# Utjecaj rezultata procesa poboljšavanja na efektivnu dubinu nitriranja

**Rudman, Franjo**

**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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:729545

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-28**

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**

**STROJARSKI ODJEL**

**SPECIJALISTIČKI STUDIJ STROJARSTVA**

FRANJO RUDMAN

# UTJECAJ REZULTATA PROCESA POBOLJŠAVANJA NA EFEKTIVNU DUBINU NITRIRANJA

Mentor:

Tomislav Božić, dipl.ing. strojarstva

**KARLOVAC, 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

CRS
HRN EN ISO 9001:2009

## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

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

Usmjerenje:.....Proizvodno strojarstvo Karlovac, 27.06.2018.

# ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student...Franjo Rudman..... Matični broj: 0123416003

Naslov: **Utjecaj rezultata procesa poboljšavanja na efektivnu dubinu nitriranja**

Opis zadatka:

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

U teoretskom dijelu rada opisati postupke Toplinskih obrada koje se koriste prilikom izrade rada kao i opis materijala korištenog u eksperimentu. Sukladno standardima i propisima obraditi načine kontrole kvalitete odnosno dokazivanja valjanosti provedenih procesa.

Eksperimentalni dio rada izvoditi prema zadanom planu pokusa. Variranjem temperatura visokotemperaturnog popuštanja analizirati rezultate dobivenih tvrdoća odnosno statičkim vlačnim pokusom-čvrstoća. Jednom od metoda nitriranja (klasično ili ionitriranje) istovremeno tretirati uzorke različitih čvrstoća te analizirati dobivene rezultate efektivnih dubina. Analizu rezultata obraditi dijagramskim prikazima i u donijeti zaključak o utjecaju čvrstoće na dubinu difuzije U konačnici analize donijeti zaključke koji se odnose na utjecaj čvrstoće jezgre materijala na vrijeme termodifuzije za prije procesa nitriranja zadane dubine difuzije.

Rad izraditi sukladno pravilniku za izradu završnih radova VuKa.

| Zadatak zadan: | Rok predaje rada: | Predviđeni datum obrane: |
|---|---|---|
| 27.06.2018. | 03.09.2018. | 10.09 .2018. |

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

**IZJAVA:**

Izjavljujem da sam ja – student Franjo Rudman, OIB: 73725724916, matični broj: 0123416003, upisan kao apsolvent akademske godine 2018./2019., radio ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja, te uz stručnu pomoć i vođenje mentora Tomislava Božiča, dipl. ing. stroj. i kod eksperimentalnog dijela u laboratoriju Ane Fudurić, struč. spec. ing. mech. i Dubravku Golubiću, dipl. ing. stroj. iz tvrtke Adriadiesel d.d. kojima se ovim putem zahvaljujem.

Također, zahvaljujem se svojoj supruzi i svojoj obitelji na potpori tijekom studija.

Franjo Rudman

_____

# SADRŽAJ

SAŽETAK ..... I

SUMMARY ..... II

POPIS SLIKA ..... III

POPIS TABLICA ..... VI

POPIS OZNAKA ..... VII

1. UVOD ..... 1

2. TOPLINSKA OBRADA METALA ..... 2

2.1 Poboljšanje čelika ..... 3

2.1.1. Kaljenje čelika ..... 5

2.1.2. Popuštanje čelika ..... 8

2.2. Prokaljivost čelika ..... 12

2.3. Mehanička svojstva poboljšanog čelika ..... 14

3. ČELICI ZA POBOLJŠANJE ..... 15

3.1. Vrste čelika ..... 15

3.2. Karakteristike čelika za poboljšanje ..... 15

4. TOPLINSKO KEMIJSKI POSTUPCI ..... 19

4.1. Nitriranje ..... 20

4.2. Svrha i područje primjene nitriranja ..... 22

4.3. Klasični postupak nitriranja u plinu ..... 22

4.4. Nitriranje u solnoj kupki ..... 24

4.5. Ionitriranje ..... 25

5. EKPERIMENTALNI DIO ZAVRŠNOG RADA ..... 27

5.1. Plan pokusa ..... 27

5.2. Čelik Č.4732 ..... 29
5.3. Testne epruvete ..... 34
5.4. Kemijski sastav materijala testnih epruveta ..... 36
5.5. Mjerenje tvrdoće Brinellovam metodom ..... 37
5.5.1. Mjerenje tvrdoće probnih štapova Brinellovom metodom nakon poboljšanja 39
5.6. Priprema za proces klasičnog nitriranja ..... 41
5.7. Statički vlačni pokus ..... 41
5.7.1. Ispitivanje vlačne čvrstoće testnih epruveta ..... 45
5.8. Mjerenje dubine nitriranog sloja i tvrdoće na površini ..... 47
5.9. Ispitivanje mikrotvrdoće Vickersovom metodom ..... 49
5.9.1. Priprema testnih epruveta za mikrotvrdoću ..... 51
5.9.2. Ispitivanje mikrotvrdoće pripremljenih uzorka ..... 53
6. ZAKLJUČAK ..... 60
7. LITERATURA ..... 63

# SAŽETAK

Ovim završnim radom prikazan je kakav utjecaj različitih temperatura visoko temperaturnog popuštanja na efektivnu dubinu nitriranja tj. ponašanje termokemijskog procesa nitriranja kod različitih vlačnih čvrstoća strojnih dijelova.

Teoretskim djelom rada prikazan je proces toplinske obrade poboljšanja i koje faze sadrži. Opisani su općenito čelici za poboljšanje. Objašnjeni su i termokemijski postupci klasičnog nitriranja i ionitriranja.

Početak eksperimentalnog dijela rada prikazuje plan cijelog pokusa. Objašnjen je čelik Č.4732 kojeg smo koristili za ispitivanje. Navedeni su nacrti i standardi kako su testne epruvete izrađene. Ispitana su mehanička svojstva testnih epruveta, uključujući mikrotvrdoću Vickers metodom.

Dobivenim vrijednostima i dijagramima dana je analiza i zaključak o utjecaju procesa poboljšanja na efektivnu dubinu nitriranja.

## SUMMARY

This final work shows the influence of different temperatures of high temperature relieving on the effective depth of nitration, ie the behavior of the thermochemical process of nitration at different tensile strength of the machine parts.

The theoretical part of the paper presents the process of heat treatment and which phases it contains. Steels for tempering are described generally. Thermochemical methods of classical nitration and iontraction are also discussed.

The beginning of the experimental part shows the plan of the whole experiment. The steel Č.4732 was used for the test. The designs and standards of how the tensile specimens are made were also described in the work. The mechanical properties of the test tubes, including the microhardness with Vickers method, were tested.

The obtained values and diagrams gave an analysis and conclusion on the effect of the improvement process on the effective nitration depth.

## POPIS SLIKA

Slika 1: Dijagramski prikaz postupka toplinske obrade (općenito) [1] ..... 2

Slika 2: Režim običnog postupka poboljšanja (lijevo), režim poboljšanja u toploj kupki (desno) [2] ..... 4

Slika 3: Burnsov dijagram [3] ..... 5

Slika 4: Dijagram postupka kaljenja nekog podeutektoidnog čelika [1] ..... 5

Slika 5: Utjecaj legirnih elemenata na temperaturu pretvorbe austenita u ferit [1] ..... 6

Slika 6: Utvrđivanje gornje kritične brzine gašenja [1] ..... 7

Slika 7: Dijagram postupka popuštanja čelika [1] ..... 9

Slika 8: Dijagrami popuštanja različitih vrsta čelika [1] ..... 11

Slika 9: Krivulja tvrdoće plitko kaljivog čelika i čelika koji prokaljuje [2] ..... 12

Slika 10: Jominy krivulje za kaljeno i popušteno stanje za plitko kaljivi i prokaljivi čelik [2] ..... 13

Slika 11: Različita sredstva za kaljenje za različite presjeke plitko kaljivog čelika [2] 13

Slika 12: Mehaničke osobine nelegiranih čelika u funkciji postotka ugljika [2] ..... 14

Slika 13: Postupci nitriranja [7] ..... 21

Slika 14: Sistematizacija postupaka nitriranja [7] ..... 21

Slika 15: Presjek retortne peći za plinsko nitriranje [7] ..... 23

Slika 16: Prikaz uređaja za dodavanje zraka u solnu kupku [7] ..... 24

Slika 17: Shematski prikaz procesa ionitriranja [7] ..... 25

Slika 18: Shematski prikaz postrojenja za ionitriranje [7] ..... 26

Slika 19: Plan pokusa ..... 28

Slika 20: Pojas garantirane prokaljivosti čelika Č.4732 [5] ..... 33

Slika 21: Vrijednosti utjecaja temperatura popuštanja na mehanička svojstva čelika Č.4732 [5] ..... 33

Slika 22: Standard DIN 50125 za izradu epruvete [8] ..... 34

Slika 23: Nacrt i model izrađenih epruveta ..... 35
Slika 24: Uređaj za analizu kemijskog sastava materijala..... 36
Slika 25: Mjerenje tvrdoće po Brinellu [9]..... 37
Slika 26: Dijagram očitanja približnih teoretskih vrijednosti vlačne čvrstoće ..... 40
Slika 27: Priprema epruveta za proces nitriranja ..... 41
Slika 28: Dijagram sila F- produljenje ΔL za konstrukcijski čelik [10] ..... 42
Slika 29: Hookov dijagram [10] ..... 44
Slika 30: Kidalica proizvođača Otto Wolpert Werke..... 46
Slika 31: Epruvete nakon vlačnog ispitivanja..... 47
Slika 32: Mjerenje tvrdoće nitriranog sloja [7] ..... 48
Slika 33: Mjerenje tvrdoće po Vickersu [10]..... 49
Slika 34: Rezanje epruvete na rezačici Labotom-3..... 51
Slika 35: Uređaj za poliranje Struers, modela LoboPol-5..... 52
Slika 36: Uzorci pripremljeni za ispitivanje mikrotvrdoće ..... 52
Slika 37: Mikrotvrdomjer Leitz Wetzlar model Durimet 2 ..... 53
Slika 38: Dijagram i tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,5 za uzorak 2 ..... 54
Slika 39: Dijagram i tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,3 za uzorak 2 ..... 54
Slika 40: Dijagram i tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,5 za uzorak 3 ..... 55
Slika 41: Dijagram i tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,3 za uzorak 3 ..... 55
Slika 42: Dijagram i tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,5 za uzorak 4 ..... 56
Slika 43: Dijagram i tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,3 za uzorak 4 ..... 56

Slika 44: Dijagram vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,5 za sve uzorke ..... 57

Slika 45: Dijagram vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,3 za sve uzorke ..... 58

Slika 46: Dijagram ovisnosti efektivne dubine nitriranja i tvrdoće jezgre ..... 60

Slika 47: Metalografska slika uzorka 2 ..... 61

Slika 48: Metalografska slika uzorka 3 ..... 61

Slika 49: Metalografska slika uzorka 4 ..... 62

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Kemijski sastav čelika Č.4732 [5] ..... 29

Tablica 2: Mehanička svojstva čelika Č.4732 u poboljšanom stanju [5] ..... 31

Tablica 3: Mehanička svojstva čelika Č.4732 kod trajnih titrajnih naprezanja [5]..... 31

Tablica 4: Vrijednosti za tvrdoću s obzirom na stanje toplinske obrade za čelik Č.4732 [5] ..... 32

Tablica 5: Fizikalna svojstva čelika Č.4732 [5] ..... 32

Tablica 6: Prokaljivost čelika Č.4732 [5] ..... 32

Tablica 7: Oznake, količina epruveta i temperatura visoko temperaturnog popuštanja epruveta..... 35

Tablica 8: Kemijski sastav čelika Č.4732 dobiven analizom u labaratoriju ..... 36

Tablica 9: Vrijednost stupnja opterećenja za pojedine grupe metalnih materijala [10] ..... 38

Tablica 10: Vrijednosti tvrdoće nakon toplinske obrade poboljšanja..... 39

Tablica 11: Propisani prirast naprezanja pri statičkom vlačnom pokusu [10]..... 42

Tablica 12: Vrijednosti prije i nakon (plava boja) vlačnog ispitivanja ..... 46

Tablica 13: Sile utiskivanja kod mikrotvrdoće ..... 50

Tablica 14: Tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,5 za sve uzorke ..... 57

Tablica 15: Tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,3 za sve uzorke ..... 58

Tablica 14: Ključni parametri i njihove vrijednosti ..... 59

## POPIS OZNAKA

| OZNAKA | MJERNA JEDINICA | ZNAČENJE |
|---|---|---|
| A | % | istezljivost |
| $A_1$ | °C | temperatura eutektoidne pretvorbe |
| $A_z$ | | zaostali austenit |
| d | mm | promjer / dijagonala otiska |
| $d_0$ | mm | početni promjer |
| D | mm | promjer kuglice |
| F | N | sila pritiska penetranta |
| $F_e$ | N | sila tečenja |
| $F_k$ | N | konačna sila |
| $F_m$ | N | maksimalna sila |
| h | mm | dubina prodiranja penetranta |
| HB | | tvrdoća prema Brinellu |
| HG | | granična tvrdoća |
| HV | | tvrdoća prema Vickersu |
| $K_p$ | | karbid popuštanja |
| K“ | | sekundarni karbid |
| $L_0$ | mm | početna mjerna duljina |
| $L_u$ | mm | konačna mjerna duljina |
| $M_f$ | | temp. završetka stvaranja martenzita |
| $M_p$ | | popušteni martenzit |
| $M_s$ | | temp. početka stvaranja martenzita |
| M“ | | sekundarni martenzit |
| $N_{ht}$ | mm | efektivna dubina nitriranja |
| $N_{ht2}$ | mm | ef. dub. nitriranja uzorka 2 |
| $N_{ht3}$ | mm | ef. dub. nitriranja uzorka 3 |

| | | |
|---|---|---|
| $N_{ht4}$ | mm | ef. dub. nitriranja uzorka 4 |
| $R_m$ | $N/mm^2$ | vlačna čvrstoća |
| $R_e$ | $N/mm^2$ | granica razvlačenja |
| $R_k$ | $N/mm^2$ | granica loma |
| S | $mm^2$ | površina otiska |
| $S_0$ | $mm^2$ | pov. poprečnog presjeka |
| $S_u$ | $mm^2$ | pov. konačnog presjeka |
| t | s,h | vrijeme |
| $t_{i\ min}$ | s | minimalno trajanje inkubacije |
| $v_{kg}$ | °C/s | gornja kritična brzina gašenja |
| X | $N/mm^2$ | stupanj opterećenja |
| Z | % | suženje (kontrakcija) |
| $\Delta L$ | mm | produljenje |
| $\Delta N_{ht23}$ | mm | razlika ef. dub. nitriranja između uzorka 2 i 3 |
| $\vartheta_{T.O.}$ | °C | temp. toplinske obrade |
| $\vartheta_a$ | °C | temperatura austenitizacije |
| $\vartheta_i$ | °C | temperatura inkubacije |
| $\vartheta_p$ | °C | temperatura popuštanja |
| $\varepsilon$ | mm/mm | istezanje |
| $\delta$ | $N/mm^2$ | naprezanje |
| $\delta_{m2}$ | $N/mm^2$ | vlačna čvrstoća uzorka 2 |
| $\delta_{m3}$ | $N/mm^2$ | vlačna čvrstoća uzorka 3 |
| $\delta_{m4}$ | $N/mm^2$ | vlačna čvrstoća uzorka 4 |

# 1. UVOD

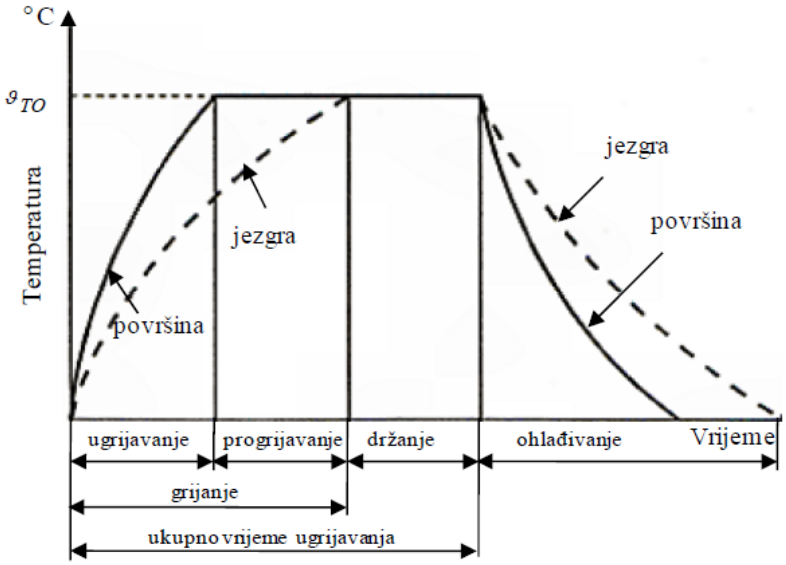
Danas i u bliskoj budućnosti, s obzirom na brzi razvoj novih i unapređenje starih tehnologija, najvažniji parametar na kojeg se najviše gleda je vrijeme. Dobro nam poznata izreka: „Vrijeme je novac.“. Njome se povode svi poslodavci, investitori i poslovni ljudi. Sama riječ vrijeme dobiva još više na važnosti ako znamo da se informatizacijom i robotizacijom smanjuje ljudska radna snaga. Također, važna je što veća efikasnost opreme i ljudi. Dakle, u što manje vremena dobiti bolji i kvalitetniji proizvod, a pritom ga jeftinije proizvesti.

Glavni dio ovog rada je eksperimentalni dio gdje će se, kroz postupak toplinske obrade poboljšanja i termokemijskog postupka nitriranja istih epruveta, pokazati da li je moguće različitim čvrstoćama na istom materijalu dobiti veće vrijednosti efektivnih dubina nitriranja. Na taj način, ukoliko strojni dio nema velike zahtjeve u primjeni, smanjenom čvrstoćom materijala ispitat će se može li se skratiti postupak procesa nitriranja. Ovim načinom pokazat će se može li se uštedjeti na proizvodnji strojnih dijelova zbog manjeg utroška energenata i smanjuje li se broj radnih sati ljudske radne snage.

## 2. TOPLINSKA OBRADA METALA

Toplinska obrada je postupak u kojem se predmet namjerno podvrgava temperaturno vremenskim ciklusima kako bi se postigla željena mikrostruktura, a time i željena mehanička, fizička i kemijska svojstva.

Iz definicije možemo zaključiti da su temeljni parametri postupka toplinske obrade temperatura i vrijeme, da trajanje nije beskonačno i da svojstva materijala proizlaze iz njihove mikrostrukture.




