	min.	0.38	0.4	1.5	0.2	-	-	0.8
			max.	0.45	0.7	1.8	0.35	-	-	1.2
Nitrodur 8507	34CrAlMo5-10	1.8507	min.	0.30	0.4	1.0	0.15	-	-	0.8
			max.	0.37	0.7	1.3	0.25	-	-	1.2
Nitrodur 8522	33CrMoV12-9	1.8522	min.	0.29	0.4	2.8	0.7	-	0.15	-
			max.	0.36	0.7	3.3	1.0	-	0.25	-
Nitrodur 8523	40CrMoV13-9	1.8523	min.	0.36	0.4	3.0	0.8	-	0.15	-
			max.	0.43	0.7	3.5	1.1	-	0.25	-
Nitrodur 8524*	8CrMo16	1.8524*	min.	0.06	0.9	3.7	0.4	-	-	-
			max.	0.12	1.2	4.1	0.6	-	-	-

\*Materijal nije standardiziran (vidi Bosch Rexroth standard ZN 93008-110:2013-03-28)

**Tablica 3. Mehanička svojstva nakon kaljenja**

Material	16 ≤ d ≤ 40 mm			40 < d ≤ 100 mm		
	R <sub>m</sub> in MPa	R <sub>p0,2</sub> in MPa	Av at RT in J	R <sub>m</sub> in MPa	R <sub>p0,2</sub> in MPa	Av at RT in J
Nitrodur 8515	1030 - 1230	min. 835	min. 25	980 - 1180	min. 785	min. 30
Nitrodur 8519	1100 - 1300	min. 900	min. 25	1000 - 1200	min. 800	min. 30
Nitrodur 8550	900 - 1100	min. 680	min. 30	850 - 1050	min. 650	min. 30
Nitrodur 8509	950 - 1150	min. 750	min. 25	900 - 1100	min. 720	min. 25
Nitrodur 8507**	800 - 1000	min. 600	min. 35	800 - 1000	min. 600	min. 35
Nitrodur 8522	1150 - 1350	min. 950	min. 30	1050 - 1250	min. 850	min. 35
Nitrodur 8523	950 - 1150	min. 750	min. 25	900 - 1100	min. 720	min. 25
	R <sub>m</sub> in MPa	R <sub>p0,2</sub> in MPa	Av at -40°C in J			
Nitrodur 8524*	800 - 1000	min. 700	min. 40			

\*\*Samo za dimenzije d ≤ 70mm

**Tablica 3. Mehanička svojstva nakon kaljenja**

Material	100 < d ≤ 160 mm			160 < d ≤ 250 mm		
	R <sub>m</sub> in MPa	R <sub>p0,2</sub> in MPa	Av at RT in J	R <sub>m</sub> in MPa	R <sub>p0,2</sub> in MPa	Av at RT in J
Nitrodur 8515	930 - 1130	min. 735	min. 30	880 - 1080	min. 675	min. 30
Nitrodur 8519	900 - 1100	min. 700	min. 35	850 - 1050	min. 650	min. 40
Nitrodur 8550	800 - 1000	min. 600	min. 35	800 - 1000	min. 600	min. 35
Nitrodur 8509	850 - 1050	min. 670	min. 30	800 - 1000	min. 625	min. 30
Nitrodur 8507**	-	-	-	-	-	-
Nitrodur 8522	950 - 1150	min. 750	min. 40	900 - 1100	min. 700	min. 45
Nitrodur 8523	870 - 1070	min. 700	min. 30	800 - 1000	min. 625	min. 30

**Tablica 4. Opća svojstva**

Material	Tvrdoća jezare	Žilavost jezare	Ostvariva površinska tvrdoća	Poliranje
Nitrodur 8515	++	+	+	+
Nitrodur 8519	++	+	+	+
Nitrodur 8550	+	++	++	-
Nitrodur 8509	+	+	++	-
Nitrodur 8507	+	+++	++	-
Nitrodur 8522	+++***	++	0***	+
Nitrodur 8523	++***	+	0***	+
Nitrodur 8524	++***	++++	++***	+

## 5. POSTUPCI NITRIRANJA

S obzirom na izvor dušika postupak nitiranja se može provoditi u plinovitom sredstvu (amonijak), u solnim kupkama i u ioniziranom plinu. Zajedničko za sve postupke je da se nitiranje čeličnih proizvoda odvija ispod  $A_1$  temperature, kako ne bi došlo do strukturnih promjena u jezgri obrađivanog predmeta.

### 5.1. Plinsko nitiranje

Postoje dvije uobičajene metode plinskog nitiranja. Prva je takozvano jednostupanjsko nitiranje. Kod ove metode, obradak se zagrijava na temperaturu između  $495^{\circ}\text{C}$  do  $525^{\circ}\text{C}$  u atmosferi koja ima stupanj disocijacije amonijaka između 15% i 30%. Obradak ima nakon nitiranja višefaznu strukturu sa koncentracijom dušika koja progresivno pada od površine prema jezgri. Na temperaturi većoj od  $450^{\circ}\text{C}$  dušik se intersticijski topi dok mu koncentracija ne dosegne 0.1%. Tada se  $\gamma'$  nitrid ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) počinje stvarati na granicama zrna sa koncentracijom dušika između 5.7% do 6.1%. Kada koncentracija dušik pređe 6%, stvara se kompaktni sloj  $\gamma'$  nitrida ili zona spojeva na površini. Kako proces dalje protječe, novi nitridi se stvaraju u zoni difuzije ispod zone spojeva i prema jezgri [8].



**Slika 5.1..** Tipična peć za plinsko nitiranje [9]

Zona spojeva čini obradak krhkim te bi tijekom životnog vijeka obradka moglo doći do ljuštenja. Zbog tih razloga je u nekim slučajevima poželjno što više smanjiti zonu spojeva. To je dovelo do razvoja dvostupanjskog Floe procesa. Kod prvog stupanja procesa obradak se zagrijava na temperaturu između 495°C i 525°C i stupanj disocijacije amonijaka se kontrolirano drži na 20% do 25%. Tijekom drugog stupnja, temperatura se može zadržati ili podići na između 550°C i 565°C. Stupanj disocijacije se diže na između 75% i 80% tako što se smanjuje protok amonijaka i razrijeđuje sa dušikom, disociranim amonijakom ili vodikom. Treba imati na umu da podizanje temperature tijekom drugog stupnja snižava tvrdoću, povećava dubinu nitriranja i može sniziti tvrdoću jezgre [8].

Bitno je napomenuti da obradak mora biti poboljšán prije nitriranja. Popuštanje se obično vrši na 16°C iznad temperature nitriranja da bi se dobio stabilan sastav jezgre tijekom nitriranja [8].

Kao što je slučaj i sa ostalim procesima, poželjno je smanjiti vrijeme ciklusa. Kod plinskog nitriranja to se može postići povećanjem temperature i protoka amonijaka. Negativan učinak toga je da se povećava zona spojeva. U nekim slučajevima zona spojeva može biti prihvatljiva. Kako je zona spojeva vrlo tvrda i krhka, poželjno ju je ukloniti ili svesti na minimum što je moguće postići kontroliranjem potencijala dušika tijekom procesa nitriranja.

Atmosfera za nitriranje nije u ravnoteži jer je protok amonijaka prejak da bi dopustio potpuno pretvaranje u dušik i vodik. Ispušni plinovi iz peći se stoga sastoje od amonijaka, dušika i vodika. Obično se koristi bireta (*slika 5.2.*) za očitavanje postotka disocijacije amonijaka. Amonijak je jedini konstituent koji je topljiv u vodi. Stupnjevana bireta napunjena s vodom se može koristiti za mjerenje stupnja amonijaka na ispuhu plinova iz peći. Kako ova metoda nije konstantna i odvija se manualno, unosi nedosljednost, što ju čini teško ponovljivom.



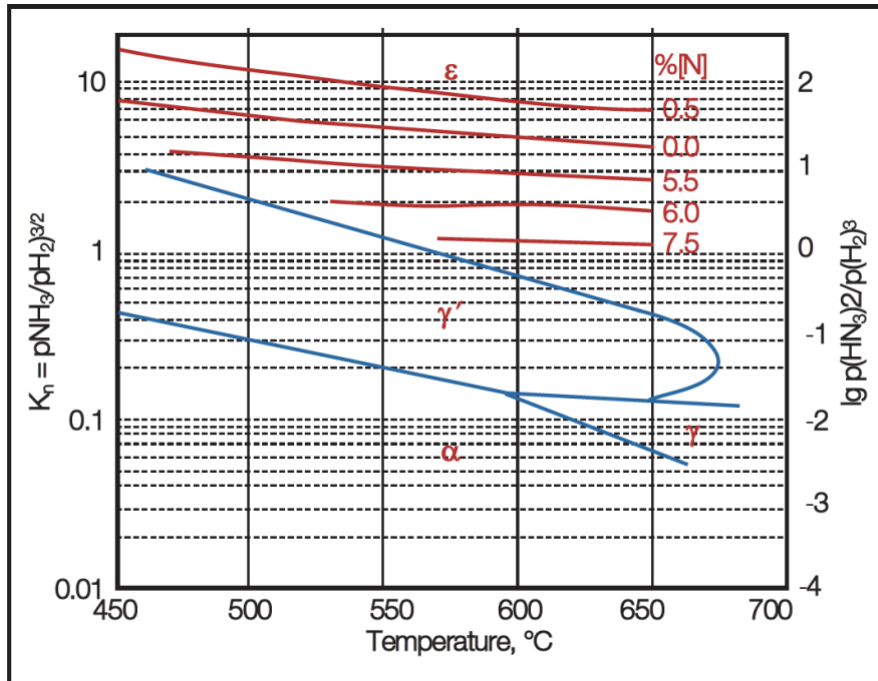


**Slika 5.2.** *bireta za mjerenje disocijacije amonijaka [9]*

Iz toga razloga počelo je istraživanje na novom kontrolnom parametru, potencijalu nitriranja kako bi se smanjila ili potpuno uklonila zona spojeva. Potencijal nitriranja,  $K$ , bazira se na parcijalnom tlaku amonijaka koji je prisutan u peći i parcijalnom tlaku vodika koji je već disocirao iz amonijaka.

$$K = \frac{p_{NH_3}^2}{p_{N_2} \cdot p_{H_2}}$$

Ako uzmemo  $K$  kao vrijednost za stvaranje nitrida, dobijemo graf koji je razvio Lehrer. Iako je Lehrerov dijagram za čisto željezo (*slika 5.3.*), može se koristiti kao dobra aproksimacija za niskolegirane čelike. Metode prikupljanja podataka i računanja potencijala nitriranja su ugrađene u moderne peći. Integracijom ovih sistema uključujući i pametne mjerače protoka kao i sisteme kontroliranja recepture te programibilne logične sklopove sada omogućava potpunu automatizaciju procesa i ponovljivost.



**Slika 5.3.** *Lehrerov dijagram [8]*

Sada kada su sistemi koji koriste potencijal nitiranja uobičajeni i dokazali su svoju kvalitetu, napisani su standardi za kritične aplikacije gdje se traži smanjena zona spojeva ili potpuni izostanak zone spojeva. Jedan od njih je i AMS2759/10A (Automated Gaseous Nitriding Controlled by Nitriding Potential) [8].

## 5.2. Ionitiranje (plazma nitiranje)

Plazma nitiranje, također poznato i kao ionitiranje je plinsko nitiranje pospješeno izbojima plazme na dijelu koji želimo nitirati. Plazma je plin koji kad se izloži električnom potencijalu postaje ioniziran i svijetli. Dijelovi koji se nitiraju su katoda, a zidovi peći su anoda.