Slika 1: Dijagramski prikaz postupka toplinske obrade (općenito) [1]

Navedene veličine na slici 1 znače:

$\vartheta_{T.O.}$ --- temperatura toplinske obrade (općenito)

**ugrijavanje** --- trajanje do trenutka kada površinski slojevi dostignu temperaturu toplinske obrade

**progrijavanje** --- vrijeme trajanja od trenutka ugrijanja površine do trenutka kada i slojevi jezgre postignu temperaturu toplinske obrade, tj. kada po cijelom presjeku radnog dijela imamo konstantnu temperaturu

**grijanje** --- zbroj trajanja vremena ugrijavanja i progrijavanja

**držanje** --- trajanje boravka radnog dijela na temperaturi toplinske obrade od trenutka kada je on progrijan do trenutka kada započinje hlađenje radnog dijela

**ohlađivanje** --- trajanje snižavanja temperature radnog dijela sve dok svi slojevi jezgre ne dostignu zadanu temperaturu, tj. izjednače je s temperaturom površinskih slojeva i okoliša [1]

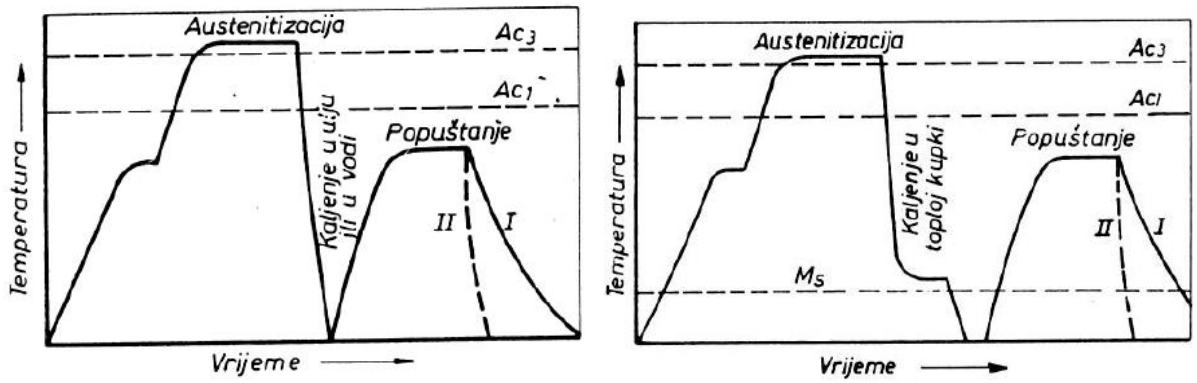
## 2.1 Poboljšanje čelika

Poboljšanje je postupak termičke obrade čelika, koji se sastoji iz kaljenja i popuštanja na relativno visoke temperature, koje se često već približavaju temperaturama mekog žarenja. S obzirom na korišteno rashladno sredstvo pri kaljenju govorimo o poboljšanju u vodi, ulju ili na zraku.

Pri poboljšanju u čeliku dobijemo tzv. tipične „poboljšanje strukture“, koje su uglavnom sorbitne, bainitne ili troostitne. Poboljšanje se primjenjuje u termičkoj obradi konstrukcijskih i nekih alatnih čelika, a ima cilj da se poboljšaju mehanička svojstva čelika i to naročito žilavost.

Uobičajeni postupak poboljšanja sastoji se iz običnog kaljenja austenitizacijom 30 do 50°C iznad $Ac_3$, odgovarajućeg ohlađivanja u vodi, ulju ili zraku i popuštanju na odgovarajuću temperaturu ispod $Ac_1$. Kod ohlađivanja s temperature popuštanja potrebno je obratiti pažnju na krtost čelika nakon poboljšanja.

U ovaj klasičan način poboljšanja uvedene su u toku vremena neke promjene tako što su razvijeni novi postupci, moderniji, ekonomičniji i u pojedinim slučajevima efikasniji, kao na primjer kaljenje u toploj kupci (slika 2), koji je samo varijanta klasičnog postupka sa zadržavanjem ohlađivanja iznad temperature Ms do izjednačenja temperature po čitavom presjeku.




Slika 2: Režim običnog postupka poboljšanja (lijevo), režim poboljšanja u toploj kupki (desno) [2]

Režim običnog postupka poboljšanja:

1. Hlađenje na zraku ili peći za čelike, koji su otporni prema krtosti popuštanja
2. Hlađenje u vodi ili ulju za čelike, koji su skloni krtosti popuštanja

Režim poboljšanja u toploj kupki:

1. Hlađenje na zraku ili u peći za čelike, koji su otporni prema krtosti popuštanja
2. Hlađenje u vodi ili ulju za čelike koji su skloni krtosti popuštanja [2]

Tom se postupku podvrgavaju samo podeutektoidni čelici sadržaja ugljika od 0,3 % do 0,6 %. U praksi se taj postupak naziva još i oplemenjivanje.

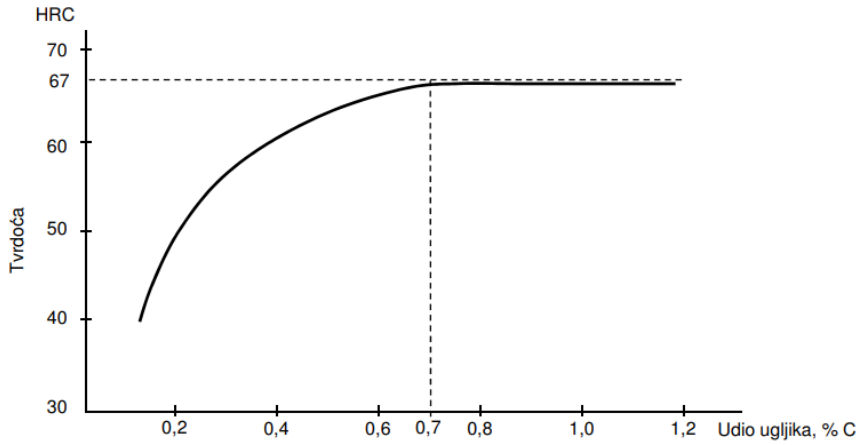
Cilj poboljšavanja je da se, raspadanjem prinudnog rastvora (martenzita) ili prezasićenog rastvora (austenita), izdvoje što sitnija zrnca karbida koji imaju svojstvo ojačanja ograničavanjem kretanja dislokacija, što dovodi do povećanja čvrstoće i tvrdoće, uz odgovarajuće sniženje žilavosti.

Potpuni efekt ovakvog ojačanja nastati će ako je čelik kaljen na najveću tvrdoću koja odgovara sadržaju ugljika, uz ispravno popuštanje, ili ako je prije pothlađivanja na izotermnu transformaciju izvršena potpuna austenitizacija.

Poboljšavanje se u strojarstvu prvenstveno vrši iz razloga da bi se nakon procesa obrade, koji štetno utječe na strukturu i osobine (lijevanje, plastično deformiranje, obrada rezanjem itd.), osobine znatno popravile i uskladile sa uvjetima primjene strojnih dijelova. Poboljšane osobine mogu se u određenim granicama precizno regulirati što je vrlo važno radi uzajamnog ponašanja dvije najbitnije osobine čelika: čvrstoće i žilavosti. [4]

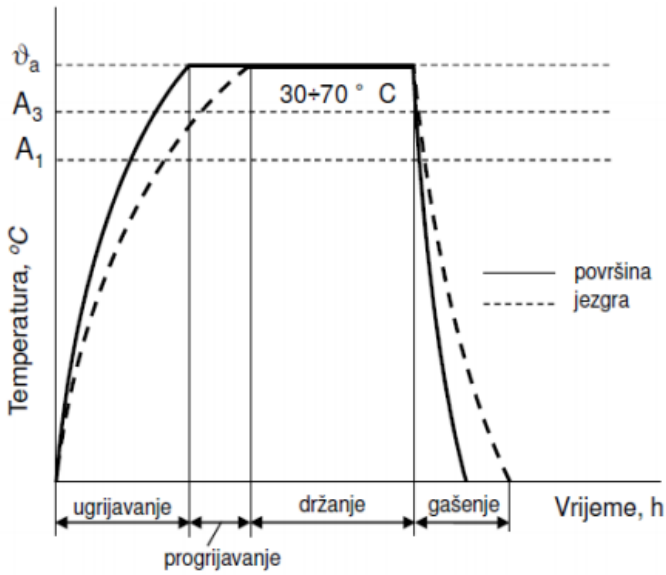
### *2.1.1. Kaljenje čelika*

Temeljna je svrha kaljena čelika postizanje maksimalno moguće tvrdoće ovisno o udjelu ugljika u čeliku (Burnsov dijagram), postizanje što jednoličnijeg prokaljenja (tj. što jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku).




Slika 3: Burnsov dijagram [3]

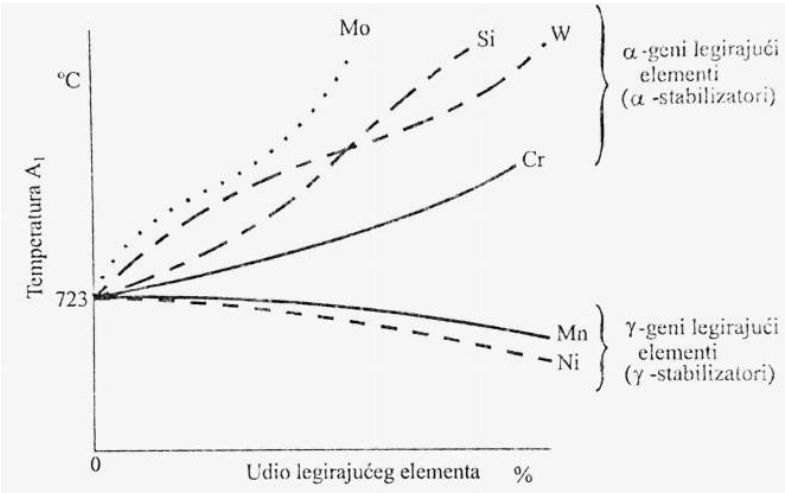
Postupak kaljenja sastoji se od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije (u svrhu otapanja ugljika i legirajućih elemenata u austenitu) i gašenja (u svrhu postizanja martenzitne mikrostrukture). Slika 4 prikazuje kvalitativno postupak kaljenja nekog podeutektoidnog čelika.




Slika 4: Dijagram postupka kaljenja nekog podeutektoidnog čelika [1]

**Izbor temperature austenitizacije:**

- za ugljične(nelegirane) čelike iz dijagrama Fe-$Fe_3C$
- za čelike legirane α-genim legirajućim elementima, temperatura austenitizacije se u odnosu na nelegirane čelike povisuje približno za iznos povišenja temperatura $A_1$ (odnosno $A_3$); slika 5
- za čelike legirane γ-genim legirajućim elementima, temperatura austenitizacije se snizuje u odnosu na odgovarajuće nelegirane čelike otprilike za iznos sniženja temperatura $A_1$ (odnosno $A_3$): slika 5




Slika 5: Utjecaj legirnih elemenata na temperaturu pretvorbe austenita u ferit [1]

Temperatura austenitizacije legiranih čelika utvrđuje se iz pseudobinarnog dijagrama analogno određivanju temperature austenitizacije nelegiranih čelika iz dijagrama Fe-$Fe_3C$. U praksi se temperatura austenitizacije određuje na osnovi podataka proizvođača čelika i eksperimentalnom provjerom.

**Svrha držanja pri temperaturi austenitizacije:**

U slučaju realno brzog ugrijavanja eutektoidni se karbidi ne stignu svi rastvoriti pri temperaturi $A_1$, pa čak ni u intervalu $A_1 – A_3$. Prema tome pri temperaturi $A_3$, čelik sadrži još uvijek neraspadnute karbide, što znači da mu austenit u tom trenutku sadrži niži udio ugljika nego što je onaj na koji se računa. Kako bi se dalo vremena austenitu da primi u čvrstu otopinu ugljik iz tih karbida, treba čelični predmet držati neko vrijeme pri temperaturi austenitizacije. Tek ako se austenitu da dovoljno vremena da otopi željezni udio ugljika, može se računati da će se on pri gašenju

ponašati onako kako to proizlazi iz odgovarajućeg TTT – dijagrama odnosno Burnsova dijagrama.

**Izbor sredstava za gašenje**

Izbor sredstava za gašenje slijedi iz iznosa gornje kritične brzine gašenja. Ona se izračunava iz odgovarajućeg TTT – dijagrama prema izrazu:

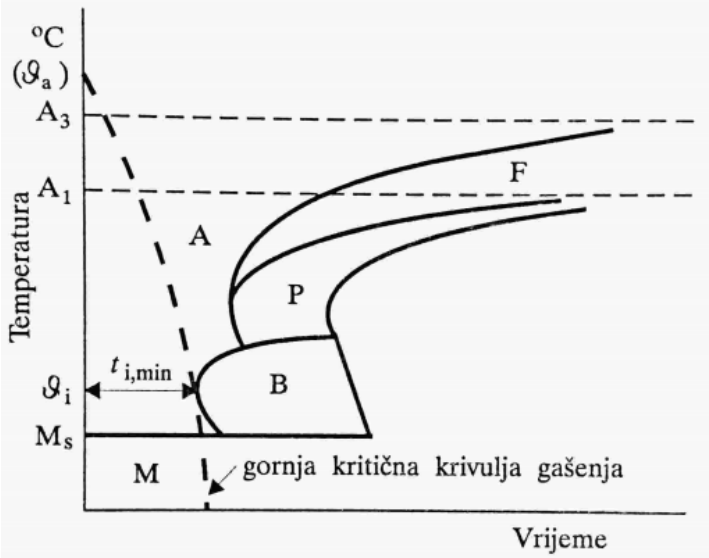
$$v_{kg} = \frac{\vartheta_a - \vartheta_i}{t_{i,min}},\ °C/s$$

$v_{kg}$-gornja kritična brzina gašenja

$\vartheta_a$ – temperatura austenitizacije

$\vartheta_i$ – temperatura inkubacije

$t_{i,min}$ – minimalno trajanje inkubacije




Slika 6: Utvrđivanje gornje kritične brzine gašenja [1]

Za praksu vrijede sljedeća pravila:

- $v_{kg}$ > 150°C/s – čelik treba gasiti u vodi
- 150 > $v_{kg}$ > 5°C/s – čelik treba gasiti u ulju ili u uljnoj emulziji, odnosno u toploj kupki
- $v_{kg}$ < 5°C/s – čelik se smije hladiti na zraku ili bolje u inertnom plinu (npr. dušiku).

Navedeni podaci samo su grubo orijentacijski, a osim toga odnose se na brzo gašenje tankih uzoraka, kako bi se smjelo pretpostaviti da po presjeku epruvete praktički nema temperaturne razlike. U realnom se slučaju sredstvo za gašenje mora birati i u ovisnosti o dimenzijama predmeta koji se želi zakaliti i prokaliti, pa je nužno postići gornje kritično gašenje i u jezgri predmeta.

**Kontrola kaljenja**

U praksi se kontrola kvalitete zakaljenog predmeta izvodi u pravilu mjerenjem tvrdoće nakon gašenja te usporedbom postignute tvrdoće s Burnsovim dijagramom. U slučaju proizvodnje strojnih dijelova i alata u većim serijama, postupci kontrole obuhvatit će i mikrografska, ultrazvučna, rentgenska i druga ispitivanje.

**Ostali postupci kaljenja čelika**

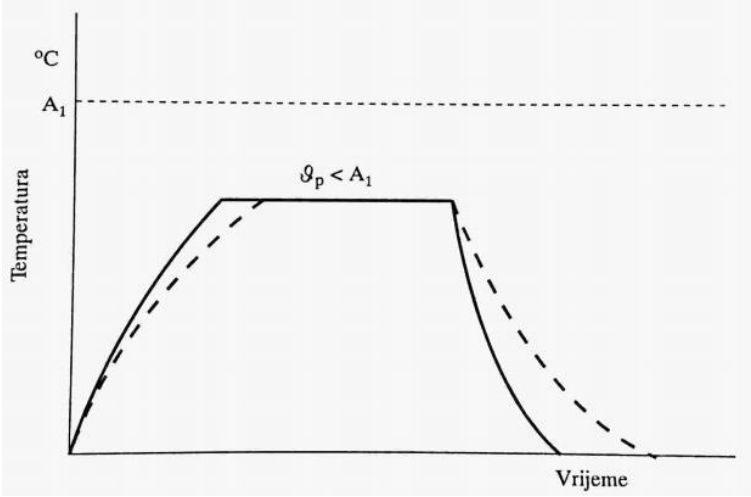
Osim kaljenja cijele mase strojnog dijela, u praksi se primjenjuje i postupak lokalnog (površinskog) kaljenja. Pri tim se postupcima ugrijavaju samo neki dijelovi volumena proizvoda koje treba kaljenjem otvrdnuti.

Primjenjuju se izvori topline velike gustoće energije: plinski plamenici, inducirana električna energija, a u novije vrijeme laserski snop i snop elektrona.[1]

### *2.1.2. Popuštanje čelika*

Popuštanje je postupak ugrijavanja kaljenog čelika na neku temperaturu ispod temperature $A_1$ u svrhu: povišenja žilavosti martenzita postignutog kaljenjem, sniženja (redukcije) vlastitih zaostalih naprezanja („napetosti“) martenzita, postizanja dimenzijske postojanosti (kod visokolegiranih alatnih čelika pretvorbom zaostalog austenita u martenzit i karbid popuštanja).

Popuštanjem se redovno i smanjuje tvrdoća postignuta kaljenjem, no to sniženje nikako nije cilj, nego samo nužna posljedica popuštanja. Slika 7 prikazuje opći dijagram postupka popuštanja čelika.




Slika 7: Dijagram postupka popuštanja čelika [1]

Prema visini temperature popuštanja ($\vartheta_p$) postupci se popuštanja dijele na:

- Niskotemperaturno popuštanje ($\vartheta_p < 220°C$)
- Srednjetemperaturno popuštanje ($220°C < \vartheta_p < 400°C$)
- Visokotemperaturno popuštanje ($400°C < \vartheta_p < A_1$)

Ugrijavanje martenzita na neku temperaturu popuštanja omogućava već izvjesnu difuziju atoma ugljika pri niskim temperaturama popuštanja, a difuziju atoma ugljika, željeza i legirajućih elemenata pri visokim temperaturama popuštanja. Kada se čelik nalazi u gašenom (zakaljenom) stanju on ima rešetku martenzita koja je karakterizirana visokim stupnjem tetragonalnosti.

Pri popuštanju, a zbog difuzije atoma ugljika, u nekim jediničnim ćelijama kristalne rešetke dolazi do sniženja stupnja tetragonalnosti u odnosu na gašeno stanje (jer se atom ugljika smjestio na povoljnije mjesto), a u drugim jediničnim ćelijama stupanj je tetragonalnost poprimio vrijednost 1 (jer je atom ugljika izašao iz rešetke).

Sniženje stupnja tetragonalnosti (c/a) nekih jediničnih ćelija na vrijednost nižu od one nakon kaljenja (ali još uvijek višu od 1), a preostalih jediničnih ćelija na vrijednost c/a=1 ima za posljedicu:

- povišenje žilavosti popuštenog martenzita,
- sniženje zaostalih naprezanja popuštenog martenzita,

- sniženje tvrdoće (što je nepoželjno, ali i neizbježno).

Procesi pri popuštanju čelika odvijaju se u tzv. stadijima popuštanja koje karakteriziraju mikrostrukturne promjene. Broj tih stadija i područje temperatura u kojima se odvijaju ovisit će o vrsti čelika i strukturnom stanju nakon gašenja. Tako se u prvom stadiju popuštanja (koji se odvija pri temperaturama od oko 70 do 200°C), zbog difuzije ugljikovih atoma iz martenzitne rešetke, oni atomi ugljika koji su potpuno izišli iz martenzitne rešetke spajaju sa željezom, najprije u tzv. prelazni ε-karbid ($Fe_{2,4}C$), a pri temperaturama iznad 250°C (u trećem stadiju popuštanja) u $Fe_3C$. u drugom pak stadiju popuštanja (popuštanjem pri temperaturama od oko 200 do 300°C) doći će do pretvorbe nelegiranog i niskolegiranog zaostalog austenita u bainit. Visokolegirani zaostali austenit transformirat će se tek popuštanjem pri visokim temperaturama, iznad 500°C, kako je to opisano kasnije.

Prema tome, pri popuštanju čelika (ovisno o parametrima postupka) dolazi do:

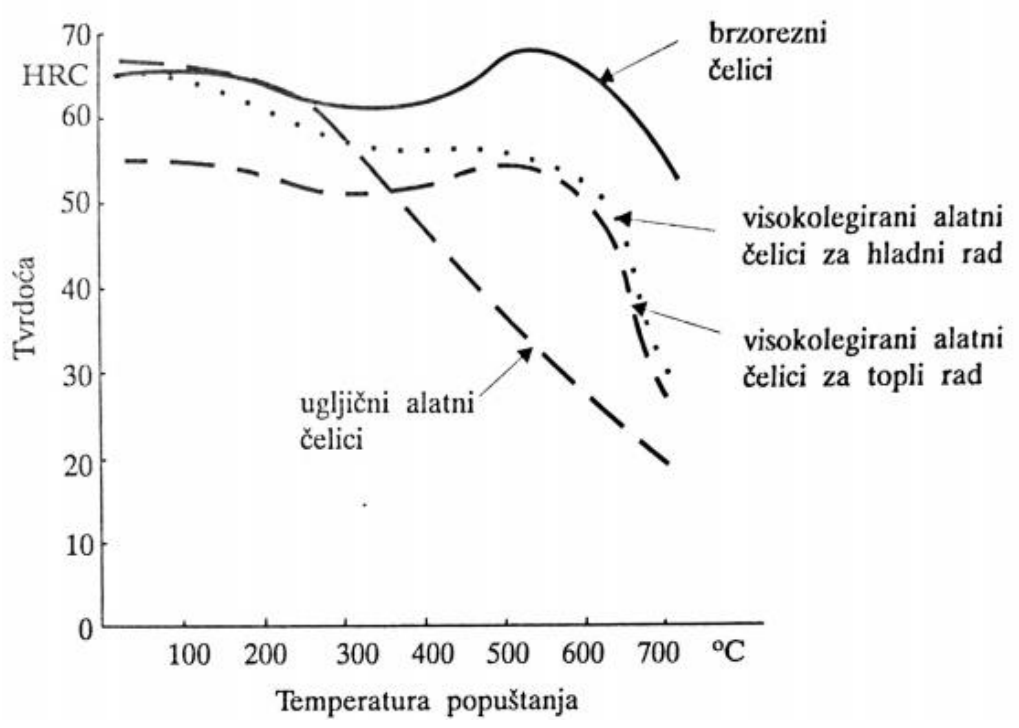
- sniženja prosječnog udjela ugljika u martenzitu na oko 0,25%C i manje,
- stvaranja karbida koji su nastali popuštanjem martenzita,
- pretvorbe zaostalog austenita u martenzit.

Slijedi konačno da je struktura popuštenog ugljičnog čelika:

- popušteni martenzit i karbid popuštanja ($M_p$ + $K_p$) (ugljični čelici s < 0,6%C)
- popušteni martenzit, karbid popuštanja (eventualno zaostali austenit) ($M_p$ + $K_p$ + ($A_z$)…(ugljični čelici s 0,6 do 0,8%C)
- popušteni martenzit, karbid popuštanja, sekundarni karbid (eventualno zaostali austenit) ($M_p$+ $K_p$ + K“ + ($A_z$)… (ugljični čelici s 0,8 do 2% C).

Kod legiranih se čelika pri popuštanju u IV. Stadiju izlučuju posebni karbidi popuštanja vrste i sastava koji ovise o legirajućim elementima u čeliku. Tako se i procesi popuštanja zakaljenih čelika međusobno razlikuju. Neki legirajući elementi u kaljenim čelicima povećavaju otpornost popuštanja (npr.: W, Mo, V, …) tako da tvrdoća čelika ne opada tako intenzivno s porastom temperature popuštanja kao što je to slučaj kod ugljičnih (nelegiranih) čelika, slika 9. To svojstvo otpornosti na popuštanje važno je za dijelove namijenjene za rad pri povišenim temperaturama.

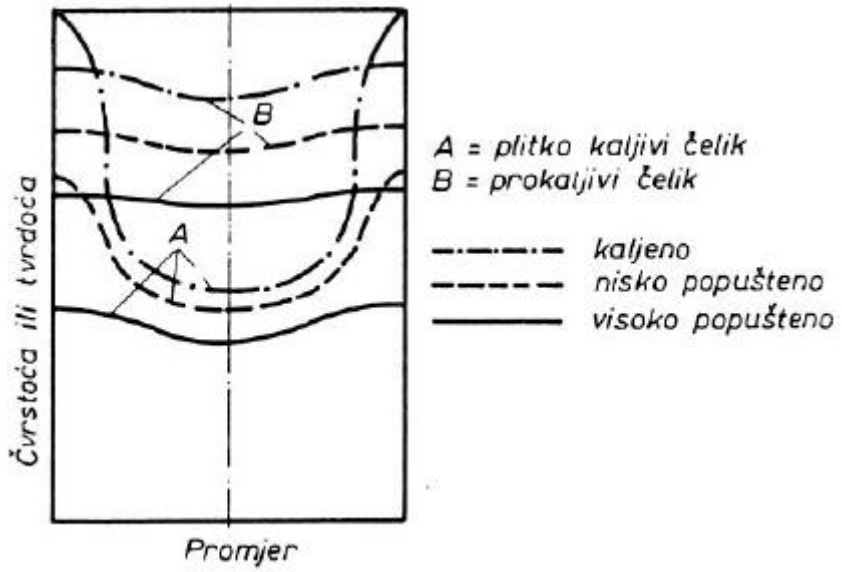
Kod nekih visokolegiranih čelika koji osim određenih legirajućih elemenata (W, Mo, V,…) imaju i povišeni sadržaj ugljika (alatni čelici) pri visokotemperaturnom popuštanju (≈550°C) odvija se proces pretvorbe zaostalog austenita u karbide popuštanja i sekundarni martenzit. Pri temperaturi popuštanja oko 550°C iz legiranog zaostalog austenita izlučuju se karbidi popuštanja ($K_p$), a pri tome se u zaostalom austenitu, snizuje udio ugljika i legirajućih elemenata. To ima kao posljedicu povišenje temperature početka pretvorbe u martenzit ($M_s$) i završetka pretvorbe ($M_f$). Zbog toga se hlađenjem s temperature popuštanja zaostali austenit pretvara u martenzit koji nazivamo „sekundarni martenzit“ (M“). Iz relativno mekane faze (austenita) nastaju dvije bitno tvrđe faze (karbid popuštanja i sekundarni martenzit) što ima za posljedicu povišenje tvrdoće nakon takvog popuštanja. Tvrdoća je u tom slučaju čak i nešto viša od tvrdoće kaljenog (još nepopuštenog) čelika. Ova pojava naziva se „**sekundarno otvrdnuće**“. Slika 8 prikazuje krivulje popuštanja nekih karakterističnih vrsta čelika. [1]




Slika 8: Dijagrami popuštanja različitih vrsta čelika [1]

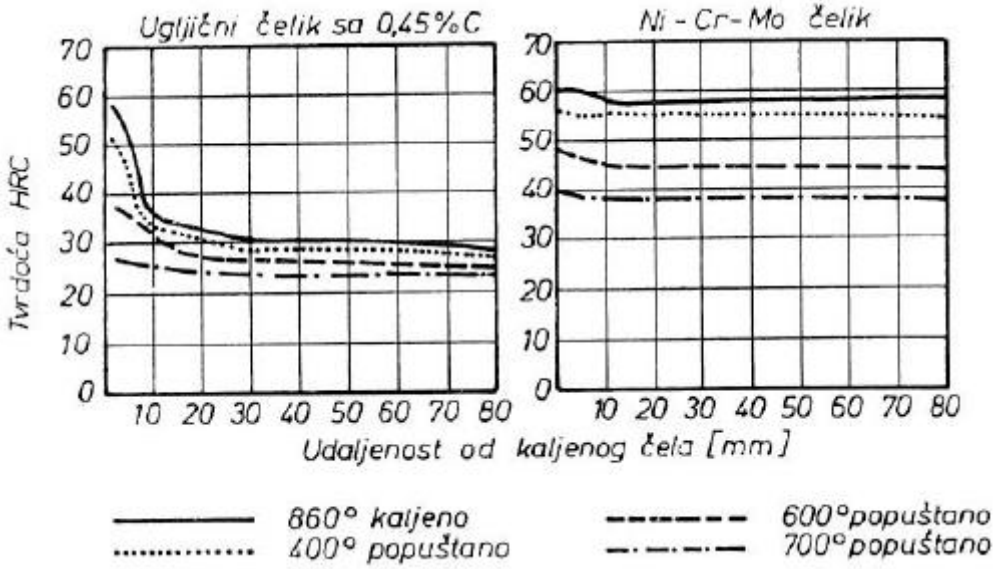
## 2.2. Prokaljivost čelika

Da bi se postigle jednake osobine prigodom poboljšanja po čitavom presjeku, važna je prokaljivost čelika. Pri tome treba napomenuti da nije potrebna „potpuna prokaljivost“ čelika da se postigne potpuno poboljšanje po presjeku. Koliko je viša temperatura popuštanja utoliko se postigne veće izjednačenje čvrstoće u vanjskom sloju i jezgri. Slika 9 pokazuje da se u plitko kaljivom čeliku, velike tvrdoće na površini A, postiže približno izjednačenje čvrstoće po presjeku tek popuštanjem na višu temperaturu, dok će se pri dobro prokaljivom čeliku B čvrstoća izjednačiti po presjeku već po niskim temperaturama popuštanja.



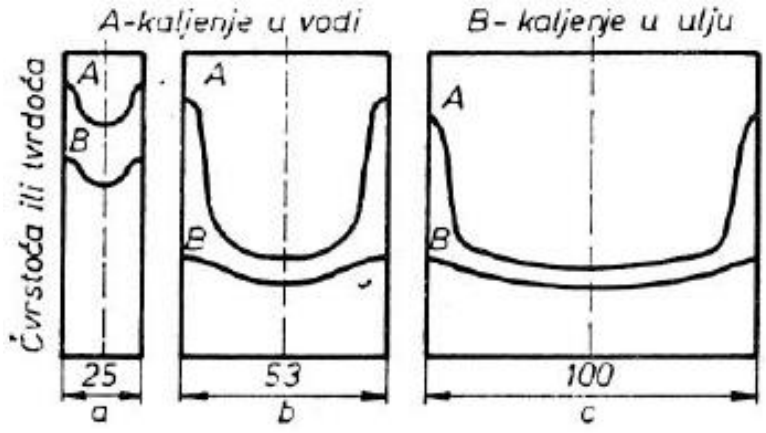

Slika 9: Krivulja tvrdoće plitko kaljivog čelika i čelika koji prokaljuje [2]

Slične odnose prikazuju i Jominiyjeve krivulje u popuštenom stanju (slika 10). Dok se može zapaziti da Jominiyjeva krivulja nelegiranog čelika pri popuštanju na različite temperature uglavnom bitno gubi samo početnu tvrdoću, prokaljivi čelik jednoliko gubi tvrdoću po čitavoj dužini Jominiyjeve probe. Ako je postignuto izjednačenje čvrstoće po presjeku, time nije još rečeno da će se pri popuštanju izjednačiti i ostala svojstva u vanjskom sloju i unutrašnjosti.




Slika 10: Jominy krivulje za kaljeno i popušteno stanje za plitko kaljivi i prokaljivi čelik [2]

Najveći promjer koje dopušta jednoliko poboljšanje po presjeku zavisi i o sredstvima za kaljenje i o visini temperature popuštanja. Sredstvo za kaljenje treba izabrati s obzirom na presjek komada. Slika 11 prikazuje uporabu različitih sredstava za kaljenje kod različitih presjeka istog čelika. Plitko kaljivi čelik pri većem presjeku u jezgri ne pokazuje bitne razlike tvrdoće između kaljenja u ulju i vodi. Zbog toga bilo bi nepravilno ovakav strojni dio kaliti u vodi i time prouzročiti unutrašnje naprezanje. Manje dimenzije pokazuju kod kaljenja u vodi veću tvrdoću jezgre, pa će se u tom slučaju isplatiti kaljenje u vodi.[2]



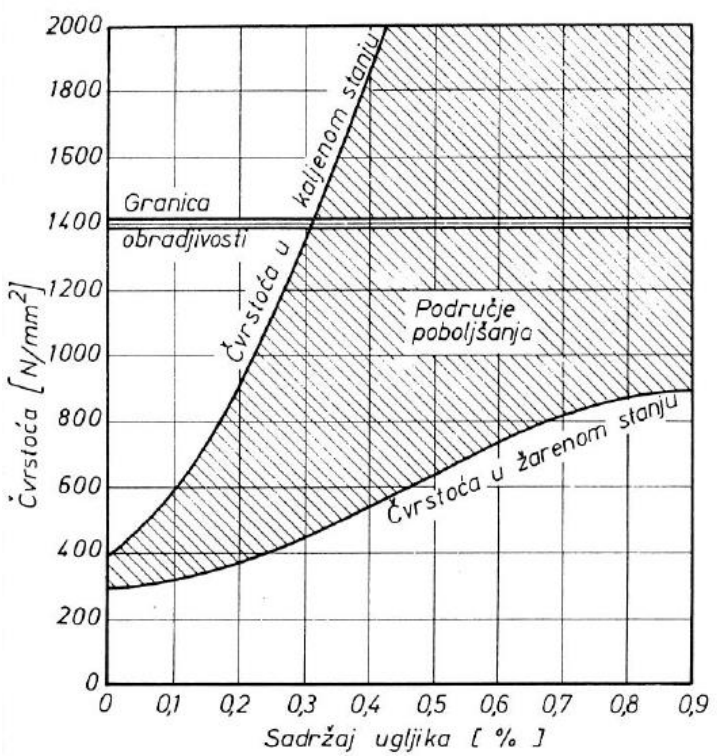

Slika 11: Različita sredstva za kaljenje za različite presjeke plitko kaljivog čelika [2]

## 2.3. Mehanička svojstva poboljšanog čelika

Utjecaj poboljšanja na mehanička svojstva čelika ocjenjuje se na osnovu mehaničkih ispitivanja (određivanje čvrstoće i granice razvlačenja, izduženja i kontrakcije, žilavosti, određivanje mehaničkih svojstava na povišenim visokim temperaturama, određivanje trajne čvrstoće, određivanje mehaničkih svojstava kod dinamičkih opterećenja itd.) poboljšanjem se mogu mijenjati mehanička svojstva čelika u vrlo širokim granicama.

Za konstruktore vrlo je važna granica razvlačenja. Odnos granice razvlačenja i čvrstoće čelika razlikuje se za pojedine vrste čelika i pojedine šarže. Istovremeno ovaj odnos zavisi od dimenzije i poboljšanja po presjeku.

Slika 12 prikazuje čvrstoću nelegiranog ugljičnog čelika malih dimenzija u žarenom i u kaljenom stanju u zavisnosti od sadržaja ugljika u čeliku. Između ova dva ograničenja rasprostire se čitavo područje u kojem se mogu postići čvrstoće čelika pri poboljšanju kod različitih kombinacija kaljenja i popuštanja pri raznim sadržajima ugljika u čeliku.[2]




Slika 12: Mehaničke osobine nelegiranih čelika u funkciji postotka ugljika [2]

# 3. ČELICI ZA POBOLJŠANJE

Čelici za poboljšanje upotrebljavaju se za izradu konstrukcijskih dijelova, koji su za vrijeme rada izloženi velikim i složenim naprezanjima.

Naročito je važno i karakteristično što poboljšani čelici imaju visoku granicu razvlačenja i dobru čvrstoću i žilavost. To povoljno utječe na granicu zamaranja, takvi čelici se ne zamaraju brzo, a osim toga veoma su otporni protiv dinamičkih naprezanja, osobito naizmjeničnih naprezanja i udara.[5]

## 3.1. Vrste čelika

Čelici za poboljšanje izrađuju se kao nelegirani (ugljični) i legirani čelici. Nelegirani čelici mogu biti kvalitetni i plemeniti, koji se od navedenih kvalitetnih čelika razlikuju po većoj jednolikosti, čistoći te višoj kontrakciji (suženju) koja je također pokazatelj žilavosti.

Legirani čelici su svi plemeniti čelici. Kao glavni sastojci za legiranje dolaze u obzir mangan, silicij, krom, molibden, vanadij i nikal. Legirane čelike treba upotrebljavati samo u poboljšanom stanju, inače njihova upotreba u žarenom stanju nije svrsishodna.

Čelici za poboljšanje podijeljeni su u dvije grupe:

- čelici kod kojih je ograničena samo gornja granica sadržaja sumpora(slika kemijski sastav)
- čelici kod kojih je u cilju bolje obradivosti skidanjem strugotine ograničena gornja i donja granica sadržaja sumpora [5]

## 3.2. Karakteristike čelika za poboljšanje

### Nelegirani čelici

Kod ugljičnih čelika ove vrste povećava se čvrstoća sa sadržajem ugljika i mangana. Ovi čelici zbog male prokaljivosti upotrebljavaju se za strojne dijelove

presjeka do 100 mm. Kod većih presjeka nisu osigurana mehanička svojstva jer nije moguće prokaliti jezgru.