Moguće ga je primijeniti za nitiranje svih vrsta čelika i željeznih ljevova. Osnovu ionitiranja čini jako strujno tinjajuće pražnjenje koje nastaje kod podpritiska u evakuiranoj posudi između katode i anode kada se između njih uspostavi napon od 0.3 do 1KV [10]. Čestice ubrzavaju i udaraju u katodu prenoseći svu kinetičku energiju i zagrijavaju obradak. Da bi čestice imale dovoljno kinetičke energije, potreban im je slobodni prostor da bi dobile ubrzanje i tako prenijele dovoljno kinetičke energije prije

nego što se sudare sa česticom nekog drugog plina. Zato se ovaj proces odvija u vakuumu. Tlak koji se obično koristi za plazma nitiranje je od 10 do 1000Pa [10].

Za razliku do ostalih postupaka nitiranja, gdje su uobičajeni parametri koje možemo mijenjati vrijeme, temperatura i eventualno sastav plina, kod ionskog nitiranja još je moguće mijenjati vakuum (podpritisak), katodni pad i gustoću struje [10].

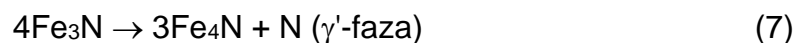
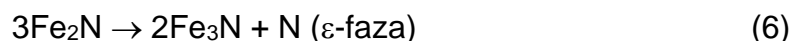
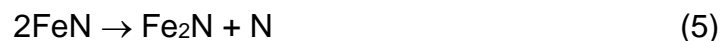
U slučaju plazma nitiranja plinovi za nitiranje se unose odvojeno. Jedna od češćih kombinacija je dušik+vodik. Argon se također koristi u početnom stadiju kao plin za čišćenje predmeta koji će se nitirati.

Tijekom plazma nitiranja dogoditi će se tri reakcije na površini materijala koji se obrađuje. U prvoj reakciji, željezo i druge nečistoće se skidaju sa površine procesom koji se zove "Sputtering" (u daljnjem tekstu: otprašivanje) ili redukcijskom reakcijom sa vodikom. Udarac iona vodika ili argona koji bombardiraju radnu površinu oslobađaju nečistoće koje kasnije izvlači vakuumski sistem. Skidanje ovih nečistoća omogućava difuziju dušika u površinu.

Tijekom druge reakcije, i kao rezultat udara otprašenih ioniziranih atoma, na površini počinje stvaranje željeznih nitrida (5).



Tijekom treće reakcije, počinje raspadanje FeN pod stalnim otprašivanjem plazme (6). FeN se raspada na  $\epsilon$  fazu (7), a odmah nakon toga na  $\gamma'$  fazu u dušik-željezo zonu spojeva (8).



Vodik igra bitnu ulogu, kako u početnoj fazi dok se čisti površina, tako i u drugoj fazi kada počinje difuzija dušika. U početnoj fazi služi kao redukcijski element za okside na površini, te ju tako čisti i priprema da oksidi ne bi onemogućili difuziju dušika. U drugoj fazi, vodik ne djeluje samo redukcijski nego i direktno u utječe na difuzijsku zonu tako što razrjeđuje dušik i smanjuje mu potencijal u peći.

Iako u peći nema kisika, može doći do razugličavanja vezivanjem sa slobodnim atomima vodika te nastaje  $\text{CH}_3$ . To može biti pozitivno jer se tako skidaju površinske naslage ugljika te se olakšava difuziju dušika. Ako je kisik prisutan u peći, njegova prisutnost pospješuje razugličavanje stvaranjem  $\text{CO}_2$ , ali ako ga ima  $>3\%$ , prvo se stvara sloj oksida koji sprječava transport ugljika od jezgre na površinu i djelomično zaustavlja proces razugličavanja.

Argon se također koristi u prvoj fazi plazma nitiranja kao plin za čišćenje. To je zato što je argon teži plin od dušika i vodika, i kad se atomi argona ubrzaju imaju puno veću kinetičku energiju što pospješuje proces čišćenja. Koristi se u kombinaciji sa vodikom do maksimalno 10% Ar.

Površine koje nakon nitiranja trebaju ostati nenitrirane (mekane) mogu se zaštititi na dva načina. Jedan način je taj da se željena površina premaže pastom koja sprečava difuziju dušika i ostalih elemenata u površinu. Drugi način je pomoću odgovarajućeg mehaničkog prikrivanja željenih površina pomoću limova, čepovima i slično [11].

Pozitivne karakteristike plazma nitiranja su :

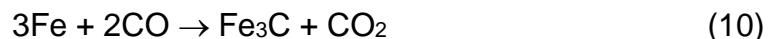
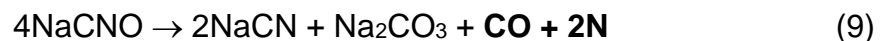
- ekološki prihvatljivi plinovi,
- nema opasnosti od zapaljenja,
- kraća vremena ciklusa,
- automatiziranost procesa,
- mala potrošnja plina,
- mogućnost obrade gotovo svih čelika,
- nitiranje samo određenih površina,
- mala razina razugličavanja,
- mali troškovi održavanja i pokretanja.

### 5.3. Nitriranje u solnim kupkama

Ovaj postupak se zove nitriranje u solnim kupkama, zato što se predmeti uranjaju u kupku sa kombinacijom otopljenih soli. Omjer soli u kupki je uobičajeno sadržavao 60-70% NaCN i 30-40% KCN. Dodatno, tu je još nekoliko postotaka karbonata  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  i cijanata NaCNO. Proces počiva na raspadu cijanida u cijanat [10].

Prilikom nitriranja, treba težiti razini cijanata od 45% [10]. Ovo se postiže tako da se kupka dozrijeva na temp od  $570^\circ\text{C}$  oko 12 sati. Bitno je zadržati ovu razinu cijanata u cijeloj kupci da ne bi došlo do razlike u tvrdoći i debljini nitriranog sloja. Da bi se to postiglo ubrizgava se zrak u kupku da bi se kontrolirala razina cijanata.

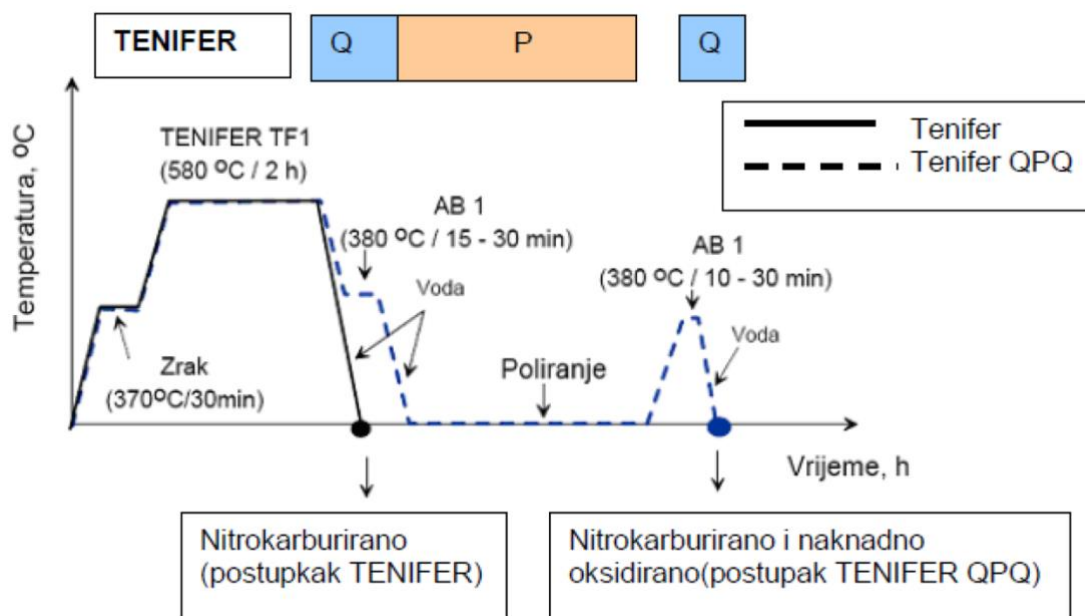
Drugi problem koji bi se mogao lako pojaviti je otapanje željezne kade, stoga se danas kade uglavnom rade od titana. Normalne temperature za ovaj proces su između  $550-570^\circ\text{C}$  i prosječnim vremenom trajanja od 2 sata do maksimalno 4 sata. Tijekom uranjanja solna kupka odaje ugljik i dušik prema sljedećoj kemijskoj reakciji (9)(10)[10]:



Proces koji koristi ovaj tip soli je razvio DEGUSSA i zove se "Tufftride" proces ("Teniferbehandlung" na Njemačkom).

Druga varijacija procesa se zove "Sulfinuz". U ovom procesu sumporov sulfid ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) je također komponenta soli, i oslobodit će sumpor koji će biti uključen u nitriranom sloju i imat će utjecaj na smanjenje faktora trenja.

Osim samog postupka nitriranja TENIFER, postoje varijante: TENIFER Q, TENIFER QP, TENIFER QPQ. Slova u nazivu Q potječu od engleskih riječi "quenching" (gašenje), P "polishing" (poliranje) i 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 [5].



**Slika 5.4.** Dijagram postupka TENIFER i TENIFER QPQ [5]

Nakon bilo kojeg od ovih procesa, gašenje u toploj vodi će dati bolje rezultate. Ovo će stvoriti superzasićenu krutu otopinu dušika u  $\alpha$ -željezu i tako povećati otpornost na zamor materijala. Negativna strana gašenja u toploj vodi je da će se smanjiti žilavost nitriranog sloja, što treba uzeti u razmatranje.

Solne kupke su postale vrlo popularne jer daju nitriranu površinu i zonu spojeva koja se sastoji od  $\gamma'$ -nitrida ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) i  $\varepsilon$ -nitrida ( $\text{Fe}_3\text{N}$ ) koji nisu toliko krhki kao  $\zeta$ -nitrid ( $\text{Fe}_2\text{N}$ ) i koriste se kod poboljšanja svojstava otpornosti na trošenje, smanjenja trenja i otpornosti na koroziju. Ovi nitridi se stvaraju uslijed reakcije između kisikom zasićenih cijanata koji su se stvorili prozračivanjem kupke i oksidirali cijanide i površinu čelika [10].

Iako vrlo koristan način nitriranja, ne dolazi bez problema pa je tako u počecima bilo jako teško kontrolirati kemijski sastav kupke i postojali su veliki problemi sa zbrinjavanjem soli i vode za ispiranje. Ove komplikacije su usporile razvoj i rasprostranjenost nitriranja u solnim kupkama i u mnogim slučajevima su zamijenjene sa plinskim nitriranjem. Zbog ovih razloga javila se potreba za razvojem solne kupke takvog sastava koji ima iste mogućnosti nitriranja ali da bude ekološki prihvatljiv. Tako su razvijene cijanatne kupke.

Solne kupke imaju veliku prednost jer ako je moguće kontrolirati sastav soli onda je moguće kontrolirati i kemijsku reaktivnost kupke, što može dovesti do smanjenja temperature procesa. Smanjenje temperature procesa je od velike važnosti jer to znači manje iskrivljenje nitriranog dijela i omogućuje obradu šireg raspona čelika bez smanjivanja njihovih mehaničkih osobina.