Opće karakteristike nelegiranih (ugljičnih) čelika za poboljšanje su:

- mala sklonost prema stvaranju pukotina pri zagrijavanju i hlađenju, čak i neovisno o načinu hlađenja
- slaba obradivost skidanjem strugotine u meko žarenom stanju, poboljšanje obradivosti postiže se normalizacijom
- nemaju sklonost prema krhkosti kod popuštanja
- otpornost prema habanju raste sa sadržajem ugljika, a posebno se povisuje površinskim kaljenjem
- osjetljivost na zarez raste sa sadržajem ugljika (kritično kod čelika Č.1730,Č.1731)
- neotporni su prema koroziji, ta neotpornost raste također s porastom sadržaja ugljika

**Legirani čelici za poboljšanje**

Primjer manganskih čelika su Č.3130 i Č3135. Kod manganskih čelika sadržaj mangana povisuje čvrstoću i to kako u meko žarenom tako i u normaliziranom i poboljšanom stanju. Mangan povoljno utječe na jednolikost poboljšanja po presjeku u slučaju malih dimenzija. Kod mehaničkih svojstava mangan djeluje tek toliko što povisuje čvrstoću kod sobne temperature. Njegovo djelovanje na otpornost martenzita prema poboljšanju jedva se i primjećuje.

Dvije posebno loše strane ovih čelika su:

- naginju prema pogrubljenju zrna na temperaturi austenitizacije što općenito snizuje žilavost kako normaliziranog tako i poboljšanog strojnog dijela
- naginju pojavi krtosti popuštanja

Primjeri krom čelika su: Č.4130, Č.4131, Č.4132; Č.4180, Č.4181, Č.4184. Žilavost kod krom čelika raste dodatkom kroma, a i prelazne temperature pada žilavosti potiskuju se u niža temperaturna područja. Kod čelika za poboljšanje krom umjereno povisuje prokaljivost. Sadržaj kroma djeluje u smislu usitnjenja zrna pa se može očekivati relativno dobra žilavost.

Krom- mangan – vanadij čelik, primjer Č.4830. Nedostatci jednostruko legiranog krom čelika djelomično se otklanjaju nešto povišenim dodatkom mangana. No kako bi dodatak samo mangana izazvao jak efekt porasta zrna dodaje se još nešto vanadija da se taj porast spriječi. Glavni je zadatak mangana da poveća prokaljivost i omogući uporabu većih dimenzija nego kod manganskih čelika, dok vanadij sprječava porast zrna i tako indirektno djeluje na žilavost.

Primjeri krom – molibdenskih čelika su: Č.4730, Č.4731, Č.4732, Č.4733. Molibden povisuje čvrstoću ferita, pojačava jednolikost poboljšanja po presjeku, snizuje puzanje na povišenim temperaturama i povisuje otpornost prema popuštanju. Utjecaj molibdena na svojstva poboljšanih dijelova na sniženim temperaturama je vrlo povoljan, ali treba primijetiti da na to ponašanje utječe način kaljenja (ulje, voda) tako i čvrstoća poboljšanja. Prijelazna temperatura je pomaknuta u područje nižih temperatura pa se čelik sa sigurnošću može upotrijebiti barem na temperaturi na -50°C.

Primjer krom – molibden – vanadij čelika je čelik Č.4734. Djelovanje vanadija u principu svodi se na povišenje čvrstoće feritnog mješanca. Važnije je međutim djelovanje vanadija na usitnjenje zrna uslijed vrlo fine disperzije vrlo finih karbidnih čestica. Vanadij povisuje otpornost prema popuštanju ako su temperature kaljenja bile visoke pa je veći dio vanadija ili sam vanadij prešao u otopinu. Istodobno pada žilavost, djelomično zbog pogrubljenog zrna, a djelomično zbog izlučivanja posebnih vanadij karbida. Zbog visokog afiniteta vanadija prema dušiku ovaj je čelik sposoban za nitriranje koje osobito povisuje otpornost prema trošenju. U pogledu ponašanja na niskim temperaturama vanadij djeluje tek toliko što usitnjuje zrno pa tako indirektno povisuje žilavost. Zbog relativno slabog djelovanja vanadija na prokaljivanje treba kod dijelova većih dimenzija očekivati nejednakost svojstava po presjeku pri poboljšanju.

Primjer nikal – krom – molibden čelika su: Č.5430, Č.5431, Č.5432. Dodatak nikla snizuje kritičnu brzinu hlađenja pa se povećanim dodatkom nikla može povisiti jednolikost poboljšanja presjeka sve do najvećih dimenzija. Nikal ne uzrokuje pad žilavosti u poprečnom smjeru. Nikal i krom zajedno stabiliziraju austenit pa je vjerojatno da će nakon kaljenja ovih čelika redovito zaostati nešto austenita.

Mnogobrojnost raznih zahtjeva koji se mogu postaviti pred čelike za poboljšanje je ujedno i glavni razlog što se razvio velik broj ovih čelika. Potpuno prokaljeno stanje čelika nužan je uvjet za postizanje neke zadovoljavajuće žilavosti pa će se na primjer nelegirani čelici moći upotrijebiti samo za strojne dijelove malih dimenzija. Zahtjevi za najboljom žilavošću strojnih dijelova većih presjeka moći će se ispuniti samo biranjem legirnih čelika i to tim jače legiranih, što su dimenzije veće i osnovni zahtjevi oštriji.[5]

# 4. TOPLINSKO KEMIJSKI POSTUPCI

Postupcima toplinskih obrada koje se provode u odgovarajućim aktivnim medijima (krutom, tekućem ili plinovitom) u površinske slojeve čeličnih dijelova dodaju se neki kemijski elementi u svrhu promjene kemijskog sastava pa time dolazi i do promjene svojstava, najčešće otpornosti prema trošenju.

**Pougljičenje** je najčešće korišteni postupak kemijsko – toplinske obrade, a temelji se na obogaćivanju obrađivane površine ugljikom. Na taj način površinski sloj postiže uvjete zakaljivosti. Osnovni cilj postupka cementacije je dobivanje što veće tvrdoće (do 800HV) i otpornosti na trošenje te otpornosti na umor površine, ali uz zadržavanje žilave jezgre. U širem smislu cementiranje se sastoji od obogaćivanja ugljikom rubnih slojeva (pougljičenja), kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja željeznih materijala.

**Nitriranje** je jedan od najvažnijih postupaka površinske toplinsko – kemijske obrade koji je u komercijalnoj primjeni od kraja dvadesetih godina. Postupak nitriranja se temelji na difuziji dušika (intersticijsko otapanje u željezu) u površinski sloj obrađivanog predmeta. Osnovni ciljevi nitriranja su postizanje visoke površinske tvrdoće, poboljšanje otpornosti na trošenje i zamor, bolja korozijska otpornost s neznatnim promjenama u dimenzijama i svojstvima obrađivanih predmeta. Dobivena tvrdoća se temelji na promjeni kemijskog sastava površinskog sloja i na prisutnosti stvorenih nitrida , a ne na promjeni mikrostrukture naglim hlađenjem.

**Karbonitriranje** je postupak toplinsko – kemijske obrade kod kojeg se površina obrađivanog predmeta istodobno obogaćuje ugljikom i dušikom. Postupak se provodi u temperaturnom području od 700 do 900°C, a nakon obrade predmeti se kale u ulju ii vodi te se naknadno popuštaju na nižim temperaturama. Prisutnost dušika uz ugljik u površinskom sloju povećava otpornost na trošenje i koroziju te povećava dinamičku čvrstoću obrađivanih predmeta. Postupak karbonitriranja ima veliku primjenu, posebice u području fine mehanike, tj. za obradu strojnih dijelova malih i srednjih dimenzija koje su izrazito izloženi tlačnim i dinamičkim opterećenjima.

**Nitrokarboriranje** je toplinsko - kemijski postupak obrade kojim se postiže obogaćivanje površinskih slojeva strojnih dijelova dušikom i ugljikom. Pri tome se stvara zona spojeva ispod koje je difuzijska zona obogaćena dušikom.

Nitrokarborirani sloj ima manju sklonost prema tzv. zaribavanju, veću dinamičku izdržljivost, povećanu otpornost na koroziju, veću otpornost prema gubitku tvrdoće na višim temperaturama.

**Boriranje** je toplinsko – kemijski i difuzijski kontrolirani postupak obrade koji se temelji na difuziji bora u površinu strojnog dijela i stvaranju borida. Tijekom boriranja atomi bora difundiraju u rešetku strojnog dijela i kemijski reagiraju s atomima metala strojnog dijela. Boridi imaju vrlo visoku tvrdoću koja bitno ovisi o sastavu i strukturi boridnog sloja i o sastavu strojnog dijela. Boriranje se koristi za smanjenje abrazijskog i adhezijskog trošenja.[6]

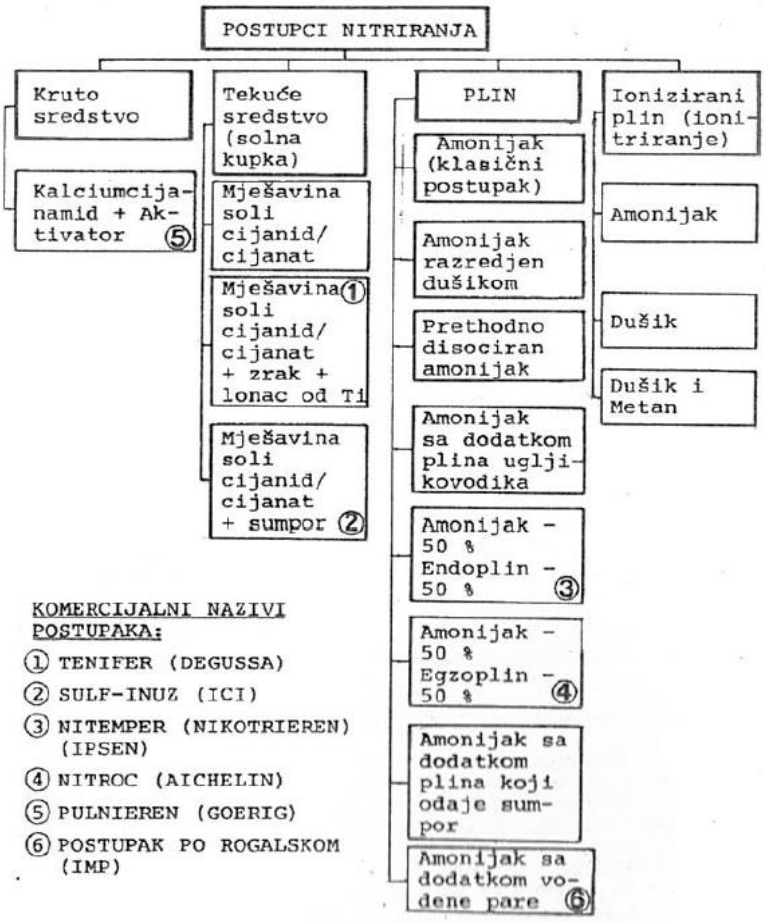
### 4.1. Nitriranje

Nitriranje je termo kemijski postupak koji se sastoji od zagrijavanja željeznih metala na temperature između 500 i 580°C (iznimno i na niže temperature) pri kojoj je površina metala izložena djelovanju medija koji odaje dušik. Ohlađivanje sa temperature nitriranja može biti sporo jer se postignuta tvrdoća zasniva na prisutnosti stvorenih nitrida, a ne na promjeni strukture pri naglom ohlađivanju.

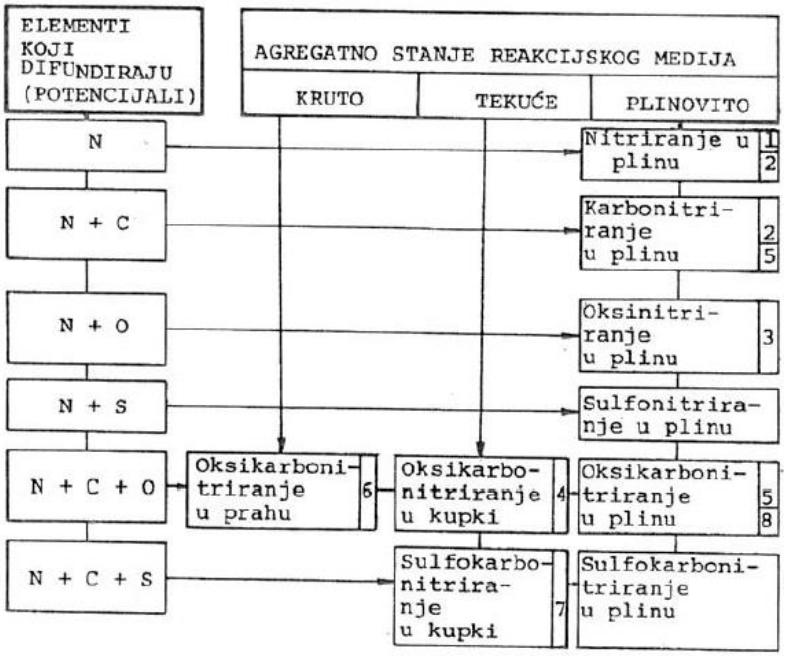
Medij, odnosno sredstvo za nitriranje može biti: kruto (prah), tekuće (solna kupka), plinovito (razni plinovi ili mješavine plinova) ili ionizirani plin (ionitriranje), prikaz na slici 13.

Svim postupcima nitriranja je zajedničko da se odvijaju ispod 600°C, tj. ispod temperature granice pretvorbe A1, tako da struktura u jezgri tretiranog predmeta ne doživljava nikakvu promjenu. U jezgri ne dolazi do pretvorbe feritne strukture, koja zadržava svoju prostorno centriranu kubnu rešetku.

Kod većine postupaka nitriranja u površinu metala osim dušika istovremeno difundira još barem jedan ili više drugih elemenata (ugljik, kisik, kod nekih postupaka i sumpor). Radi se o postupcima sa istovremenom difuzijom više elemenata.




Slika 13: Postupci nitriranja [7]




Slika 14: Sistematizacija postupaka nitriranja [7]

## 4.2. Svrha i područje primjene nitriranja

Vrlo je velik broj mogućih primjena nitriranja. Nitriranje se upotrebljava kad je dijelovima iz željeznih metala potrebno postići barem jedno od sljedećih svojstava:

- veliku otpornost na trošenje (prvenstveno adhezijsko)
- povećanu dinamičku izdržljivost kod promjenjivog dinamičkog opterećenja (savijanje i torzija)
- visoku površinsku tvrdoću i određenu dubinu sloja radi otpornosti na visoki lokalni pritisak i udarce
- antikorozivnost (najviše kod nelegiranih čelika)
- tvrdoću na površini i otpornost na trošenje pri povišenim temperaturama

Nitrirani sloj općenito se sastoji iz takozvane zone spojeva na samoj površini i difuzione zone koja se nalazi ispod nje. Zona spojeva (znatno je manje debljine od difuzione zone) je nosilac otpornosti na trošenje, a difuziona zona ima presudnu ulogu, kad se radi o dinamičkoj izdržljivosti i o otpornosti na pritisak.[7]

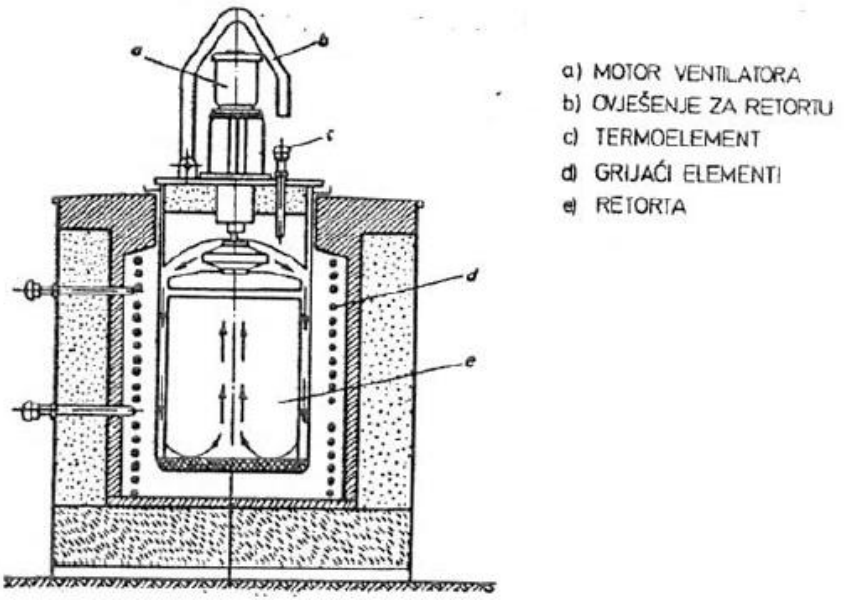
## 4.3. Klasični postupak nitriranja u plinu

Najstariju klasični postupak nitriranja u plinu izvodi se u čistom amonijaku $NH_3$, amonijaku razrijeđenom sa dušikom ili prethodno disociranom amonijaku. Pri temperaturi nitriranja razlaže se amonijak na dušik i vodik. Taj proces disocijacije ubrzava katalitičko djelovanje površine željeznih dijelova i retorte.

Dušik i vodik imaju kod te disocijacije u stanju nastajanja jaku tendenciju da se vrlo brzo spoje u molekule $N_2$ i $H_2$, a kao takve nisu od koristi za nitriranje. Proces disocijacije amonijaka teče dakle ovako:

$$2NH_3 \rightarrow 2N + 6H \rightarrow N_2 + 3H_2$$

Dušik može difundirati u površinu metala samo u atomarnom stanju. Prema tome za nitriranje je djelotvoran onaj amonijak koji disocira direktno na površini nitriranog predmeta. Za efikasnost nitriranja mjerodavna je koncentracija $NH_3$ u plinu, a potrebno je i dobro miješanje atmosfere u prostoru za nitriranje.




Slika 15: Presjek retortne peći za plinsko nitriranje [7]

Slika 15 prikazuje shematski prikaz presjeka retortne peći koja se upotrebljava za plinsko nitriranje. Retorta u kojoj se vrši nitriranje mora biti dobro zabrtvljena. Budući da se pri ovom postupku nitriranja razvija i vodik (koji je eksplozivan i zapaljiv), iz razloga sigurnosti takav uređaj mora biti stalno pod nadzorom i u slučaju dovoda amonijaka potrebo je vršiti ispiranje retorte dušikom.

Tehnološki parametri za ovaj proces nitriranja su sljedeći:

- temperatura nitriranja (510 do 550°C)
- vrijeme nitriranja (30 do 100 sati; ovisno o dubini nitriranog sloja gornja granica daje dubinu sloja od 0,7 do 0,8 mm kod legiranih čelika)
- pritisak u retorti (minimum 2,5 mbar)
- dovedena količina amonijaka (50 do 80 l/h,$m^2$ površine dijelova za nitriranje što daje sadržaj amonijaka od 70%, odnosno stupanj disocijacije 30%)

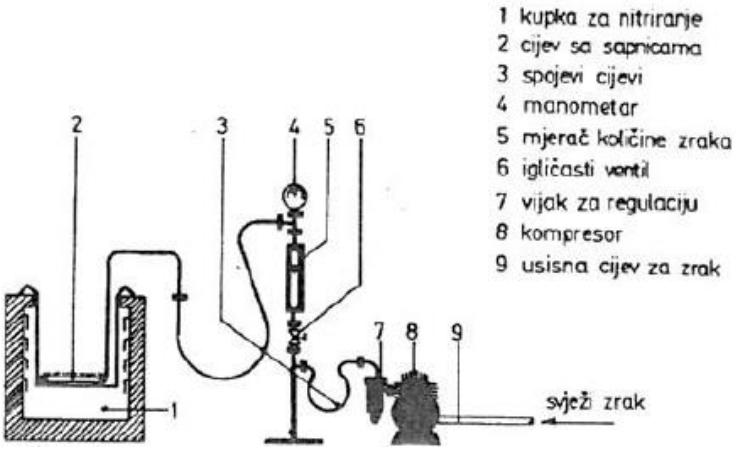
Pored vrlo dugih vremena nitriranja, činjenica da ovaj klasični postupak nitriranja daje krhke „bijele slojeve“ na površini, svela je danas uporabu ovog postupka samo na iznimne slučajeve kad se kod legiranog čelika traže velike dubine nitriranog sloja. Ukoliko se prethodno ne odstrane „bijeli slojevi“, tokom uporabe pucaju i dovode do otkrhnuća.[7]

### 4.4. Nitriranje u solnoj kupki

Nitriranje u solnoj kupki vrši se u rastopljenim solima, koje sadrže cijanide i cijanate. Najstariji oblik tog procesa bilo je „meko nitriranje“. Taj je proces dugotrajnim istraživačkim radom usavršen, te se iz njega razvio postupak pod imenom tenifer.

Poboljšanja, koja su dovela do postupka tenifer sastojala su se u sljedećem:

- uvođenje zraka u kupku za vrijeme procesa u cilju potpomaganja reakcije cijanid-cijanat i održavanja dovoljno visokog postotka cijanata u kupki
- zamjena željeznog lonca loncem koji je izrađen od titana ili ima unutarnju oblogu od titana, u cilju smanjenja otapanja željeza u kupki i smanjenja količine natriumferocijanida $Na_4[Fe(CN)_6]$
- prelazak sa jedno komponentne soli na dvije vrste soli za sastavljanje i eksploataciju kupke čime je omogućeno reguliranje sadržaja cijanida i cijanata




Slika 16: Prikaz uređaja za dodavanje zraka u solnu kupku [7]

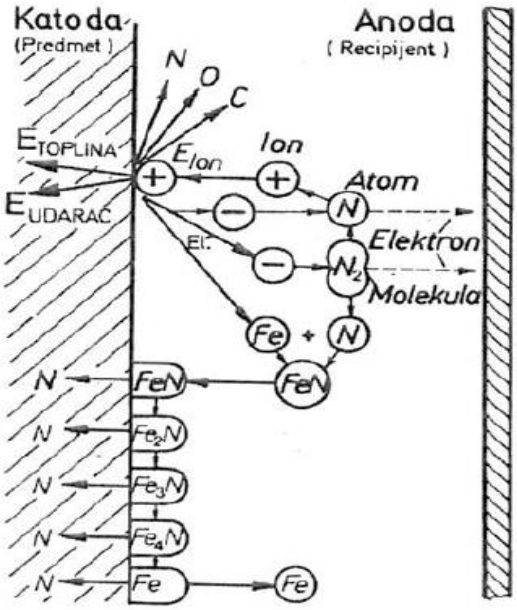
Ova tehnološka poboljšanja imala su za posljedicu poboljšanje kvalitete nitriranih dijelova prema kvaliteti dobivenoj „mekim nitriranjem“ koje se očitovalo prvenstveno u sljedećem:

- povećana je dubina zone spojeva za isto vrijeme nitriranja
- smanjena je poroznost zone spojeva
- povećana je jednolikost dobavnih rezultata na raznim mjestima unutar kupke[7]

## 4.5. Ionitriranje

Osnovu ionitriranja čini jako strujno tinjajuće ispražnjavanje koje nastaje kod podpritiska u evakuiranoj posudi između katode i anode. Kad se između njih uspostavi električni napon od nekoliko stotina volta.

Ako se uređaj za nitriranje , sam spremnik koji se priključi kao anoda, a metalni dijelovi u recipijentu kao katoda i dovede u taj recipijent plin koji sadrži dušik tada taj plin postaje ioniziran zbog čega elektroni bivaju ubrzani u smjeru anode tj. stjenke recipijenta, a pozitivni ioni dušika u smjeru katode tj. metalnih dijelova, prikazano na slici 17.

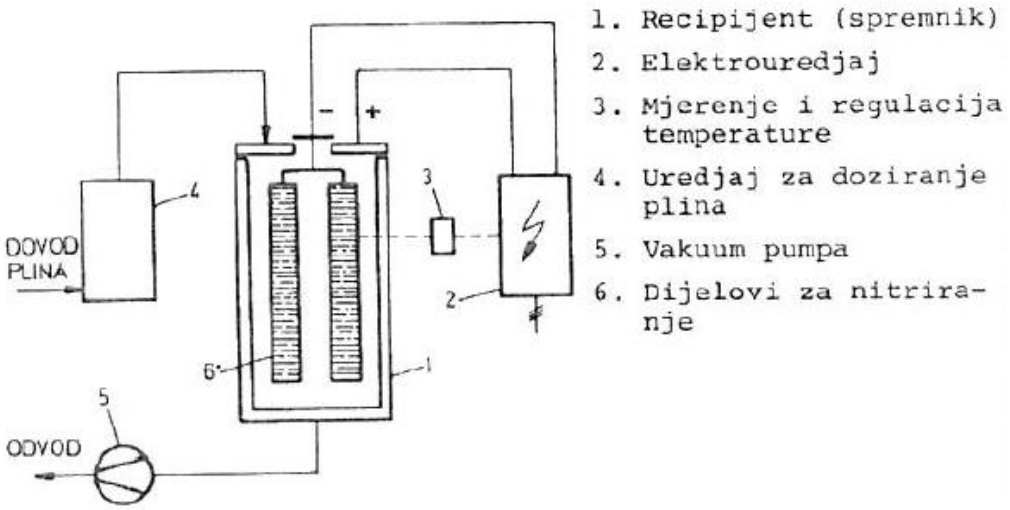



Slika 17: Shematski prikaz procesa ionitriranja [7]

Udarajući velikom energijom u površinu metalnih dijelova u recipijentu ioni „otprašuju“ atome željeza sa površine tih dijelova.

Ti otpušteni atomi željeza vežu se u plazmi tinjajućeg ispražnjavanja s visoko reaktivnim atomima dušika u dušikom bogati željezni nitrid FeN, kako je vidljivo na slici 17. FeN-nitridi kao neutralne čestice se kondenziraju na površini metalnih dijelova i tamo se dalje razlažu na druge tipove željeznih nitrida, koji su sve siromašniji dušikom. Pri tom razlaganju ostaje jedan dio dušika u atomarnom stanju slobodan i difundira u površinski sloj predmeta te vrši nitriranje.

Točnom kontrolom parametara moguće je dobiti različite strukturne faze u zoni spojeva, kako to proizlazi iz sheme (slika 17). Ovo je jedini postupak nitriranja pri kojem je moguće dobiti monofaznu γ´ zonu spojeva do debljine od oko 8μm. Isto tako moguće je dobiti monofaznu ε zonu spojeva sve do 30μm debljine. Zona spojeva nakon ionitriranja je uvijek bez poroznosti. Temperature kod ionitriranja se mogu odabrati u znatno širem području nego kod ostalih postupaka. Vrijeme nitriranja se ovisno o željenoj dubini sloja, uzima u širokim granicama i može iznositi između 10 minuta i 40 sati. Najsporije je ohlađivanje dijelova u recipijentu u vakuumu. Brže je ohlađivanje u struji plina u recipijentu, a još brže pomoću nekog tekućeg sredstva za ohlađivanje.[7]




Slika 18: Shematski prikaz postrojenja za ionitriranje [7]

# 5. EKPERIMENTALNI DIO ZAVRŠNOG RADA

Eksperimentalni dio rada temelji se na ispitivanju testnih epruveta. Samo ispitivanje se odvijalo na Veleučilišta u Karlovcu, u laboratoriju za ispitivanje materijala. Testne epruvete dobivene su tehnološkim postupcima odrezivanja sirovaca, toplinskom obradom poboljšanja sirovaca, CNC tokarenjem sirovaca u testne epruvete i nitriranje testnih epruveta.

Cilj eksperimentalnog rada nam je utvrditi da li različite čvrstoće nakon procesa poboljšanja utječu na efektivnu dubinu nitriranja naših testnih epruveta.

## 5.1. Plan pokusa

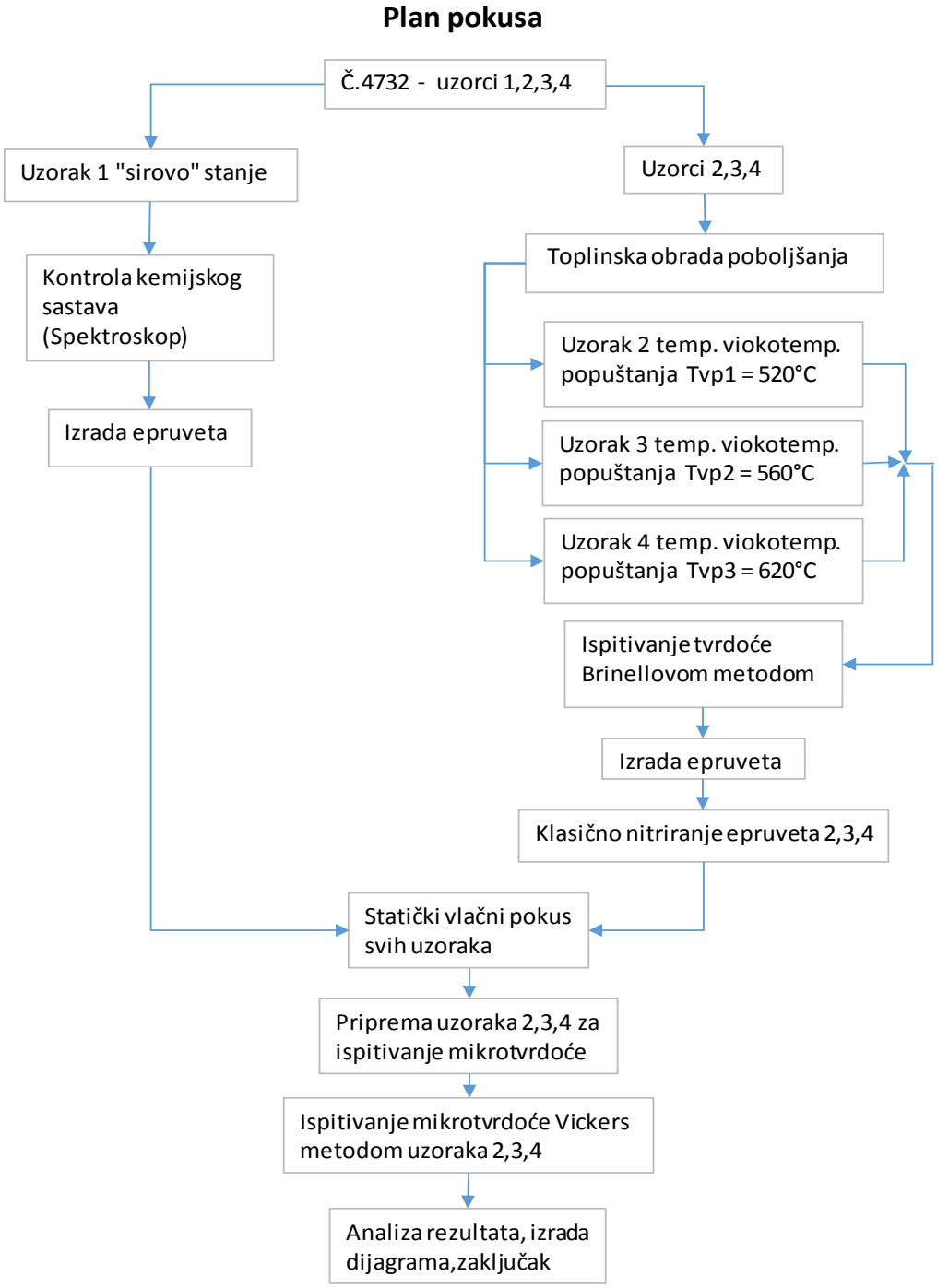
Eksperimentalni dio rada mora imati neki redoslijed i slijed kojim će se odvijati. Za početak potrebno je imati odgovarajući čelik u sirovom stanju, odrezat će se pet sirovih cilindričnih štapova dimenzija Ø27x110 mm čelika Č.4732. Probni štapovi će se označiti oznakama, dva probna štapa iste oznake neće se toplinski obrađivati i izraditi će se testne epruvete koje će imati početno „sirovo“ stanje. Ostala tri probna štapa biti će obrađeni toplinskom obradom poboljšanja, ali će im se razlikovati temperatura popuštanja jer nam je cilj dobiti različite čvrstoće. Nakon toplinske obrade uslijedit će izrada testnih epruveta.

Napravit ćemo analizu kemijskog sastava materijala sirovih probnih štapova da budemo sigurni da radimo s željnim materijalom.

Probne štapove nakon toplinske obrade ispitat ćemo Brinellovom metodom da vidimo koje smo vrijednosti tvrdoće dobili i na taj način znali otprilike koje smo čvrstoće postigli.

Sljedeći korak nam je izrada testnih epruveta CNC tokarilicom po zadanom standardu tj. nacrtu, nakon toga slijedi priprema epruveta za postupak klasičnog nitriranja. Također, izradit ćemo dvije epruvete koje neće biti toplinski obrađene. Poslije nitriranja sve epruvete testiramo na statički vlačni pokus i tada ćemo imati rezultate čvrstoća nakon nitriranja i čvrstoće sirovog materijala. Testirane epruvete, koje su prošle cijeli proces, pripremamo za ispitivanje mikrotvrdoće koja će nam pokazati koliko nam iznosi efektivna dubina nitriranja svake pojedine epruvete.

Uslijedit će analiza rezultata te zaključak gdje ćemo reći da li dobiveni rezultati ukazuju na to da čvrstoćom možemo utjecati na efektivnu dubinu nitriranja i na trajanje samog procesa nitriranja.




Slika 19: Plan pokusa

## 5.2. Čelik Č.4732

To je krom molibdenski čelik za poboljšanje, kemijskog sastava:

| Kemijski sastav u %: (JUS C.B9.021/74) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo |
| 0,38-0,45 | 0,15-0,4 | 0,5-0,8 | max. 0,035 | max. 0,035 | 0,9-1,2 | 0,15-0,3 |

Tablica 1: Kemijski sastav čelika Č.4732 [5]

### Prokaljivost

Pri Jominy-evom pokusu s čeono kaljenom probom postiže se kod ovog čelika u prosjeku tvrdoća od 57 HRC. Na osnovi višeg sadržaja ugljika, kod inače jednakih sadržaja kroma i molibdena, prokaljivost ovog čelika je veća nego kod čelika Č.4731.

### Sklonost prema pukotinama pri kaljenju

Ovaj čelik je osjetljiv kod kaljenja u vodi. Zbog toga treba primjenjivati, kod kompliciranijih oblika, kaljenje u ulju.

### Obradivost skidanjem strugotine

Vrijeme trajanja alata kod grube obrade je najveće kad je čelik u meko žarenom stanju (feritna osnovna masa s uležištenim zrnatim cementitom). Za postizanje dobre kvalitete površine kod fine obrade, većinom je korisna veća čvrstoća čelika i viša brzina rezanja.

### Zavarljivost

Prikladan je, uzevši u obzir oprezno predgrijavanje i ohlađivanje, samo za tupo zavarivanje. Po mogućnosti ne treba ovaj čelik upotrebljavati za svrhe varenja.

### Krhkoća nakon popuštanja

Ne naginje krhkoći poslije popuštanja pri uobičajenim temperaturama i trajanju popuštanja. U tom smislu nije potrebno poštivati bilo kakve posebne mjere pri određivanju načina ohlađivanja, odnosno sredstava za ohlađivanje poslije popuštanja.

**Postojanost prema popuštanju**

Utjecaj temperature popuštanja na mehanička svojstva nakon kaljenja vidljiv je iz dijagrama orijentacijskih vrijednosti utjecaja temperatura popuštanja na mehanička svojstva.

**Krhkoća pri niskim temperaturama**

Pokazuje kod sobne temperature izvanredna svojstva žilavosti, koje on zadržava i kod niskih temperatura.

**Otpornost prema trošenju**

Otpornost prema trošenju je osobito povoljan u kaljenom odnosno površinski kaljenom stanju (plameno kaljenje, indukcijsko kaljenje). Ona može također biti povećana nitriranjem u solnoj kupki.

**Osjetljivost prema zareznom djelovanju**

Osjetljivost prema zareznom djelovanju kod dinamičkog naprezanja raste s rastućom vlačnom čvrstoćom. Kod visokih vlačnih čvrstoća treba osjetljivost na zarezno djelovanje svakako uzeti u obzir kod konstrukcije i kod prerade (veliki prijelazni radijusi, izbjegavanje mjesta velike promjene smjera sile itd.). Pjeskarenjem ili obradom pomoću čelične sačme, hladnim valjanjem i sl. smanjuje se osjetljivost na zarezno djelovanje.

**Upotreba**

Za statički i dinamički opterećene dijelove vozila, motora i strojeva, naročito za veće presjeke s visokom čvrstoćom za:

- zupčanike
- poluosovine automobila
- cilindre motora
- kardanske osovine i druge

## Mehanička svojstva u poboljšanom stanju

| Mehanička svojstva u poboljšanom stanju: (JUS C.B9.021/74) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Promjer [mm] | Granica razvlačenja Re [N/mm$^2$] min. | Vlačna čvrstoća Rm [N/mm$^2$] | Izduženje A [%] min. | Kontrakcija Z [%] min. | Žilavost [J] min. |
| do 16 | 885 | 1080 ÷ 1280 | 10 | 40 | 34 |
| od 16 do 40 | 765 | 980 ÷ 1180 | 11 | 45 | 41 |
| od 40 do 100 | 635 | 880 ÷ 1080 | 12 | 50 | 41 |
| od 100 do 160 | 560 | 780 ÷ 930 | 13 | 55 | 41 |
| od 160 do 250 | 510 | 740 ÷ 890 | 14 | 55 | 41 |

Tablica 2: Mehanička svojstva čelika Č.4732 u poboljšanom stanju [5]

## Mehanička svojstva kod trajnih titrajnih naprezanja

| Dinamička izdržljivost (Orijentacijske vrijednosti) | | | |
|---|---|---|---|
| Vlačna čvrstoća [N/mm$^2$] | Dinamička izdržljivost na savijanje [N/mm$^2$] | Dinamička izdržljivost na tlak-vlak [N/mm$^2$] | Dinamička izdržljivost na torziju [N/mm$^2$] |
| 1180 | 530 | 420 | 325 |
| 980 | 470 | 375 | 285 |
| 880 | 430 | 345 | 255 |
| 760 | 380 | 305 | 225 |

Tablica 3: Mehanička svojstva čelika Č.4732 kod trajnih titrajnih naprezanja [5]

Navedene vrijednosti vrijede za termički obrađene, poboljšane, glatke, polirane štapove promjera 5 do 10mm. Utjecaj dimenzija, svojstva površine i oblika (zarezno djelovanje i forma presjeka) moraju se dodatno obuhvatiti konstrukcijskom proračunu.