Kupke sa cijanatom je moguće kemijski regulirati da omogućuje temperature nitriranja do niskih temperatura, 480°C i još uvijek biti ekološki prihvatljive [10].

Nitriranje u solnim kupkama se pokazalo kao puno brži proces od plinskog nitriranja zbog boljeg prijenosa topline i visoke reaktivnosti kupke. Kao gruba usporedba, moglo bi se reći da 10 sati plinskog nitriranja odgovara 4 sata provedenih u solnoj kupki [10].

Konvencionalni procesi nitriranja u solnim kupkama su ograničeni na 4 sata zbog stvaranja pora u zoni spojeva. Često postoji potreba za većom dubinom nitriranja, što je kod ove metode zbog vremenskog ograničenja nemoguće provesti.

## 6. PROBLEMI

### 6.1. Kod plinskog nitriranja

#### 6.1.1. Čistoća površine

Čelik koji ćemo tretirati mora biti potpuno očišćen i "kirurški" čist od površinskih onečišćenja kao što su ulja (mogu se raspasti i ostaviti ugljični talog na površini te tako onemogućiti difuziju dušika), otisci prstiju (ulja iz kože su na bazi ugljikovodika, prilikom raspada ostavljaju ugljični talog. Onaj koji rukuje materijalom bi trebao nositi rukavice.), ostaci boje (ili čak marker za označavanje, mogu biti dovoljna barijera za difuziju dušika), razugljičavanje (čelik koji je vruće valjan mora biti obrađen metodom odvajanja čestica, do barem 10% dubine materijala) [2].

#### 6.1.2. Disocijacija plina

Ako se disocijacija plina ne događa pri temperaturi procesa, provjeri bocu sa plinom i promijeni na najpuniju bocu. Ako se disocijacija zbiva, ali ne u zahtijevanoj mjeri, nešto se dogodilo što je moglo umanjiti protok. Može biti jednostavan razlog kao opstrukcija u dovodnoj cijevi. Također može biti i zato što je dovodna cijev oksidirala ako se koristi obična čelična cijev. Drugi izvor oksidacije bi mogao biti u samoj peći, gdje bi sama unutrašnjost peći mogla biti oksidirana ili onečišćena. Nešto što se vrlo često previdi su nosivi elementi unutar peći. Preporučuje se da se ne koristi niskolegirani čelik ili ugljični čelik kao nosivi elementi unutar peći, oni će djelovati kao spužva i oduzeti disocirani dušik predmetu koji se obrađuje.

#### 6.1.3. Površinske promjene boje

obično se pripisuje ulazu kisika, zraka ili površinskog onečišćenja u proces na površini predmeta ili na nosivim elementima unutar peći. Ako je kisik prisutan, promjena će se pojaviti u fazi hlađenja (glavni krivac bi mogla biti loša zabrtvljenost peći. Ako je predmet promijenio boju, to ne mora nužno biti negativno jer dolazi do povećane otpornosti na koroziju. Neki postupci zahtijevaju namjernu oksidaciju nitrirane površine kao antikorozivnu barijeru. Neka od imena za ove postupke su oxy-nitride, nitrox, niox i mnogi drugi.



#### 6.1.4. Eksfolijacija ljuske

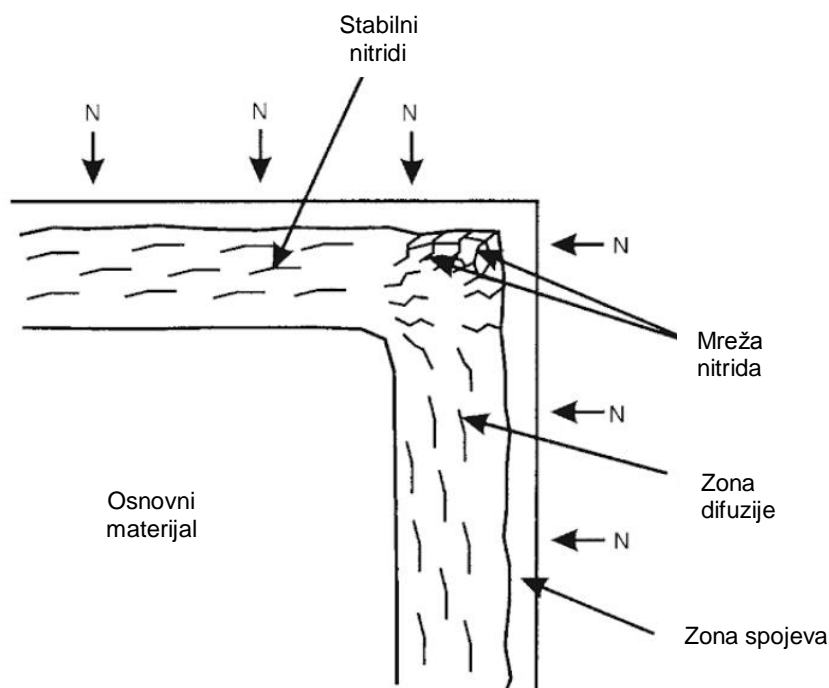
Ako se uoči da se je nitrirana površina počela odljepljivati to obično upućuje da postoji razugličenje na površini. Razugličenje je direktna posljedica premalog uklanjanja materijala u predoperacijama odvajanjem čestica ili kod toplinske obrade prije nitriranja. Predmet se može smatrati škartom i nije za daljnju upotrebu.

#### 6.1.5. Narančina kora

Nitrirana površina je puna jamica, kao narančina kora. Ovaj problem se može povezati sa razugličenjem.

#### 6.1.6. Okrhnuća ljuske

Ako ljuska izgleda kao da je na mjestima okrhnuta, posebno na kutevima i rubovima, obično se radi o mrežastoj strukturi nitrida (slika 6.1.). To je područje prezasićeno dušikom gdje se na rubovima zrna tvore željezni nitridi koji su vrlo tvrdi i krhki. Ovaj problem se obično pojavljuje ako je potencijal plina prevelik. Rješenje je da se provjeri protok plina i disocijacija i odgovarajuće podesi.



**Slika 6.1.** Ilustracija utjecaja dušika (mreže nitrida) na oštrm rubu

### 6.1.7. Ljuštenje

Ovo može biti direktan rezultat prisutnosti površinskog onečišćenja. Preispitaj metode čišćenja prije nitriranja i nakon mehaničke obrade.

### 6.1.8. Urušavanje ljuske

Ovaj problem nastaje kada je tvrdoća osnovnog materijala preniska i ne može nositi nitriranu ljusku. Još jedna mogućnost je da je formirana ljuska pretanka, što se može riješiti povećanjem dubine nitriranja, no kod toga treba biti oprezan. Treba provjeriti koja je namjena predmeta i pod kojim će opterećenjem raditi.

## 6.2. Kod nitriranja u solnim kupkama

Bitno je da se provjeri kemijski sastav solne kupke na početku svake radne smjene i da se primjerenim dodavanjem soli vrati kupku u operativno stanje.

Redovito odmuljivanje kade je potrebno da bi se uklonili oksidi.

Čišćenje površine je obavezno i jednako bitno kao i kod ostalih postupaka, a posebno je bitno kod čišćenja nakon nitriranja da se uklone ostaci soli iz rupa i proreza.

## 6.3. Kod ionitriranja

### 6.3.1. Dio se pregrijava

Pregrijavanje je obično rezultat obradaka koji su preblizu jedan drugome i poznato je kao efekt šuplje katode. Efekt šuplje katode se može vidjeti ako se pogleda kroz nadzorno okno peći. Određeno područje zahvaćeno tim efektom vidljivo je zagrijano. Nakon što se obrada završi i obradak se izvadi iz peći može se uočiti tamno područje na površini. Može se izmjeriti i u vidu pada tvrdoće u odnosu na ostatak obradka.

Dio se također može pregrijati uslijed promjene procesne voltaže i amperaže. To može biti rezultat krivog odabira programa za nitriranje. Pregrijavanje također može biti rezultat odabira krive temperature procesa.

Odabir pravilne temperature će ovisiti o:

- sastavu čelika koji se upotrebljava za izradu strojnog dijela,
- temperaturi popuštanja,
- zahtijevanom sastavu površine.

Bitan aspekt nejednolikih procesnih temperatura tijekom nitriranja i u peći je da će uzrokovati različite dubine nitriranja na obradku. Stoga je jako bitno kako se slažu predmeti u peći da ne bi došlo do efekta prazne katode. Također je bitno da se postave termoparovi koji će pokazati točnu sliku temperature u peći. Također je jednako bitno da su vrijednosti koje se koriste već uspješno korištene u prošlim procesima.

### *6.3.2. Gubitak nitriranja*

Ako pogledamo kroz nadzorno okno peći i primijetimo da dio ne sjaji jednako obavijen plazmom onda je odabrani tlak previsok. Ako se to dogodi, vrlo je bitno da se odmah riješi jer tamo gdje nema plazma isijavanja neće doći do nitriranja. To znači da se ljuska neće uopće stvoriti ili će biti jako plitka. Način na koji se ova greška otklanja je da se prvo provjeri da peć negdje ne propušta. Ako nigdje ne propušta smanji parcijalni tlak dok se plazma opet ne pojavi na dijelu koji do tada nije bio prekriven plazmom.

### *6.3.3. Izbijanje luka*

Ovo je obično češće kod sistema sa stalnom istosmjernom strujom, ali se može dogoditi i kod sistema sa pulsnom istosmjernom strujom. Rezultat je previsokog napona, pa je rješenje smanjiti napon dok ne prestanu izboji luka. Izboj električnog luka izgleda kao mala munja i obično ima afinitet prema oštrim rubovima što će rezultirati lokaliziranim pregrijavanjem i vjerojatno gorenjem/lokaliziranim topljenjem. Rješenje problema je da se smanji napon ili promijeni tlak.

### *6.3.4. Okrhnuća ljuske*

Ovo se obično događa na oštrim rubovima. Najvjerojatniji razlog je mrežasta struktura nitrida. To znači da je rub koji se okrhnuo prezasićen dušikom. Dušik je topljiv u željezu do maksimalno 7% volumno. Kada dođe do prezasićenja, dušik izađe iz otopine tijekom hlađenja i razmjesti se na granicama zrna. Rješenje ovog problema je da se smanji dušik u procesu ili da se zaoble oštri rubovi [9].

### *6.3.5. Niska površinska tvrdoća*

Može biti zbog premalo dostupnog dušika za nitriranje s kojim bi čelik stvorio stabilne nitride u površini. Također je moguće da čelik koji se nitrira nema dovoljno karbidotvornih elemenata. Rješenje ovog problema je da se promijeni čelik ili poveća potencijal dušika.

### 6.3.6. Ljuštenje

Ovo može biti direktan rezultat prisutnosti površinskog onečišćenja. Preispitaj metode čišćenja prije nitriranja i nakon mehaničke obrade.

Neka površinska onečišćenja se mogu ukloniti otprašivanjem i korištenjem vodika kao plina za otprašivanje, ako vodik nije sam po sebi dovoljno agresivan, može se koristiti mješavina argona i vodika sa maksimalnim udjelom argona od 10% [9].

## 7. PRIMJENA

S gledišta otpornosti na trošenje nitriranje se primjenjuje s jedne strane za rotirajuće dijelove izvrgnute trošenju, a s druge strane za dijelove reverzirajućih i drugih translatorskih mehanizama, osobito vodilica. Karakterističnu primjenu nalazi nitriranje u proizvodnji pojedinih vitalnih dijelova preciznih alatnih strojeva, i to u cilju smanjenja trošenja tih dijelova, da bi se preciznost alatnog stroja u eksploataciji što dulje održala.