## Vrijednosti za tvrdoću s obzirom na stanje toplinske obrade

| Tvrdoća | | |
|---|---|---|
| Meko žareno HB max. | Obrada na određenu vlačnu čvrstoću HB max. | Obrada na najbolju obradivost HB max. |
| 217 | --- | 241 |

Tablica 4: Vrijednosti za tvrdoću s obzirom na stanje toplinske obrade za čelik Č.4732 [5]

## **Fizikalna svojstva** (orijentacijske vrijednosti)

| Svojstva | | kod temperature 0°C | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 | 100 | 200 | 300 |
| Modul elastičnosti | $N/mm^2$ | 210000 | 205000 | 195000 | 185000 |
| Modul smika | $N/mm^2$ | 81000 | 79000 | 75000 | 71000 |
| Gustoća | $kg/dm^3$ | 7,85 | --- | --- | --- |
| Toplinska vodljivost | W/mK | 41,9 | --- | --- | --- |
| Specifična toplina | J/kgK | 460,5 | --- | --- | --- |
| Specifični električni otpor | $\Omega cm10^4$ | 0,19 | --- | --- | --- |

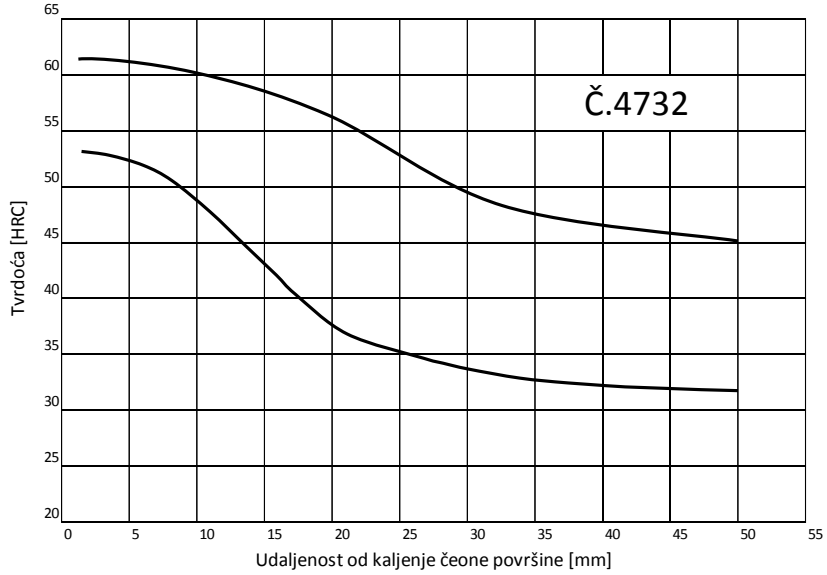
Tablica 5: Fizikalna svojstva čelika Č.4732 [5]

## Prokaljivost

| Orijentacijske vrijednosti; Norma: JUS C.B9.021/74 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Udaljenosti | Tvrdoća u HRC na udaljenosti od kaljene čeone površine (mm) | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1,5 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| max | 61 | 61 | 61 | 60 | 60 | 59 | 59 | 58 | 56 | 53 | 51 | 48 | 47 | 46 | 45 |
| min | 53 | 53 | 52 | 51 | 50 | 48 | 45 | 43 | 38 | 35 | 34 | 33 | 32 | 32 | 32 |

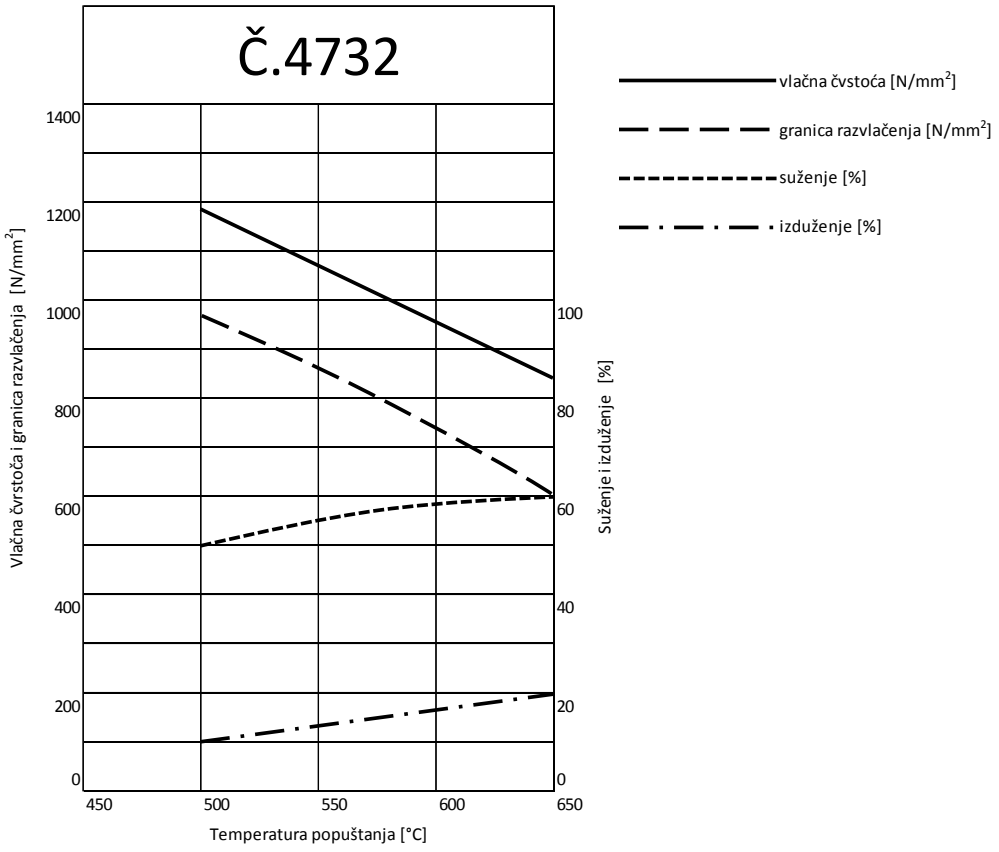
Tablica 6: Prokaljivost čelika Č.4732 [5]

## Pojas garantirane prokaljivosti




Slika 20: Pojas garantirane prokaljivosti čelika Č.4732 [5]

## Vrijednosti utjecaja temperatura popuštanja na mehanička svojstva

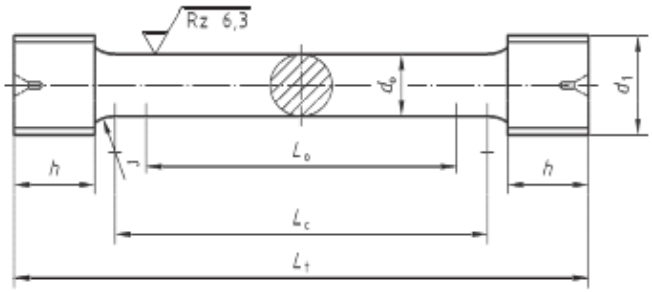



Slika 21: Vrijednosti utjecaja temperatura popuštanja na mehanička svojstva čelika Č.4732 [5]

## 5.3. Testne epruvete

Testne epruvete izrađene su od čelika za poboljšanje oznake Č.4732 (42CrMo4). Izrađene su strojnom obradom na CNC tokarilici, dakle tokarenje navedenog materijala iz cilindričnih dijela dimenzije Ø27x110 mm. Standard po kojem su izrađene epruvete je DIN 50125 (slika 22).

### 4.3 Type B test pieces




**Key**

| | | | |
|---|---|---|---|
| $d_o$ | test piece diameter | $L_o$ | original gauge length ($L_o = 5\ d_o$) |
| $d_1$ | diameter of ISO metric thread | $L_c$ | parallel length ($L_c \geq L_o + d_o$) |
| $h$ | length of gripped ends | $L_t$ | total length of test piece |

**Figure 2 — Type B test piece, of circular cross section, with threaded ends**

Designation of a type B test piece with a diameter $d_o$ = 14 mm and original gauge length $L_o$ = 70 mm:

**Tensile test piece DIN 50125 – B 14 × 70**

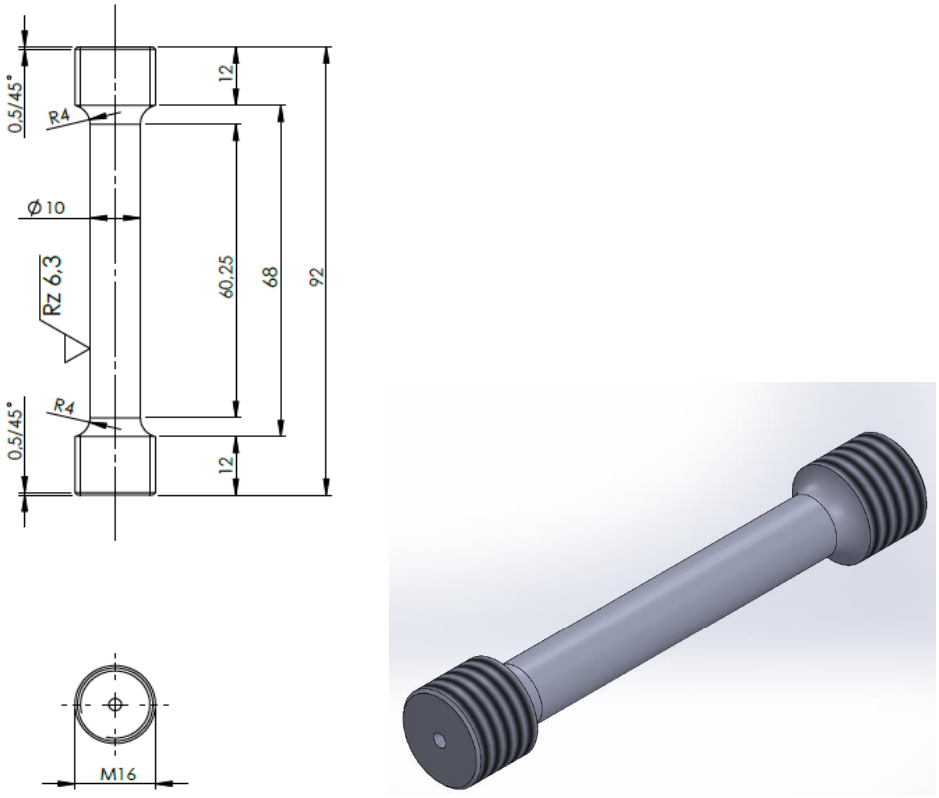
**Table 3 — Examples of dimensions for type B test pieces**

Dimensions in millimetres

| $d_o$ | $L_o$ | $d_1$ | $r$ min. | $h$ min. | $L_c$ min. | $L_t$ min. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 20 | M6 | 3 | 6 | 24 | 41 |
| 5 | 25 | M8 | 4 | 7 | 30 | 51 |
| 6 | 30 | M10 | 5 | 8 | 36 | 60 |
| 8 | 40 | M12 | 6 | 10 | 48 | 77 |
| 10 | 50 | M16 | 8 | 12 | 60 | 97 |
| 12 | 60 | M18 | 9 | 15 | 72 | 116 |
| 14 | 70 | M20 | 11 | 17 | 84 | 134 |
| 16 | 80 | M24 | 12 | 20 | 96 | 154 |
| 18 | 90 | M27 | 14 | 22 | 108 | 173 |
| 20 | 100 | M30 | 15 | 24 | 120 | 191 |
| 25 | 125 | M33 | 20 | 30 | 150 | 234 |

Slika 22: Standard DIN 50125 za izradu epruvete [8]

Prije same izrade epruveta izabrane su njene dimenzije po standardu, epruveta je softverski modelirana i napisan je program izrade za epruvete.




Slika 23: Nacrt i model izrađenih epruveta

Izrađeno je 5 epruveta, dvije epruvete nisu bile toplinski obrađene (ostale su u „sirovom“ stanju) i imale su oznaku broj 1, ostale epruvete su bile toplinski obrađene tj. poboljšane. Razlika u poboljšanim epruvetama je bila u tome što je epruveta s oznakom 2 bila visoko temperaturno popuštena na 520°C, epruveta s oznakom 3 na 560°C i epruveta 4 na 620°C.

| **Testne epruvete** | | |
|---|---|---|
| Utisnute oznake | Količina | Temperatura visoko temperaturnog popuštanja [°C] |
| 1 | 2 | - |
| 2 | 1 | 520 |
| 3 | 1 | 560 |
| 4 | 1 | 620 |

Tablica 7: Oznake, količina epruveta i temperatura visoko temperaturnog popuštanja epruveta

## 5.4. Kemijski sastav materijala testnih epruveta

Kemijski sastav materijala određen je takozvanim spektroskop uređajem. Proizvođač uređaja je ARUN technology, model je Poly Spek (slika 24).




Slika 24: Uređaj za analizu kemijskog sastava materijala

Analizom obrađujemo kemijski sastav tvari odnosno utvrđujemo od kojih je kemijskih elemenata sastavljen materijal, također utvrđujemo koja količina ili međusobni omjer pojedinih sastavnih dijelova tvari imamo u materijalu.

Teorijske vrijednosti kemijskih elemenata, po standardu, za čelik Č.4732 i vrijednosti dobivene analizom nalaze se u tablici 8. Analiza kemijskog sastava provedena je da dokažemo da se radi o navedenom čeliku Č.4732.

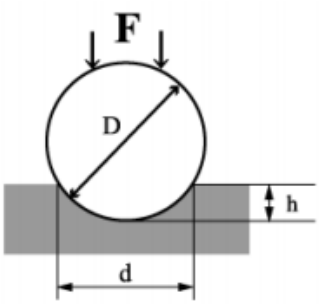
| **Kemijski sastav u %: Dobiveno analizom u laboratoriju** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo |
| Vrijednosti po standardu | 0,38-0,45 | 0,15-0,40 | 0,50-0,80 | max. 0,035 | max. 0,035 | 0,90-1,20 | 0,15-0,30 |
| Vrijednosti analize | 0,388 | 0,223 | 0,795 | < 0,002 | < 0,002 | 1,1 | 0,183 |

Tablica 8: Kemijski sastav čelika Č.4732 dobiven analizom u labaratoriju

## 5.5. Mjerenje tvrdoće Brinellovam metodom

Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju drugog, znatno tvrđeg tijela. Osnovni princip mjerenja kod većine metoda je mjerenje veličine ili dubine otiska što ga penetrator, opterećen nekom silom, načini u ispitivanom materijalu. Te su metode pogodne za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala kod kojih je moguća neka plastična deformacija. Penetratori ili indentori oblika su kuglice, stošca ili piramide, a izrađeni su od tvrdih materijala (kaljeni čelik, tvrdi metal ili dijamant).

Kod Brinellove metode penetrator je kuglica od kaljenog čelika (rjeđe od tvrdog metala), promjera D koja se utiskuje silom F u površinske slojeve materijala




Slika 25: Mjerenje tvrdoće po Brinellu [9]

Na taj način nastaje u ispitivanom materijalu otisak u obliku kugline kalote promjera baze „d“ i dubine „h“. Tvrdoća po Brinellu je, po definiciji, omjer primijenjene sile i površine otiska:

$$HB = \frac{F \cdot 0{,}102}{S}$$

Gdje je F, [N] sila, a S, [mm$^2$] ploština kugline kalote koja se izračunava izrazom:

$$S = \pi \cdot D \cdot h \; [mm^2]$$

D, [mm], je promjer kuglice, a h [mm] dubina prodiranja kuglice nakon rasterećenja. Budući da se ovom metodom ne mjeri dubina prodiranja kuglice h nego promjer otiska d,[mm], dobiva se izraz za tvrdoću po Brinellu:

$$HB = \frac{F \cdot 0{,}204}{\pi \cdot D \left[ D - (D^2 - d^2)^{\frac{1}{2}} \right]}$$

Normirani promjeri kuglice D su 10; 5; 2,5; 2 i 1 mm. Mjerenje je valjano ako promjer osnovice otisnuća d iznosi od 0,25 do 0,5 D pa, u ovisnosti o tvrdoći materijala, treba varirati i silu F. Stoga je uveden i stupanj opterećenja X:

$$X = \frac{F \cdot 0{,}1020}{D^2}$$

Gdje je F, [N], sila, a D, [mm], promjer kuglice. Iznos stupnja opterećenja za pojedine grupe metalnih materijala nalazi se u tablici 9.

| stupanj opterećenja | 30 | 10 | 5 | 2,5 | 1,25 |
|---|---|---|---|---|---|
| materijal | Fe-C-legure<br>Ti-legure<br>Ni-Co-legure | Cu-legure<br>Ni-legure | Al-legure<br>Mg-legure<br>Zn-legure | ležajni materijali | Pb<br>Sn<br>bijela kovina |

Tablica 9: Vrijednost stupnja opterećenja za pojedine grupe metalnih materijala [10]

Iz iznosa stupnja opterećenja za odabrani se promjer kuglice D utvrđuje potrebna sila F. Trajanje utiskivanja kuglice u materijal kreće se od 10 do 15 sekundi za Fe-C legure, a do 180 sekundi za najmekše materijale (npr. bijelu kovinu). Brinellova tvrdoća je bezdimenzionalna veličina, a uz iznos tvrdoće izmjerene ovom metodom navodi se dimenzija kuglice, primijenjena sila, te trajanja utiskivanja;

Npr. 128 HB 5/250/15, pri čemu je:

128 - iznos tvrdoće

5 - promjer kuglice D, [mm]

250 - sila utiskivanja F, [N] pomnožena s 0,102

15 - vrijeme utiskivanja t, [s]

Brinellovom se metodom s kuglicom od kaljenog čelika smiju mjeriti tvrdoće do 450 HB. Kod viših tvrdoća došlo bi do opterećenja kuglice pa je obvezna primjena kuglice od tvrdog metala. Za pravilno mjerenje potrebna je debljina uzorka $S \geq 8 \cdot h$, gdje je h dubina prodiranja kuglice D i iznosi:

$$h = \frac{F \cdot 0{,}102}{\pi \cdot D \cdot HB}\ [mm]$$

Pri čemu je F [N] sila, D [mm] promjer kuglice, a HB približno očekivana tvrdoća.[10]

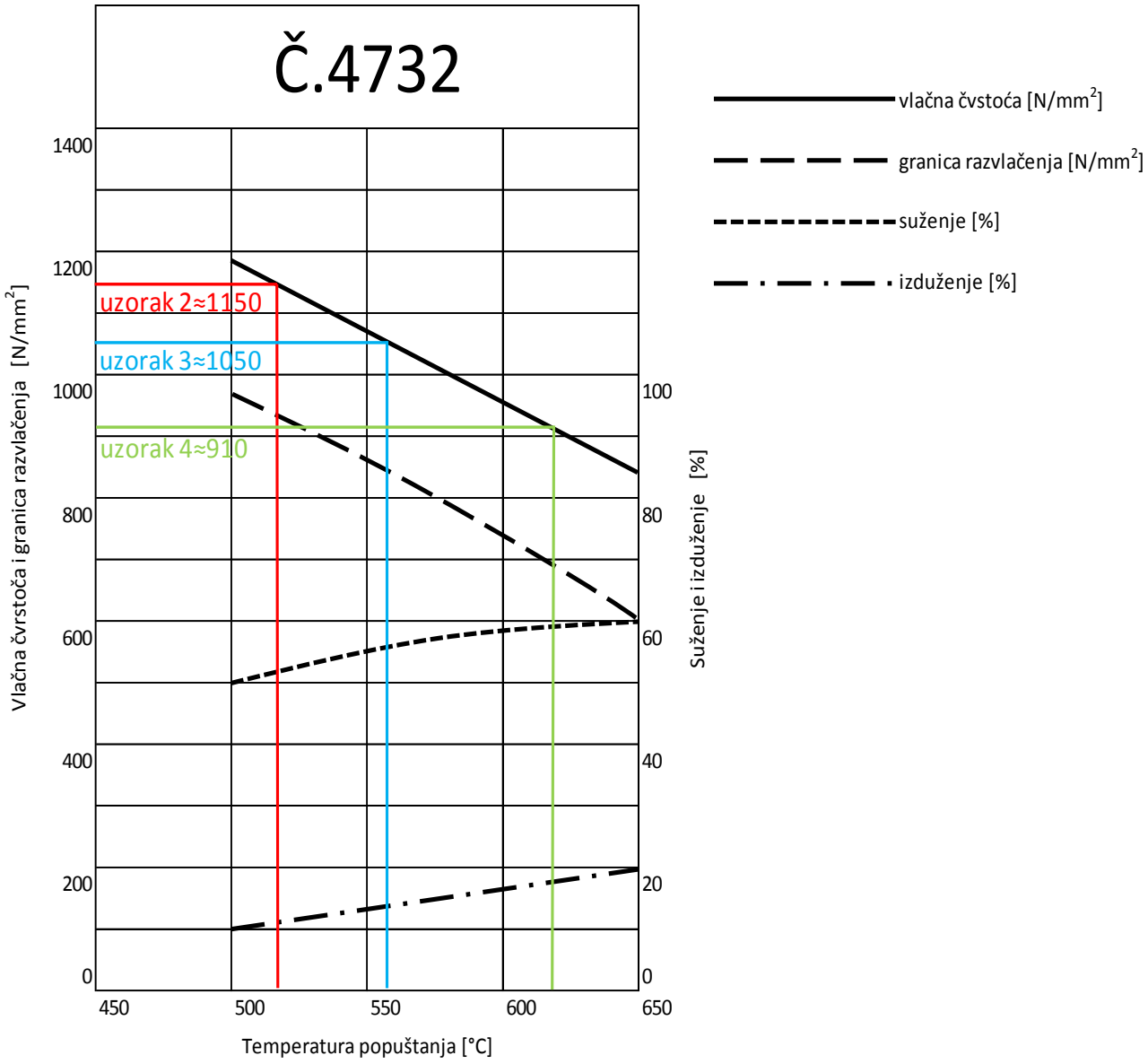
### *5.5.1. Mjerenje tvrdoće probnih štapova Brinellovom metodom nakon poboljšanja*

Poslije toplinske obrade poboljšanja, probni štapovi ispitani su na tvrdoću Brinellovom metodom na uređaju proizvođača VEB Werkstoffprűfmaschinen „Fritz Heckert“. Tvrdomjer može raditi u dvije mjerne metode (Brinell, Vickers). Rezultati dobivenih tvrdoća prikazani u tablici 10.

| **Testne epruvete** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Utisnute oznake | Količina | Temperatura visoko temperaturnog popuštanja [°C] | Vrijednosti tvrdoća po Brinellovoj metodi; srednja vrijednost[HB] | Vlačna čvrstoća izračunata formulom $\delta m \approx HB \cdot 10/3$ [$N/mm^2$] |
| 1 | 2 | - | - | - |
| 2 | 1 | 520 | 347 | 1157 |
| 3 | 1 | 560 | 306 | 1020 |
| 4 | 1 | 620 | 262 | 873 |

Tablica 10: Vrijednosti tvrdoće nakon toplinske obrade poboljšanja

Rezultatima prikazanim tablicom vidimo da je toplinska obrada uspješno odrađena jer dobivene vrijednosti vlačne čvrstoće približno odgovaraju teoretskim vrijednostima koje možemo pročitati iz dijagrama (slika 26)




Slika 26: Dijagram očitanja približnih teoretskih vrijednosti vlačne čvrstoće

## 5.6. Priprema za proces klasičnog nitriranja

Testne epruvete potrebno je pripremiti za proces nitriranja. Glavni razlog je taj da ne želimo da se navoj na epruvetama nitrira jer samim time postaje krhak i kod statičkog vlačnog pokusa vjerojatno bi popucao te testiranje ne bi bilo ispravno. Da bi to spriječili na epruvete smo stavili matice M16 koje su odgovarale navoju na epruveta i tako se osigurali (slika 27).

Proces klasičnog nitriranja uspješno je realiziran.



Slika 27: Priprema epruveta za proces nitriranja

## 5.7. Statički vlačni pokus

Elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja ispituje se statičkim vlačnim pokusom. Ovim ispitivanjem utvrđuju se ujedno osnovna mehanička svojstva materijala koja karakteriziraju njihova mehanička svojstva, kao što su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća itd.

Ispitivanje se provodi uređajima koji se nazivaju kidalice ili univerzalne ispitivalice, na kojima se epruvete kontinuirano vlačno opterećuju do loma. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sile i produljene epruvete, te se pisačem grafički

registrira dijagram „sila – produljenje.“ Opterećenje se kod kidalice ostvaruje hidraulički ili mehanički.

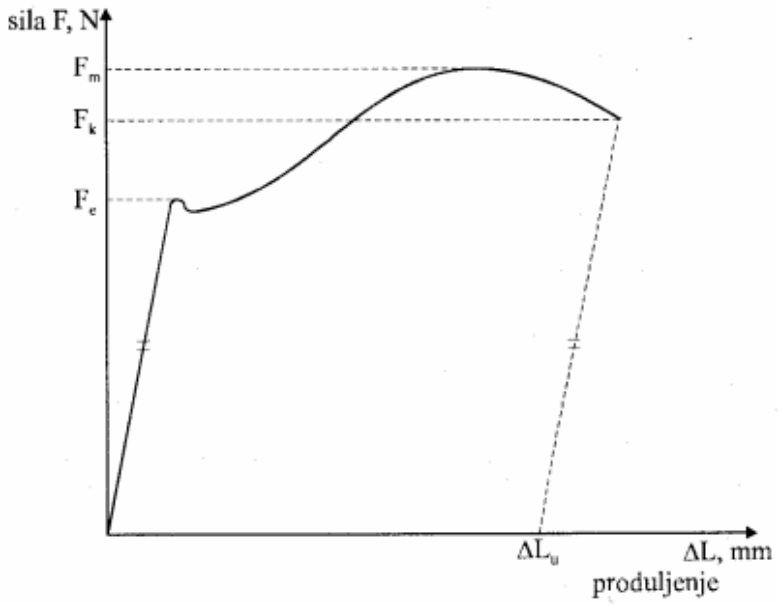
Statički vlačni pokus provodi se, ovisno o obliku poluproizvoda odnosno debljini stjenke, s epruvetama okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka. Kod epruveta okruglog presjeka početna mjerna duljina $L_0$ treba, prema dogovoru, biti jednaka peterostrukom ili deseterostrukom početnom promjeru $d_0$.

Epruveta se na mjestima zadebljanja („glava“ epruvete) učvršćuje u čeljusti kidalice. Prirast naprezanja u jedinici vremena pri statičkom vlačnom pokusu propisan je normom, a ovisi o modulu elastičnosti materijala koji se ispituje.

| *E* N/mm² | Prirast naprezanja u jedinici vremena N/mm² s | |
|---|---|---|
| | min | max |
| < 150000 | 1 | 10 |
| ≤ 150000 | 3 | 30 |

Tablica 11: Propisani prirast naprezanja pri statičkom vlačnom pokusu [10]

Na pisaču kidalice se za vrijeme statičkog vlačnog pokusa crta dijagram sila F – produljenje ΔL koji za konstrukcijski čelika u normaliziranom stanju ima oblik prikazan na slici 28.




Slika 28: Dijagram sila F- produljenje ΔL za konstrukcijski čelik [10]

U prvom dijelu dijagrama F - ΔL linearna je ovisnost sile i produljenja. Takva linearna ovisnost sve do dostizanja $F_e$ – sile razvlačenja ili tečenja. Nakon dostizanja te sile epruveta se nastavlja produljivati uz čak mali pad sile. Za daljnje rastezanje materijala potrebno je opet povećanje sile. U tom dijelu statičkog vlačnog pokusa više ne postoji linearna ovisnost između prirasta sile i produljenja.

Opterećenje se povećava sve do dostignuća $F_m$ – maksimalne sile, nakon koje se epruveta nastavlja produljivati uz smanjenje potrebne sile zbog lokaliziranog intenzivnog smanjenja površine poprečnog presjeka. Konačno pri vrijednosti $F_k$ – konačne sile dolazi do loma epruvete.

Sastavimo li puknutu epruvetu te izmjerimo razmak točaka koji je prije ispitivanja iznosio $L_0$ (početna mjerna duljina), dobit ćemo konačnu mjernu duljinu $L_u$. Produljenje nakon kidanja ΔL iznosi:

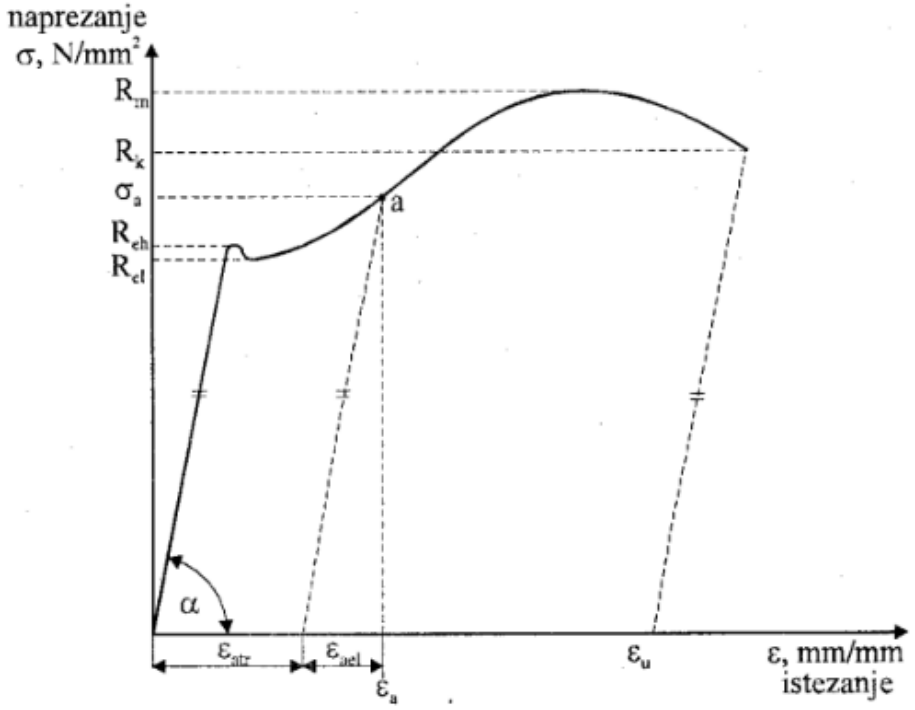
$$\Delta L = L_u - L_0 \, , mm$$

Iznosi sila pri statičkom vlačnom pokusu ne daju pravi uvid u mehaničku otpornost materijala ukoliko se ne uzme u obzir površina poprečnog presjeka epruvete, odnosno ukoliko se umjesto sile F ne uvede naprezanje $\delta$, koje se određuje izrazom:

$$\delta = \frac{F}{S_0} \, , N/mm^2$$

Gdje je sila F izražena u njutnima, a $S_0$ površina početnog presjeka epruvete u $mm^2$. Osim jedinice naprezanja $N/mm^2$, naprezanje se izražava i u paskalima ($Pa=N/m^2$).

Na slici 29 nalazi se dijagrama naprezanje $\delta$ – istezanje ε za neki konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju.




Slika 29: Hookov dijagram [10]

Granica razvlačenja $R_e$ utvrđuje se izrazom:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}\ , N/mm^2$$

$F_e$ [N] – sila tečenja

$S_0$ [$mm^2$] – površina početnog presjeka

Naprezanje kod maksimalne sile naziva se vlačna ili rastezna čvrstoća $R_m$:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}\ , N/mm^2$$

$F_m$ [N] – maksimalna sila

$S_0$ [$mm^2$] – površina početnog presjeka

Nakon dostignutog naprezanja $R_m$, deformacija epruvete nije više jednolika po čitavom ispitanom dijelu već se lokalizira na jednom mjestu. Naprezanje kod kojeg dolazi do loma epruvete zove se konačno naprezanje $R_k$:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}\ , N/mm^2$$

$F_k$ [N] – konačna sila

$S_0$ [mm$^2$] – površina početnog presjeka

Istezljivost A definirana je sljedećim izrazom:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100\ ,\%$$

$L_0$ [mm] – početna mjerna duljina epruvete

$L_u$ [mm] – konačna mjerna duljina epruvete

A [%] – relativno produljenje materijala

Kontrakcija Z definirana je sljedećim izrazom:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100\ ,\%$$

$S_0$ [mm$^2$] – površina početnog presjeka epruvete

$S_u$ [mm$^2$] – površina presjeka epruvete na mjestu loma

Z [%] – relativno suženje površine presjeka epruvete u odnosu na površinu početnog presjeka [10]

### *5.7.1. Ispitivanje vlačne čvrstoće testnih epruveta*

Nakon što smo odradili postupak klasičnog nitriranja pristupit ćemo statičkom vlačnom pokusu gdje ćemo saznati koje su stvarne vrijednosti vlačne čvrstoće naših testnih epruveta.

Ispitivanje se provodilo u laboratoriju za testiranje mehaničkih svojstava materijala, na Veleučilištu u Karlovcu. Kidalica koju smo koristili je proizvođača Otto Wolpert Werke, iz 1963. godine. Kidalica ima dva mjerna područja : od 0 do 300 kN i od 0 do 600 kN. Tokom testiranja mi smo koristili mjerno područje od 0 do 300 kN, opterećenja 200 kN. Također na kidalici još se mogu provesti ispitivanja na smik, savijanje, statičko tlačno ispitivanje.

Na slici 30 prikazana je kidalica i stegnuta testna epruveta u čeljusti kidalice, spremna za ispitivanje.



Slika 30: Kidalica proizvođača Otto Wolpert Werke

Dobivene vrijednosti nalaze se u tablici 12., ujedno u tablici se nalaze i vrijednosti od samog početka pokusa zbog lakše usporedbe.

| Testne epruvete | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Utisnute oznake** | **Količina** | **Temperatura visoko temperaturnog popuštanja [°C]** | **Vrijednosti tvrdoća po Brinellovoj metodi; srednja vrijednost[HB]** | **Vlačna čvrstoća izračunata formulom $\delta m \approx HB \cdot 10/3$ [N/mm$^2$]** | **Vlačna čvrstoća nakon vlačnog ispitivanja δm [N/mm$^2$]** |
| 1 | 2 | nisu toplinski obrađene | - | - | 755<br>740 |
| 2 | 1 | 520 | 347 | 1157 | 1175 |
| 3 | 1 | 560 | 306 | 1020 | 1040 |
| 4 | 1 | 620 | 262 | 873 | 870 |

Tablica 12: Vrijednosti prije i nakon (plava boja) vlačnog ispitivanja

Vrijednosti vlačne čvrstoće nakon vlačnog ispitivanja gotovo su iste kao i pretpostavljene vrijednosti izračunate preko vrijednosti tvrdoća. Epruvete su pucale krhko, što je bilo za očekivati, ali istovremeno nitrirani površinski sloj popucao je uslijed naprezanja po čitavoj površini epruveta (slika 31)



Slika 31: Epruvete nakon vlačnog ispitivanja

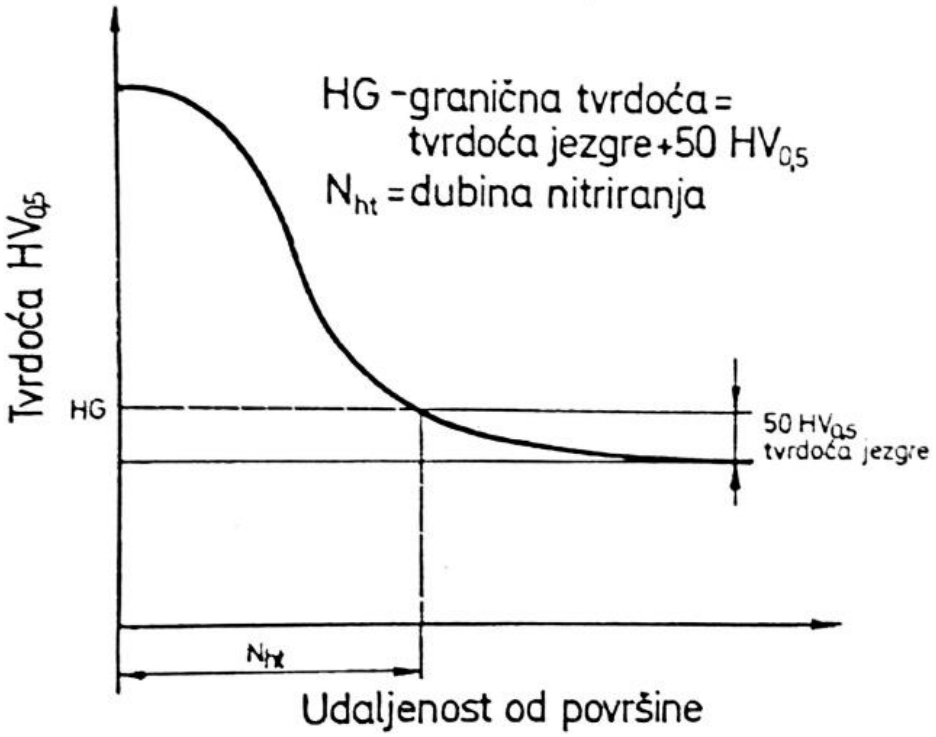
## 5.8. Mjerenje dubine nitriranog sloja i tvrdoće na površini

Postoje općenito tri metode za mjerenje dubine nitriranog sloja:

1. ocjena dubine na poliranom i nagriženom uzorku, metalografski
2. mjerenjem tvrdoće na koso brušenoj ravnoj plohi (kosina 1:80)
3. mjerenjem tvrdoće na poprečnom presjeku nitriranog predmeta (DIN 50-190)

Metalografska procjena dubine nitriranja daje obično manje vrijednosti nego mjerenje trećom metodom pomoću krivulje tvrdoće. Ona međutim nije dovoljno točna jer s jedne strane ovisi o individualnoj ocjeni mjeritelja, a s druge strane je ovisna o provedbi nagrizanja. Druga metoda kod koje se upotrebljava koso brušena ravna površina je točnija od treće metode jedino kod vrlo tankih nitriranih slojeva (npr. kod nitriranja visoko legiranih čelika u trajanju ispod 30 min).