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), kao što su dijelovi poljoprivrednih strojeva ili stapne pumpe za motorna vozila [4].

Zupčanici predstavljaju posebno važno područje primjene nitriranja, i to ponajprije visokoturažni zupčanici za manje snage. Također ako je potrebno smanjiti deformacije kod toplinske obrade kod tankih i asimetričnih dijelova, a da se dobije otpornost na trošenje, onda je nitriranje rješenje. Ovamo spada i slučaj sa stožnim zupčanicima koji imaju zavojito ozubljenje, a sklone su deformaciji. Ako ih se podvrgne martenzitnom kaljenju, zupci će se sigurno deformirati, zato se i ovaj slučaj obično rješava nitriranjem.

S gledišta povišenja dinamičke izdržljivosti nitriranje se primjenjuje najviše u automobilske industriji i to prije svega kod koljenastih osovine gdje je bitna otpornost na trošenje na rukavcima. Tu još spadaju bregaste osovine, ojnice i slično.

## **8. SIGURNOST**

Sigurnost pri rukovanju pećima i učenje o mogućim posljedicama radnji bi trebala biti obaveza za postojeće i buduće radnike. Isto se odnosi i na osoblje zaduženo za održavanje, koji možda ne razumiju opasnosti udisanja atmosfera kao što su dušik, argon, vodik i slične.

Kiseline za nagrizanje u procesnim laboratorijima za metalurgiju može također izazvati ozljede ako se ne rukuje pravilno sa njima prilikom skladištenja i korištenja. To se odnosi na kiseline kao što su picral, klorovodična, sumporna, dušična i druge.

Neke od kemikalija za čišćenje prije obrade mogu biti štetne po ljude i opremu.

Prilikom rukovanja sa solnim kupkama bitno je da se kupka i sol koja se dodaju predgriju i dovedu na istu radnu temperaturu kako ne bi došlo do prskanja i opekline.

Također predmet koji će se nitrirati u solnim kupkama treba predgrijati da bi se riješili vlage na površini i u rupama.

Ne miješaj cijanide i nitratne soli, to može dovesti do eksplozije te uzrokovati ozbiljne ozljede, požare i oštećenja na uređajima.

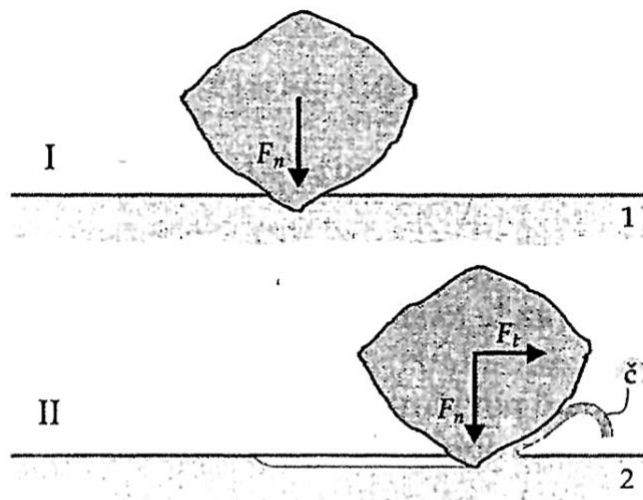
## 9. TROŠENJE

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

Premda postoji neizbrojno veliki broj slučajeva trošenja, većina je autora suglasna da su samo četiri osnovna mehanizma trošenja: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija [13].

### 9.1. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja, (slika 9.1.).



Slika 9.1. Jedinični događaj abrazije [13]

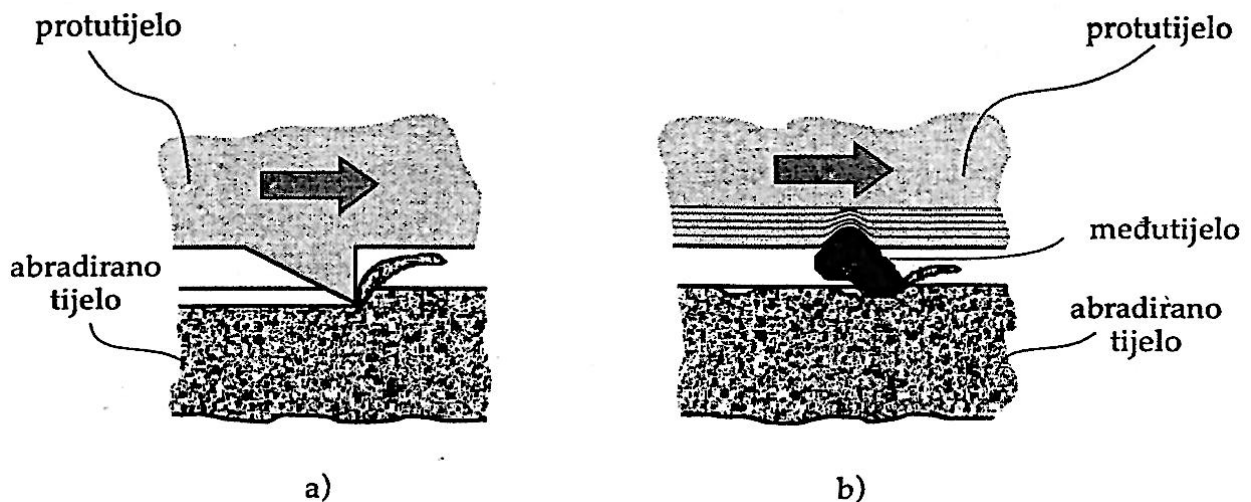
Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze:

- 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  $F_t$  [13].

Ovisno o strukturi tribosustava u kojem se zbiva abrazija mogu se pojaviti dva oblika abrazije, prikazana slikom

- a) abrazija u dodiru dva tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo).
- b) abrazija u dodiru triju tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i protutijelo), te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.

Prema rezultatima više istraživanja odnošenje materijala u dodiru s tri tijela je znatno manje nego u slučaju abrazije dvaju tijela. Razlog tomu je što čestice abrazije samo oko 10% vremena provode u odnošenju materijala dok se ostatak vremena kotrljaju u slobodnom međuprostoru [13].

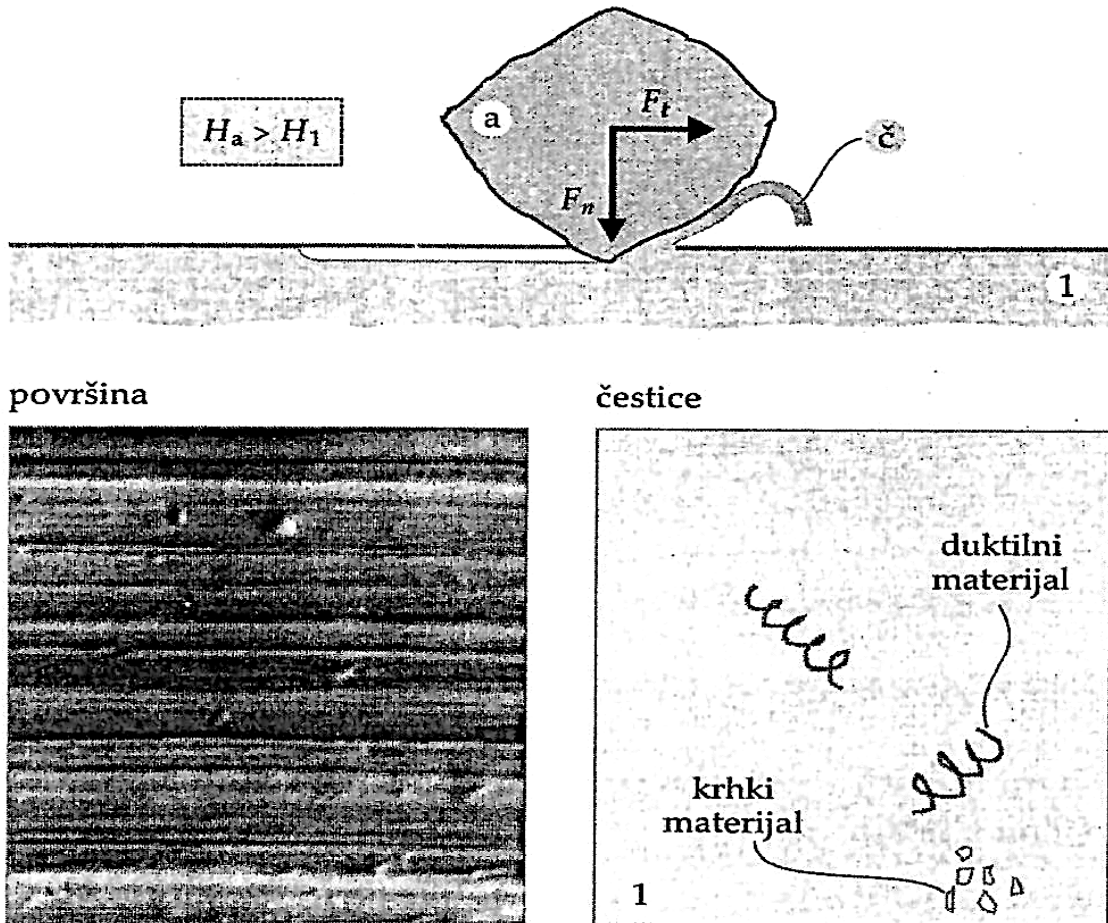


**Slika 9.2.** Abrazija u dodiru dvaju tijela (a) i triju tijela (b) [13]

Ovisno o međusobnu odnosu tvrdoća abraziva i materijala moguća su tri praktična slučaja:

- a) "čista" abrazija
- b) selektivna abrazija
- c) "nulta" abrazija [13]

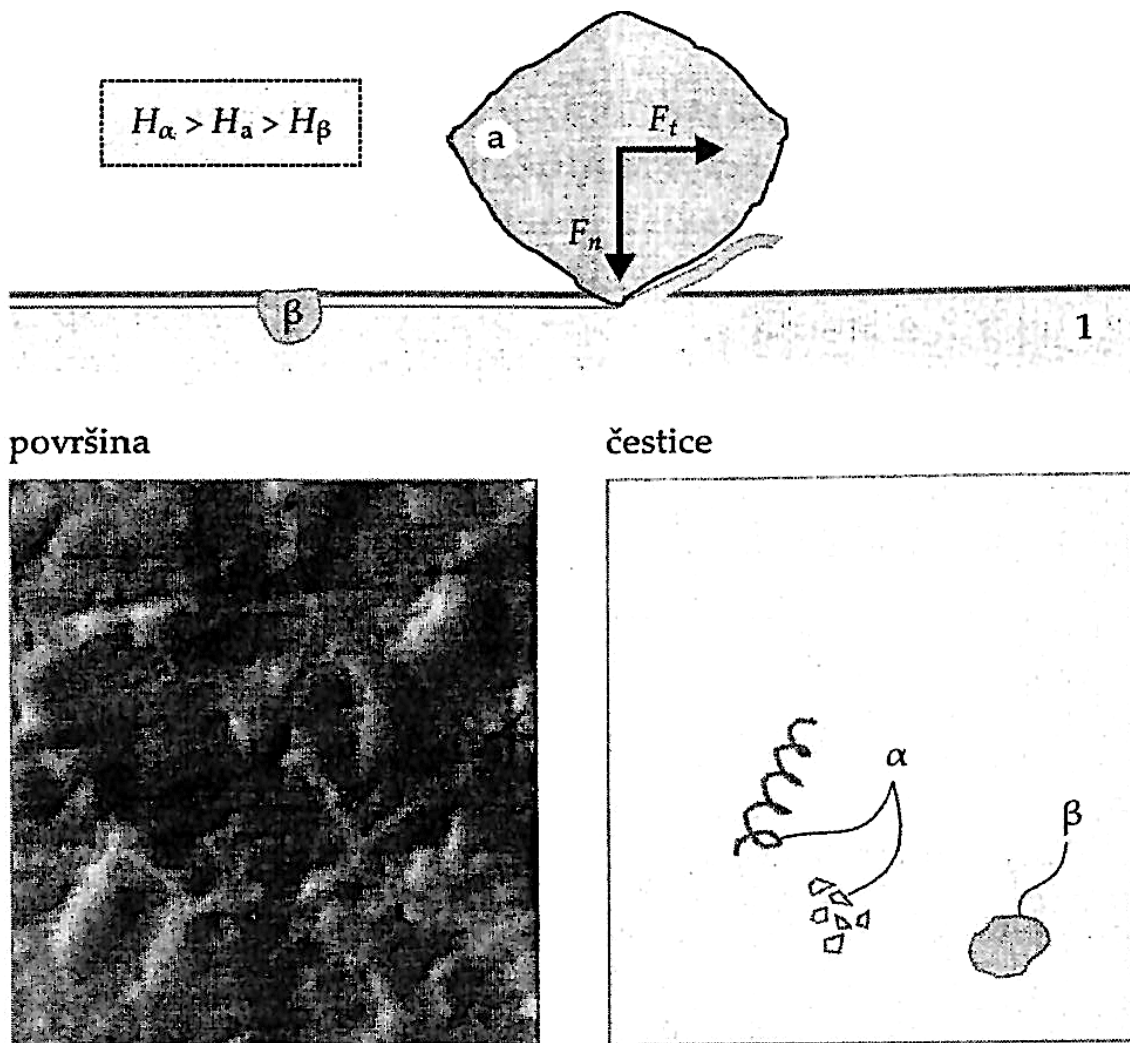
“Čista” abrazija djeluje kad je tvrdoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge (1). Površina je izbrazdana, a čestice trošenja su oblika spiralne strugotine u slučaju kad je abradirani materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine kada je abradirani materijal krhak [13].



Slika 9.3. “Čista” abrazija [13]

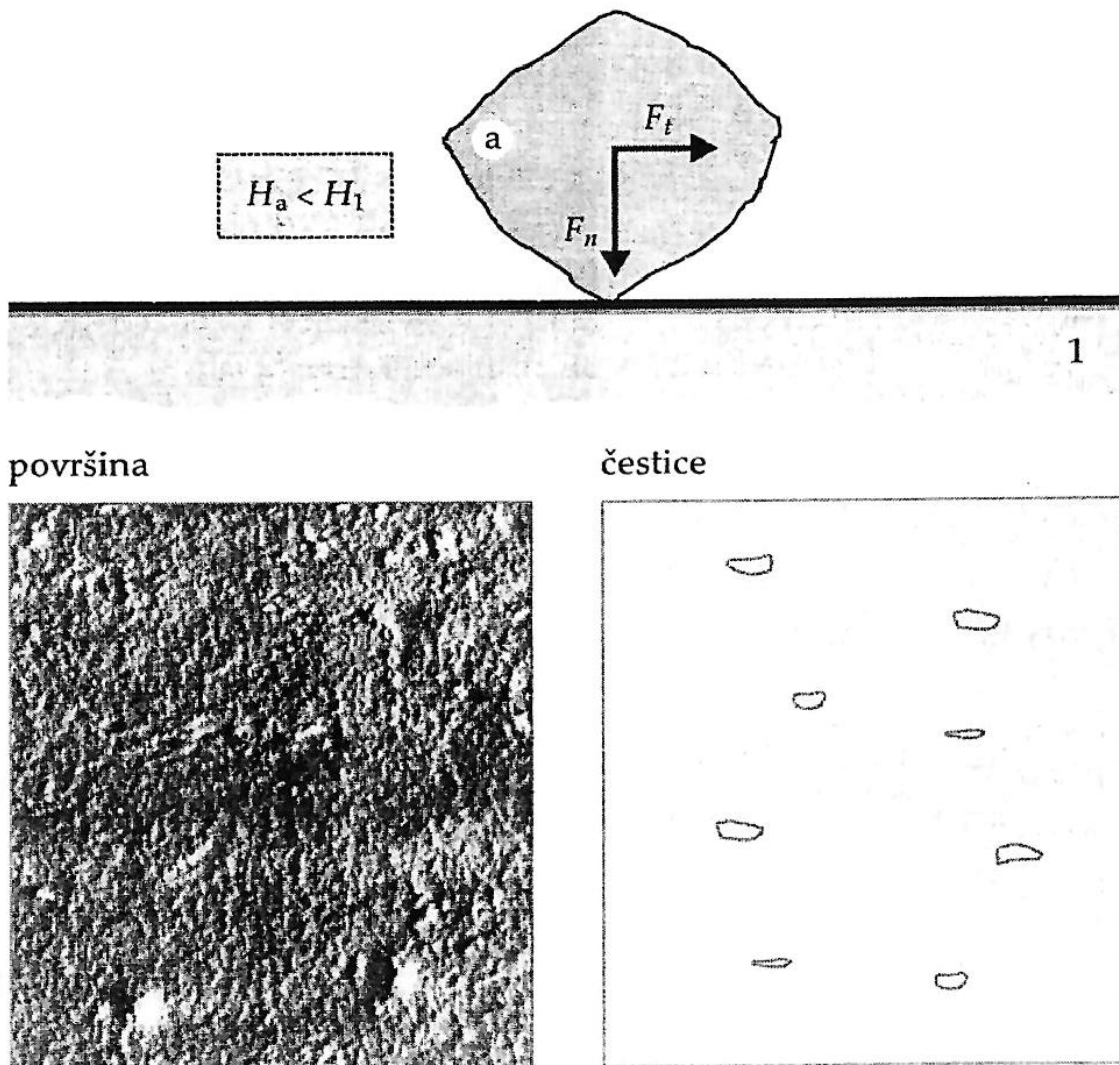


**Selektivna abrazija** djeluje kada u abradiranu materijalu postoji faza tvrđa od abraziva. Abraziv “reže” samo zahvaćeni sloj mekše faze. Površina je izbrazdana, s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze zrna ili trake tvrde faze



Slika 9.4. Selektivna abrazija [13]

“Nulta” abrazija nastaje kad je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled, a čestice trošenja trebale bi biti sitne ljuskice koje potječu od vanjskog graničnog sloja



Slika 9.5. “Nulta” abrazija [13]

## 9.2. Otpornost na abraziju

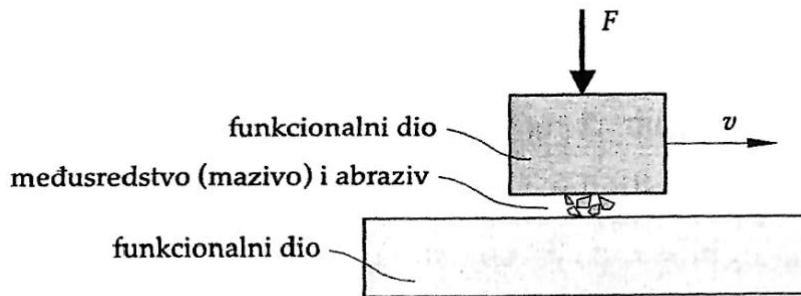
Otpornost na I. fazu mehanizama abrazije (prodiranje abraziva u površinu materijala) određena je s više utjecajnih čimbenika, a najznačajniji je međusobni omjer mikrotvrdoće abraziva i materijala trošene poršine. U tablici su navedene vrijednosti tvrdoće nekih abraziva kao i pojedinih faznih konstituenata željeznih materijala [13].

**Tablica 4. Tvrdoća faznih konstituenata i abraziva [13]**

Minerali (abrazivi)	Tvrdoća HV	Materijali (strukturni konstituenti)
gips	36	
	70 – 200	ferit
vapnenac, $\text{CaCO}_3$	140	
fluorit, $\text{CaF}_2$	190	
	170 – 230	austenit, 12 % Mn
	250 – 320	perlit, nelegirani
	250 – 350	austenit, niskolegirani
dolomit	370	perlit, legirani
	300 – 460	austenit, ljevovi s visokim % Cr
	300 – 600	
staklo	500 – 795	martenzit
apatit	540	
feldspat	600 – 750	
kremen	800 – 950	840 – 1100
kvarc, $\text{SiO}_2$	900 – 1750	cementit
		1200 – 1600
topaz	1430	Cr-karbid, $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$
		1300 – 1500
		Fe-borid, $\text{Fe}_2\text{B}$
		1500
		Mo-karbid, $\text{Mo}_2\text{C}$
		1650
		Cr-karbid, $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$
korund, $\text{Al}_2\text{O}_3$	1800 – 2100	1800
		Cr-karbid, $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$
		1600 – 2100
		Fe-borid, FeB
		1800 – 2250
		Cr-borid, $\text{CrB}_2$
		2000 – 2400
		Nb-karbid
		2150
		Cr-borid, CrB
		2200
		Cr-karbid, $\text{Cr}_7\text{C}_3$
		2280
		Cr-karbid, $\text{Cr}_3\text{C}_2$
		2400
		W-karbid, WC
		2700
		W-borid, $\text{W}_2\text{B}_5$
karborund, SiC	2600 – 3500	2700 – 3800
		Cr-karboborid, $\text{Cr}_2(\text{BC})$
		2800 – 2940
		V-karbid, VC
		3000
		W-karbid, $\text{W}_2\text{C}$
		3200
		Ti-karbid, TiC
		3400
		Ti-borid, $\text{TiB}_2$
		3700
		B-karbid, $\text{B}_4\text{C}$
		3750
		W-borid, WB
dijamant	10000	

### 9.3. Abrazijsko trošenje

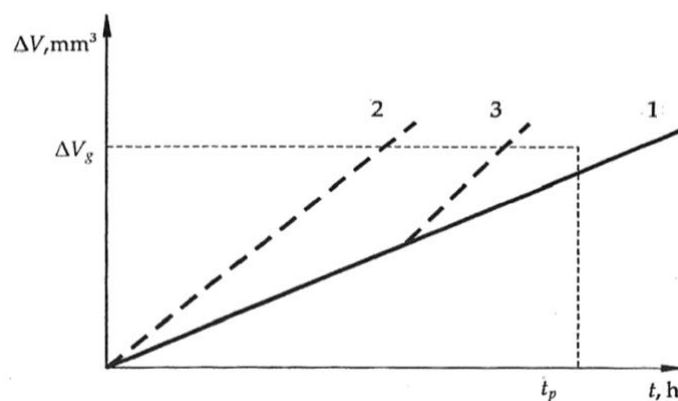
Abrazijsko trošenje je istiskivanje materijala izazvano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Karakteristika te vrste trošenja je prisutnost tvrdih abrazivnih čestica uglavnom mineralnog podrijetla pa se ponekad naziva i mineralno trošenje. Shema tribosustava abrazijskog trošenja prikazana je na slici (slika 9.6.)



Slika 9.6. Shema tribosustava abrazijskog trošenja

Relativno gibanje može se opisati kao klizanje. Stupanj opasnosti od pojedinih mehanizama trošenja:

- abrazijsko trošenje – jako visok
- umor površine – nizak
- tribokorozija – najniži



Slika 9.7. Procesi trošenja abrazijskih tribosustava [13]

Krivulja 1 – normalni proces trošenja mehanizmom tribokorozije i selektivne abrazijske

Krivulja 2 – abrazijsko trošenje intenzivnije nego se predviđalo pri projektiranju trajnosti

Krivulja 3 – prerano probijanje zaštitnog sloja

Tribološke mjere za izbjegavanje krivulja 2 i 3

- eliminacija abraziva iz tribosustava (ako je moguće)
- izbor odgovarajućeg materijala odnosno primjena postupka zaštite površine.

Primjeri abrazijskog trošenja jesu: radni dijelovi poljoprivredne, građevinske, i rudarske mehanizacije, stapne muljne pumpe, alati za obradbu odvajanjem čestica.

#### **9.4. Svojstva otpornosti na trošenje**

Visoka tvrdoća površinskog sloja ne mora uvijek dovesti i do poboljšanog ponašanja kod trošenja. Često se razmatraju postojeći mehanizmi trošenja. U osnovi nitriranje i nitrokarburiranje utječna sniženje faktora trenja, na smanjenje sklonosti naljepljivanju, kao i na smanjenje reaktivnosti s okolnim reaktivnim sredstvima.

Smanjenjem sklonosti naljepljivanju značajno se smanjuje hladno zavarivanje s drugim elementom u tribosustavu.

Tvrda zona spojeva daje posebno dobru otpornost na abrazijsko trošenje i na brazdanje (grebanje).

Ako se kod triboloških zahtjeva pojave velike okomite sile, osnovni materijal mora pružiti oslonac zoni spojeva. U takvim se slučajevima preporuča primjena legiranih čelika. Također je prihvatljivo prethodno provođenje poboljšavanja. Međutim, njegova je djelotvornost ograničena otpornošću na popuštanje osnovnog materijala [14].

#### **9.5. Odabir materijala otpornih na abrazijsko trošenje**

Upute za izbor materijala za dijelove izložene abraziji dane su u tablici 6.

Pri izboru materijala, odnosno zaštitnog sloja svakako treba uzeti u obzir tvrdoću abraziva jer je pokazatelj otpornosti na abrazijsko trošenje udio i tvrdoća tvrde faze. Budući da su materijali s visokim udjelom tvrdih faza uglavnom krhki, zahtjevi za žilavost (rad uz udarce) i tehnološkičnost (rezljivost) u suprotnosti su sa zahtjevom za otpornost na abrazijsko trošenje. To se proturječe često prevladava primjenom postupaka zaštite površine od trošenja. U slučaju abrazijskog trošenja prikladni su boriranje, vanadiranje i navarivanje [13].

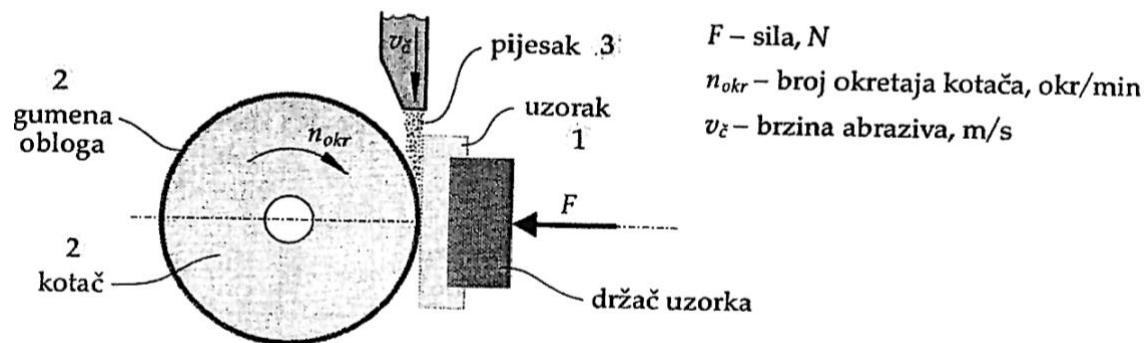
**Tablica 6. Upute za izbor materijala u uvjetima abrazije [13]**

Radni uvjeti	Zahtijevana svojstva	Materijal
– visoka naprezanja – udarci	– visoka žilavost – otvrdnjivanje hladnom deformacijom	– austenitni manganski čelik – guma
– niska naprezanja – klizanje	1. visoka tvrdoća 2. žilavost manje važna 3. brza izmjena dijelova	– kaljeni ili drugačije otvrdnuti metalni materijali – navareni slojevi – keramika
	1. niska cijena osnovnog materijala 2. trajanje izmjene manje važno	– keramika – kamene pločice – beton
	1. najveća otpornost na trošenje 2. cijena nevažna	– volframov karbid (tvrđi metal)
– visoka naprezanja – jaki udarci	– visoka žilavost	– lijevovi i čelici – navareni slojevi
– vlaga i korozija	– otpornost na koroziju	– korozijski postojani čelici – keramika – guma – polimeri
– niska naprezanja – sitne čestice – slaba abrazivnost čestica	– niski koeficijent trenja	– poliuretan – teflon – glatke metalne površine
– visoka temperatura	– otpornost na lom i toplinske šokove – opća otpornost pri povišenim temperaturama	– lijevovi i čelici legirani kromom – neke keramike
– minimalno trajanje zastoja	– laka izmjena	– bilo koji materijal koji se lako pričvršćuje ili nanosi
– zakrivljene i nepravilne površine i oblici	– bilo koje ili kombinacije gornjih svojstava	– navareni slojevi – materijali koji se nanose lopaticom
– jako težak rad pri visokim temperaturama		– navareni slojevi

## 9.6. Ekperimentalno određivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

### Ispitivanje “suhi pijesak/gumeni kotač” (ASTM G65-suhi uvjeti ispitivanja)

Na slici (slika 9.7.) je prikazan uređaj “suhi pijesak/gumeni kotač”.



Slika 9.7. Skica uređaja “suhi pijesak/gumeni kotač” [13]

Ispitivanje se sastoji od abradiranja uzorka (1) standardnim zaobljenim kvarcnim pijeskom Ottawa AFS50/70 (3), slika . Epruveta se naslanja na kotač (2) obložen gumom tvrdoće oko 60 Shore A, a opterećena je utezima preko koljenaste poluge. Sila  $F$  iznosi 130N ili 45N ovisno o varijanti postupka, a još je promjenjiv i ukupni broj okretaja kotača koji se registrira brojačem [13].

Vaganjem uzoraka prije i poslije ispitivanja utvrđuje se gubitak mase. Ova metoda omogućuje relativno rangiranje otpornosti na abrazijsko trošenje različitih materijala ako je prevladavajući mehanizam trošenja abrazija.



Slika 9.8. Uređaj “suhi pijesak/gumeni kotač”

## 10. ISPITIVANJE TROŠENJA NA ABRAZIJU

Ispitivanje trošenja na abraziju je izvršeno na nodularnom lijevu NL700 (EN-GJS-700-2) i čeliku Č4739 (34CrAlMo5). Oba materijala su nitrirana sa tri različita postupka nitriranja, i to redom, u solnoj kupki (kratkotrajno kompleksno nitriranje), plinsko nitriranje i ionitriranje. Oba materijala su u svakom od navedenih postupaka nitrirana zajedno radi dosljednije usporedbe rezultata.

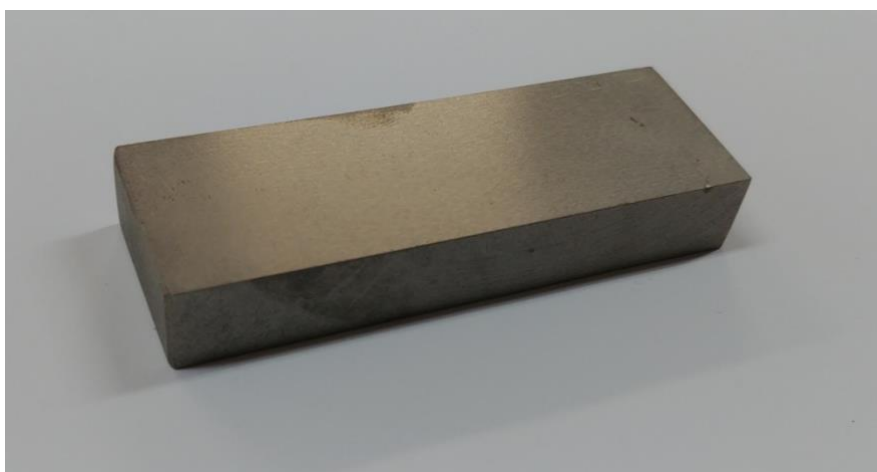
**Tablica 7.** *Popis ipitnih materijala i njihova mehanička svojstva*

Materijal	Granica razvlačenja, $R_e$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Vlačna čvrstoća, $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Tvrdoća, HB
NL700	420 min.	700 min.	225-305
Č4739	600 min.	800-1000	248

### 10.1. Provedba ipitivanja

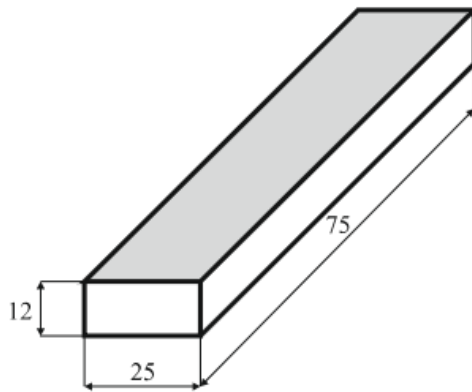
Za ispitivanje trošenja na abraziju odabran je postupak “suhi pijesak/gumeni kotač” (ASTM G65-suhi uvijeti ispitivanja). Kako bi se ispitivanje na uređaju moglo izvršiti napravljene su standardne epruvete (*slika 10.1.*) od oba materijala.

Sve epruvete su pobrušene da bi se dobila približno jednaka površinska hrapavost bez vidljivih riseva.



**Slika 10.1.** *Epruveta nakon nitriranja i prije ispitivanja abrazije*





**Slika 10.2.** *Skica standardne epruvete*

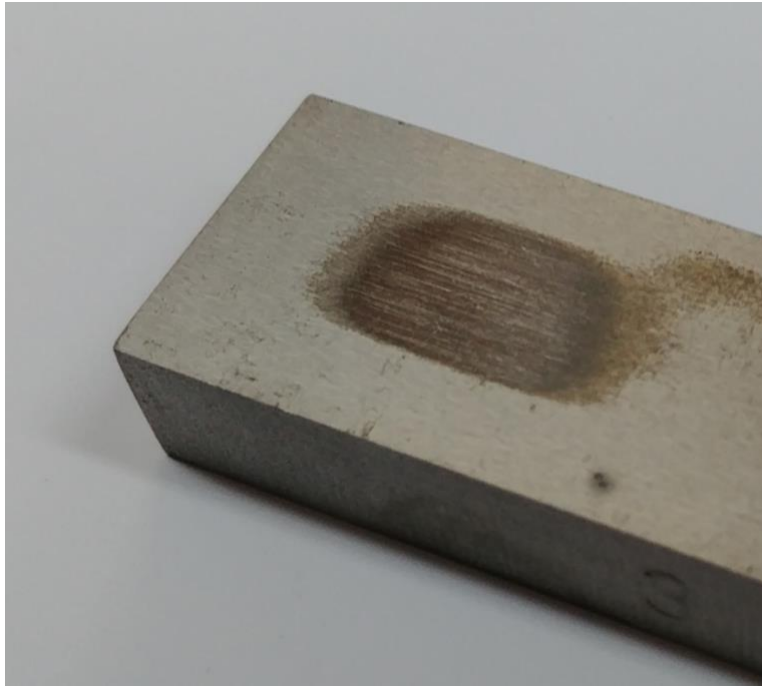
Nakon brušenja i čišćenja površine, epruvete su nitrirane.

Za svaki postupak nitriranja i određeni materijal dobiveno je šest epruveta standardnih dimenzija 25x12x75mm. Epruvete su izvagane na preciznoj vagi.

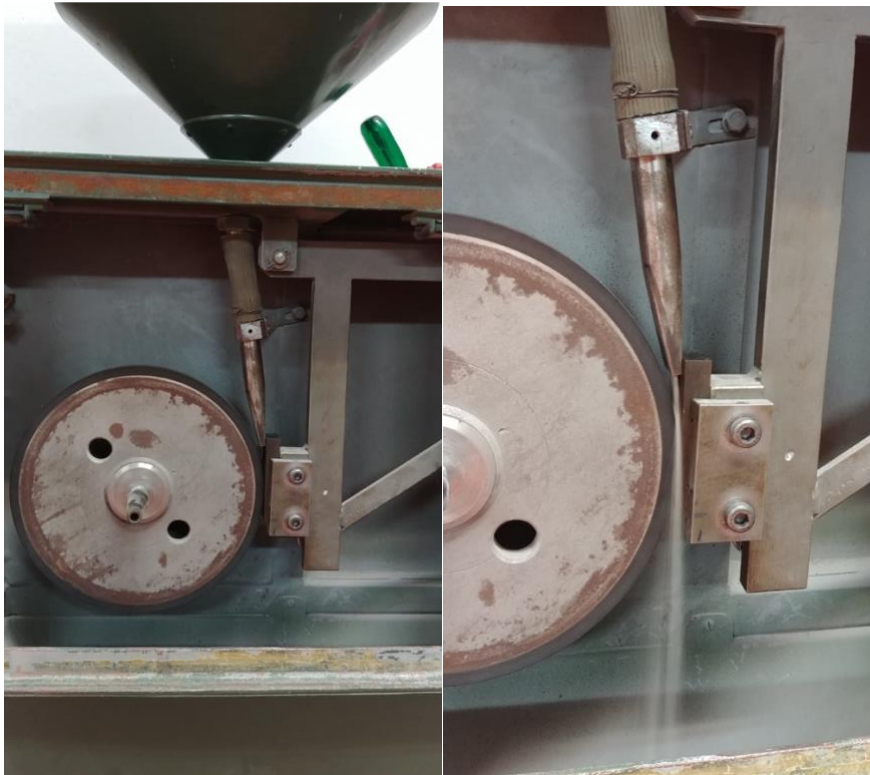
Abradirane su na uređaju za suhu abraziju, prema slici (*slika 10.4.*).

Svaki ciklus se radio na 100 okretaja kotača i pod opterećenjem od 45N.

Nakon abradiranja površine, epruvete su očišćene od mogućih čestica koje su ostale nakon ispitivanja abrazijom te podvrgnute vaganju na preciznoj vagi kako bi se utvrdio gubitak materijala na epruveti.



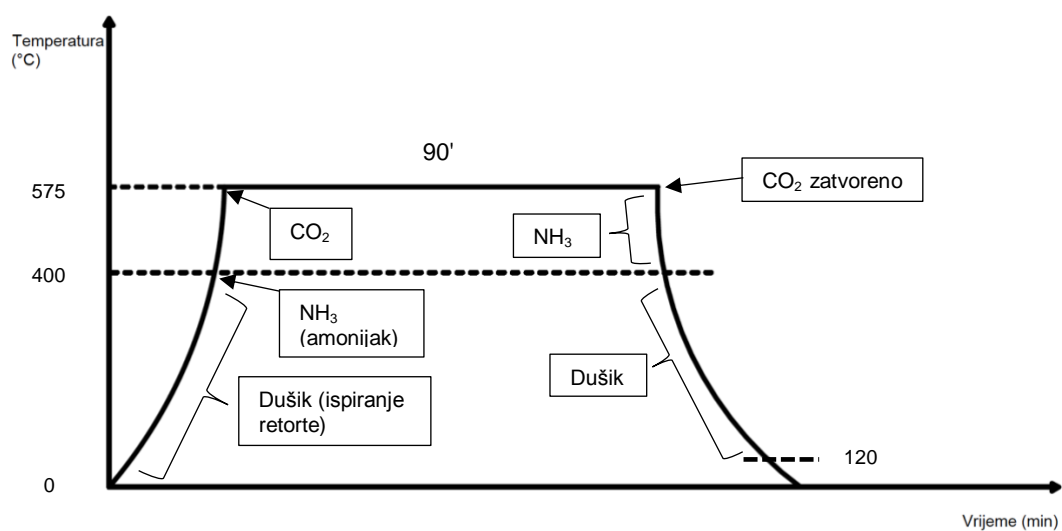
**Slika 10.3.** *Epruveta nakon ispitivanja abrazije sa vidljivim mjestom trošenja*



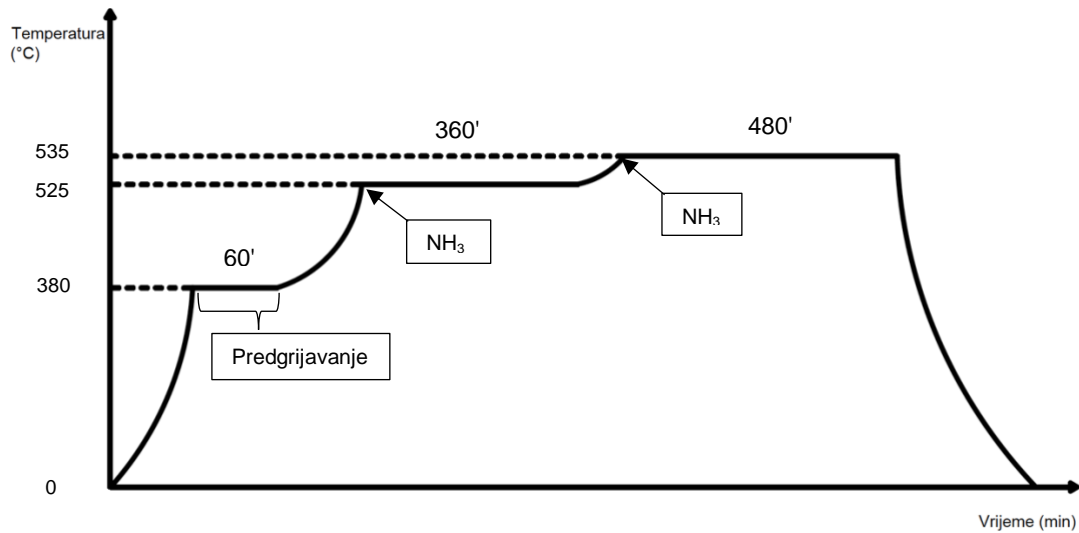
**Slika 10.4.** *Izvođenje pokusa na uređaju za suhu abraziju*

**Tablica 6. Parametri nitriranja**

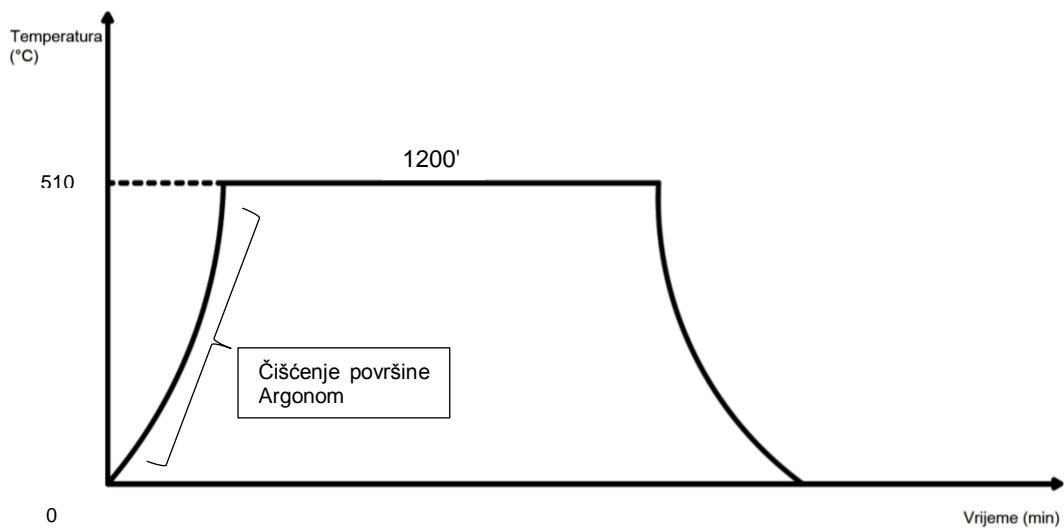
	Temperatura, [°C]	Vrijeme držanja, [h]	Medij	Napomena
<b>KKN</b>	575	1.5	CO <sub>2</sub> , amonijak	
<b>Plinsko</b>	380	1		predgrijavanje
	525	6	amonijak	
	535	8	amonijak	
<b>Ionitriranje</b>	510	20	dušik	Čišćenje Ar



**Slika 10.5. Skica procesa kratkotrajnog kompleksnog nitriranja**



Slika 10.6. Skica procesa plinskog nitriranja



Slika 10.7. Skica procesa plazma nitriranja

## 10.2. Način obrade rezultata

Zbog mogućeg velikog rasipanja rezultata za svaki uzorak je rađeno šest ispitivanja. Ti rezultati su zbrojeni i za njih je određena srednja aritmetička vrijednost prema formuli (11) kako bi se dobila usporedivost između različitih tipova nitriranja i materijala.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (11)$$

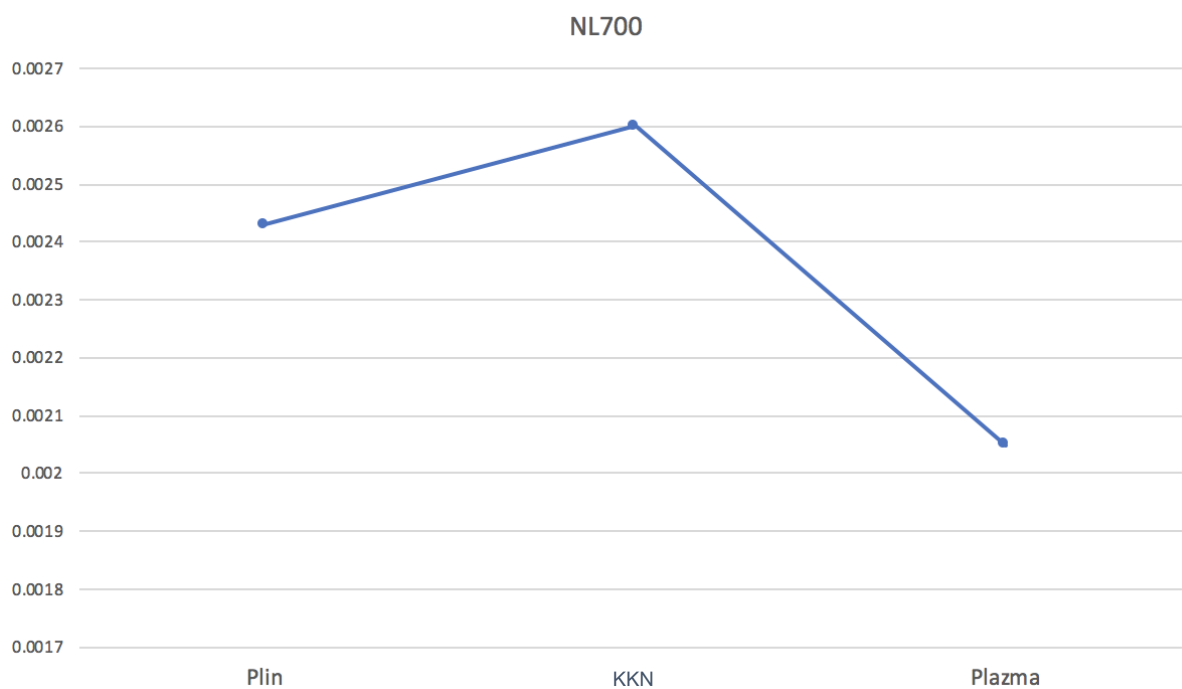
## 11. REZULTATI ISPITIVANJA

U tablici 7. navedeni su rezultati mjerenja nakon vaganja preciznom vagom.

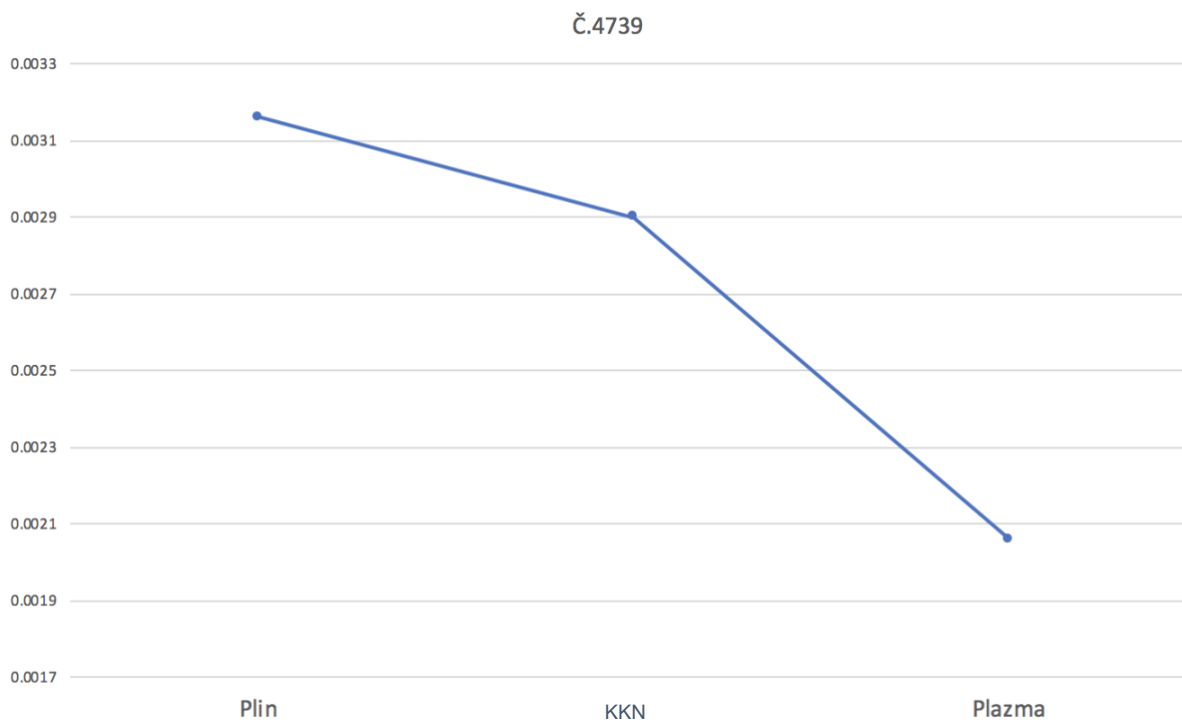
Manja vrijednost je povoljnija jer to znači da je tijekom ispitivanja odneseno manje materijala te je ta epruveta ili površinska obrada otpornija na abraziju.

**Tablica 7. Rezultati mjerenja**

NL 700		Č.4739	
Plinsko nitriranje			
0,0023	$\bar{x}=0,00243$	0,0037	$\bar{x}=0,00316$
0,0026		0,0024	
0,0022		0,0029	
0,0023		0,0034	
0,0024		0,0028	
0,0028		0,0038	
Kratkotrajno kompleksno nitriranje (KKN)			
0,0033	$\bar{x}=0,0026$	0,0028	$\bar{x}=0,0029$
0,0024		0,0029	
0,0021		0,0028	
0,0029		0,0031	
0,0025		0,0032	
0,0024		0,0026	
Plazma nitriranje			
0,0035	$\bar{x}=0,00205$	0,0030	$\bar{x}=0,00206$
0,0018		0,0015	
0,0016		0,0026	
0,0019		0,0020	
0,0021		0,0012	
0,0014		0,0021	



**Slika 11.1.** Graf usporedbe srednjih vrijednosti odnesenog materijala za NL700



**Slika 11.2.** Graf usporedbe srednjih vrijednosti odnesenog materijala za Č.4739

## 12. ZAKLJUČAK

Analizom dobivenih podataka moguće je usporediti kakav utjecaj imaju različite vrste nitiranja na otpornost ka abrazivnom trošenju, nadalje, cilj nije bio usporediti stanje prije nitiranja i nakon nitiranja tako da nije moguće dobiti niti kvalitativnu niti kvantitativnu usporedbu između ta dva stanja.

Ono što je moguće zaključiti je da različiti tipovi toplinske obrade, tj. nitiranja definitivno imaju utjecaj na otpornost ka abraziji.

Kod nodularnog lijeva lako se da zaključiti iz grafa na slici da je plinsko nitiranje dalo najgore karakteristike, dok je plazma nitiranje dalo najbolje.

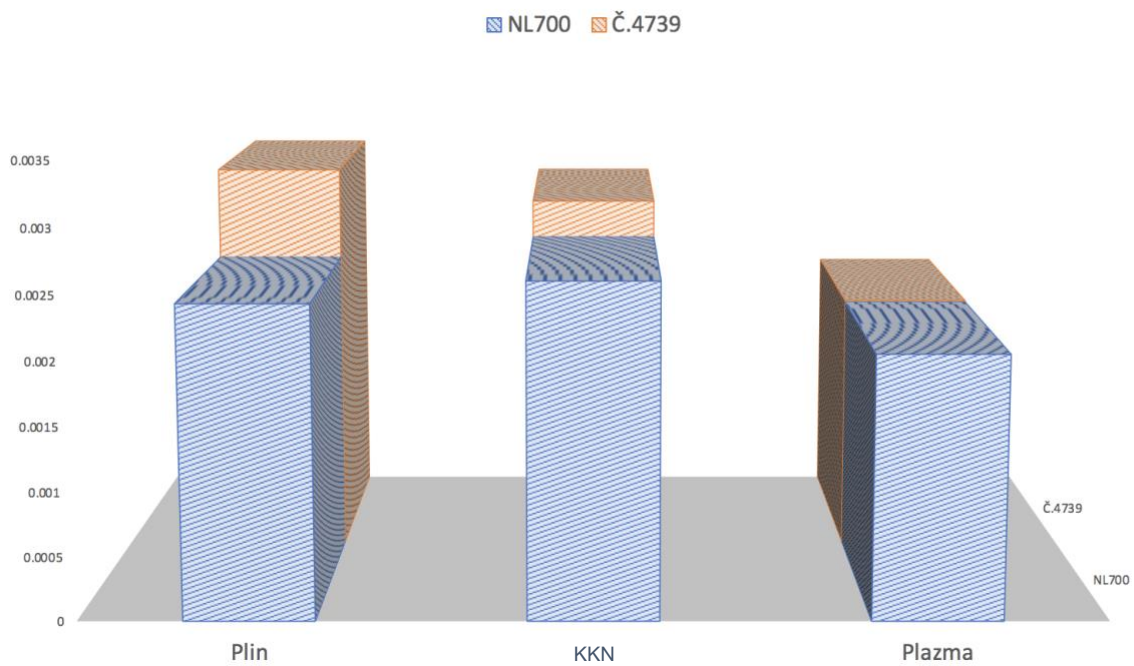
Kod čelika je također vidljivo da je plazma nitiranje dalo najbolju otpornost ka abraziji.

Moguće je pretpostaviti da zbog svoje dugotrajnosti procesa u odnosu na ostale procese nitiranja u ovom slučaju, plazma daje najbolju otpornost ka abraziji. Za točnije zaključke potrebno je daljnje ispitivanje dubine nitiranog sloja.

Ako usporedimo dva različita materijala slika (*slika 12.1.*), može se doći do zaključka da je odnošenje materijala kod NL700 manje u sva tri slučaja nitiranja u odnosu na Č.4739. Također, potrebno je daljnje ispitivanje tvrdoće.

Oba materijala se u industriji koriste u uvjetima pojačanog trošenja, koljenaste i bregaste osovine motora, košuljice cilindara motora i kompresora, stapajice, zupčanici, poklopci kliznih ležaja, rotori pumpa, itd. Iz ovog rada i eksperimenta koji ga prati, moguće je vidjeti da odgovarajućom ili kombinacijom toplinskih obrada se može povećati otpornost na abrazivno trošenje.

## USPOREDBA NL700 I Č.4739



**Slika 12.1.** Usporedba srednjih vrijednosti gubitaka materijala između NL700 i Č.4739



### 13. LITERATURA

- [1] "Fizikalna metalurgija I", dr.sc. Tanja Matković, dr.sc. Prosper Matković; [www.simet.unizg.hr](http://www.simet.unizg.hr), 2011.
- [2] "Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing", David Pye, ASM International; Materials Park, Ohio 2003.
- [3] "Specijalni čelici", skripta - Sveučilište u Zagrebu, [www.simet.unizg.hr](http://www.simet.unizg.hr), 2011.
- [4] "Toplinska obradba", Dragomir Krumes; Slavonski Brod, 2000.
- [5] "Dupleks postupak aluminiziranja i nitriranja čelika", Domagoj Augusta; Zagreb, 2011.
- [6] "Nitriranje", [hr.wikipedia.org](http://hr.wikipedia.org)
- [7] "Nitriding steel", Deutsche Edelstahlwerke; Witten, Njemačka, 2015.
- [8] "Principles of Gas Nitriding", Patrick Weymer, BeaverMatic Inc.; Rockford, Ill., 2009.
- [9] "Troubleshooting the nitriding process", David Pye; [www.industrialheating.com](http://www.industrialheating.com), 2016.
- [10] "Investigation on nitriding with emphasis in plasma nitriding process, current technology and equipment", Andres Bernal; Stockholm, Švedska, 2006.
- [11] "Postupak nitriranja u ioniziranom plinu", Franjo Bermanec; Karlovac, 2015.
- [12] "Materijali II", Skripta, Sveučilišni odjel za stručne studije; Split, 2015.
- [13] "Tribologija u strojarstvu", Krešimir Grilec, Suzana Jakovljević, Gojko Marić; Zagreb, 2017.
- [14] "Postupci modificiranja i prevlačenja površina", T. Filetin, K. Grilec; Zagreb, 2004.