Za ostale slučajeve nitriranja raznih materijala i kod uporabe raznih postupaka nitriranja, u Europi najviše se koristi treća metoda tj. mjerenje tvrdoće po poprečnom presjeku, koja je standardizirana prema DIN 50-190.




Slika 32: Mjerenje tvrdoće nitriranog sloja [7]

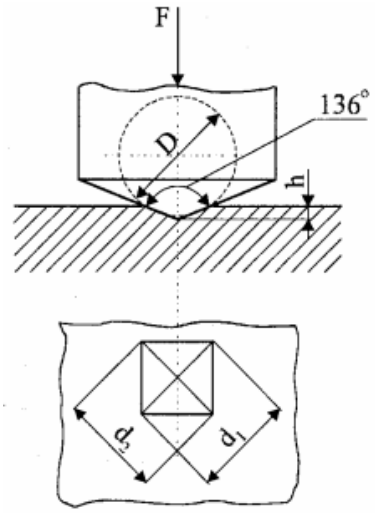
Prema toj metodi (slika 32), mjeri se tvrdoća na poprečnom presjeku nitrirane, brušene i polirane probe u najmanje dva reda mjerenja na različitim mjestima presjeka. Dobivene vrijednosti daju krivulju toka tvrdoće u ovisnosti o udaljenosti od površine.

Dubina nitriranog sloja (prema DIN-u $N_{ht}$) je okomita udaljenost od površine do one točke u nitriranom sloju u kojoj je prisutna granična tvrdoća (HG). Kao granična tvrdoća uzima se izmjerena tvrdoća jezgre plus 50 HV, mjereno opterećenjem od 4,9N. Dubina nitriranog sloja mjeri se u milimetrima.

Kao izmjerena tvrdoća jezgre uzima se srednja vrijednost od 3 mjerenja tvrdoće $HV_{0,5}$ na udaljenosti od površine koja je jednaka barem trostrukoj dubini nitriranja.[7]

## 5.9. Ispitivanje mikrotvrdoće Vickersovom metodom

Kod Vickersove metode uklonjena su dva osnovna nedostatka Brinellove metode: ograničenost područja mjerenja do 450 HB, te ovisnost iznosa tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja kuglice. Prvi je nedostatak uklonjen uporabom najtvrđeg materijala za penetrator, dijamanta, a drugi oblikom penetratora. To je kod Vickersove metode četverostrana piramida s kutem od 136° između stranica (slika 33).




Slika 33: Mjerenje tvrdoće po Vickersu [10]

Kut od 136° nije odabran slučajno. Taj kut zatvaranja tangencijalne ravnine na Brinellovu kuglicu pri optimalnoj veličini otisnuća d=0,375·D. Po definiciji, tvrdoća po Vickersu jednaka je onoj Brinellovoj, a izračunava se izrazom:

$$HV = \frac{F \cdot 0{,}102}{S}$$

Pri čemu je F, [N] sila, a S, [mm$^2$], ploština otisnuća (šuplje piramide) nakon rasterećenja. Budući da se mjeri dijagonala baze otisnuća (kvadrata), ploština otisnuća izračunava se pomoću dijagonale „d“ te izlazi:

$$HV = \frac{F \cdot 0{,}188}{d^2}$$

Pri čemu je F, [N] sila, a d, [mm], srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale otisnuća. Uobičajeni iznosi sile kod Vickersove metode iznose od 49 do

980 N. no kod Vickersove metode koriste se i niža opterećenja. Ukoliko primijenjena sila utiskivanja iznosi od 1,96 do 49 N govori se o semi mikrotvrdoći. Mjerenje semi mikrotvrdoće provodi se prvenstveno pri ispitivanju tvrdoće tankih uzoraka te tankih slojeva.

Za mjerenja tzv. mikrotvrdoće rabe se opterećenja niža od 1,96 N. na taj način moguće je mjerenje tvrdoća pojedinih faza, npr. kristalnih zrna u mikrostrukturi materijala. Trajanje opterećivanja penetratora iznosi od 10 do 15 s, a iznimno se za mekane materijale može produljiti. Vickersova tvrdoća je bezdimenzionalna veličina, a uz iznos tvrdoće navodi se i sila opterećivanja, npr.430 HV10, što znači da je izmjerena tvrdoća iznosila 430 HV i da je dobivena utiskivanjem penetratora silom 10·9,81 N u trajanju od 10 do 15 s. Ukoliko je trajanje utiskivanja produljeno, navodi se također u oznaci (npr. 28 HV1/30 znači da je izmjerena tvrdoća iznosila 28 HV, sila utiskivanja 1·9,81 N, a vrijeme 30 s. Kod Vickersove metode je potrebna pažljiva priprema mjerne površine koja pogotovo za mjerenje semi mikrotvrdoće i mikrotvrdoće uključuje i poliranje uzorka. Također je zbog sitnog otiska za mjerenje dijagonale potreban mjerni mikroskop.[10]

Površina uzorka koja se ispituje mikrotvrdoćom mora biti glatka, ravna, bez oksidne prevlake, stranih tvari i sredstava za podmazivanja, sama priprema uzorka ne smije dovesti do promjene mikrostrukture i tvrdoće (rezanje uzorka, zagrijavanje prilikom poliranja). Debljina uzorka mora biti najmanje 1,5 puta veća od otisnute dijagonale, ne smije biti vidljivih deformacija s druge strane nakon ispitivanja. Kod ispitivanja malih poprečnih presjeka ili nepravilnih oblika uzorak se zalijeva u plastičnu masu.

Ispitivanje se provodi mikrotvrdomjerom u kontroliranim uvjetima na sobnoj temperaturi, sile utiskivanja nalaze se u tablici 13.

| Tvrdoća | Sila utiskivanja [N] |
|---|---|
| HV 0,2 | 1,961 |
| HV 0,3 | 2,942 |
| HV 0,5 | 4,903 |
| HV 1 | 9,807 |
| HV 2 | 19,61 |
| HV 2,5 | 24,52 |
| HV 3 | 29,42 |

Tablica 13: Sile utiskivanja kod mikrotvrdoće

Uzorak mora biti stabilan na mikrotvrdomjeru da ne bi došlo do pomicanja prilikom ispitivanja. Penetrator se dovodi u dodir s površinom te se opterećuje silom. Ne smije doći do vibracija i udara prilikom ispitivanja jer onda nemamo točne vrijednosti. Vrijeme djelovanja sile na površinu ne smije biti duže od 10 sec, isto tako brzina spuštanja penetratora ne smije biti veća od 200 μm/s. Mikrotvrdomjer ne smije biti izložen vibracijama i udarima.

Udaljenost od središta otiska i ruba uzorka mora biti najmanje 2,5 puta veća od srednje vrijednosti dijagonala za čelik. Aritmetička sredina dijagonala uzima se za izračunavanje tvrdoće po Vickersu. Kod izračunavanja upotrebljavaju se tablice koje su definirane standardom.

Na kraju radi se izvještaj o mjerenju koji sadržava vrstu materijala, oznake uzoraka, dobivene rezultate i analizu rezultata.

### *5.9.1. Priprema testnih epruveta za mikrotvrdoću*

Nakon što smo prethodno epruvete ispitali i dobili vrijednosti vlačne čvrstoće, iste epruvete ćemo iskoristiti za pripremu uzoraka za ispitivanje mikrotvrdoće. Epruvete su rezane uz obilno hlađenje na rezačici proizvođača Struers, modela Labotom-3, koja postiže 2845 o/min (slika 34). Obilno hlađenje je potrebno da ne bi došlo do promjene tvrdoće uzoraka i njihove mikrostrukture.



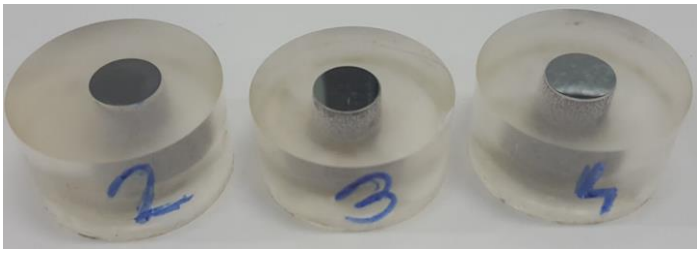
Slika 34: Rezanje epruvete na rezačici Labotom-3

Sljedeći korak bio je zalijevanje uzoraka plastičnom masom, zapravo priprema samih uzoraka je gotovo identična kao i za metalografiju. Kad plastična masa postane kruta, uzorci se vade iz kalupa i slijedi brušenje i poliranje (slika 35). Kod postupka brušenja i poliranja također mora biti obilno hlađenje uzoraka da bi površina koju obrađujemo ostala iste tvrdoće i iste mikrostrukture. Poliranje uzoraka izvodilo se na uređaju proizvođača Struers, modela LoboPol-5. Maksimalnog broja okretaja 500 o/min.




Slika 35: Uređaj za poliranje Struers, modela LoboPol-5

Sada su uzorci spremni za ispitivanje mikrotvrdoće. Odrezani, brušeni ,zaliveni u masu, polirani i označeni.




Slika 36: Uzorci pripremljeni za ispitivanje mikrotvrdoće

### *5.9.2. Ispitivanje mikrotvrdoće pripremljenih uzorka*

Ispitivanje mikrotvrdoće na uzorcima odvijalo se u laboratoriju tvrtke Adriadiesel d.d., ispitivanje nam je omogućio Dubravko Golubić, dipl. ing. stroj. Proizvođač mikrotvdomjera na kojem se provodilo ispitivanje je Leitz Wetzlar model Durimet 2 (slika 37).

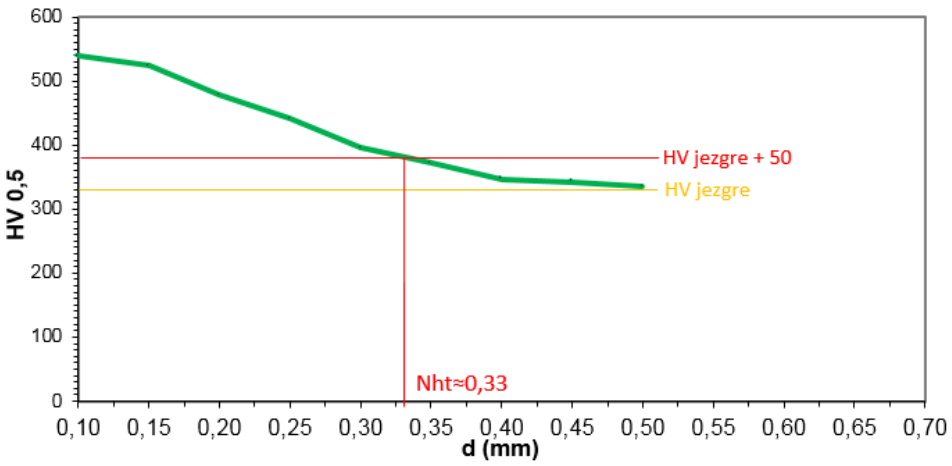


Slika 37: Mikrotvrdomjer Leitz Wetzlar model Durimet 2

Ispitivanje tvrdoće provodili u dva mjerna područja, HV 0,3 gdje nam je sila opterećenja iznosi 2,943N i HV 0,5 sa silom opterećenja od 4,903N. Prvo smo mjerili tvrdoću jezgre s ukupno tri mjerenja i uzimali srednju vrijednost. Zatim krećemo s mjerenjem tvrdoće od površine prema jezgri s pomakom od 0,05 mm sve dok ne dobijemo vrijednost tvrdoće jezgre.

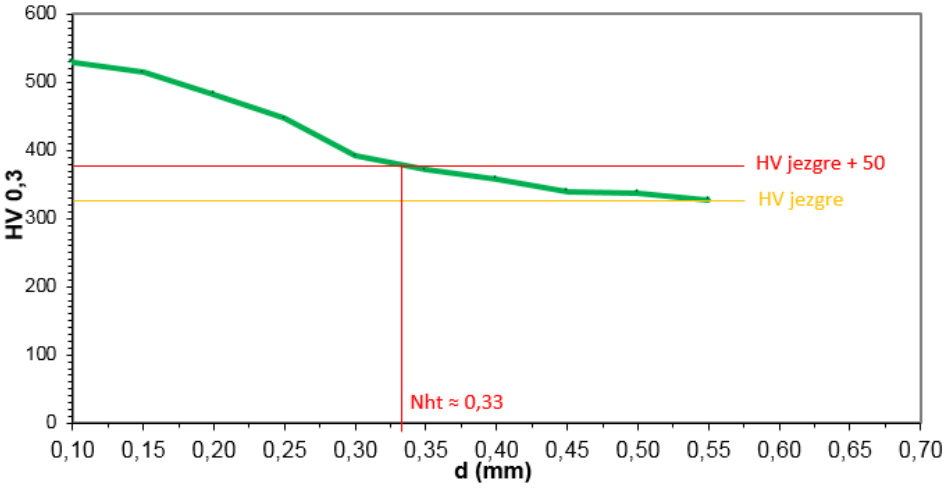
Rezultati ispitivanja prikazani su tabličnim zapisom vrijednosti i dijagramima koji sadrže krivulje odnosa dubine nitriranog sloja i tvrdoće.

| d ( mm) | HV 0,5 |
|---|---|
| 0,10 | 539 |
| 0,15 | 523 |
| 0,20 | 478 |
| 0,25 | 441 |
| 0,30 | 395 |
| 0,35 | 372 |
| 0,40 | 347 |
| 0,45 | 342 |
| 0,50 | 335 |
| 0,55 | |
| 0,60 | |
| 0,65 | |
| 0,70 | |
| **Jezgra (HV)** | |
| 341 | |
| 330 | |
| 330 | |
| **Srednja vrijednost (HV)** | |
| 334 | |



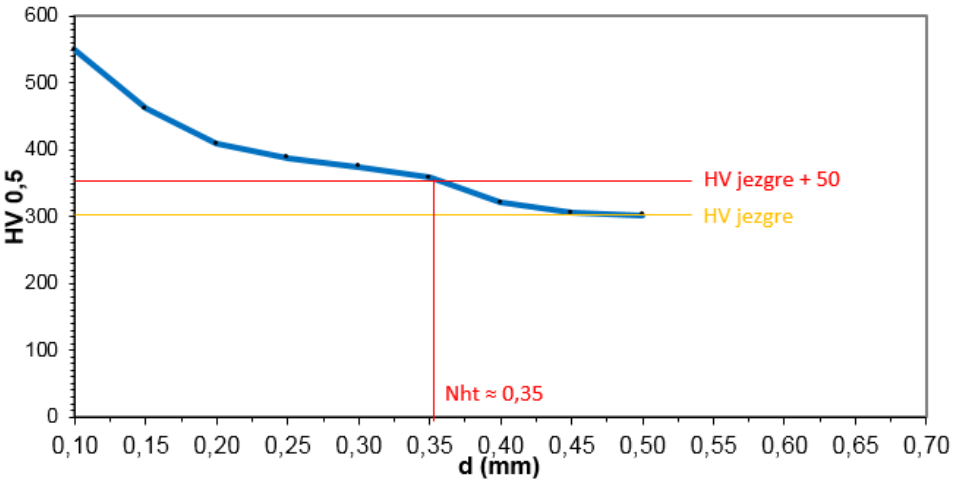

Slika 38: Dijagram i tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,5 za uzorak 2

| d ( mm) | HV 0,3 |
|---|---|
| 0,10 | 530 |
| 0,15 | 515 |
| 0,20 | 483 |
| 0,25 | 447 |
| 0,30 | 392 |
| 0,35 | 372 |
| 0,40 | 358 |
| 0,45 | 340 |
| 0,50 | 338 |
| 0,55 | 328 |
| 0,60 | |
| 0,65 | |
| 0,70 | |
| **Jezgra (HV)** | |
| 344 | |
| 331 | |
| 312 | |
| **Srednja vrijednost (HV)** | |
| 329 | |



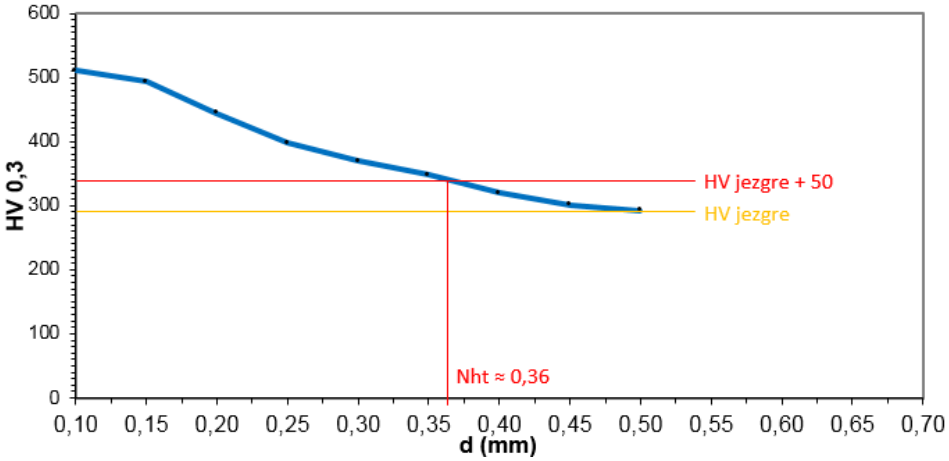

Slika 39: Dijagram i tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,3 za uzorak 2

| d ( mm) | HV 0,5 |
|---|---|
| 0,10 | 550 |
| 0,15 | 462 |
| 0,20 | 409 |
| 0,25 | 388 |
| 0,30 | 375 |
| 0,35 | 358 |
| 0,40 | 321 |
| 0,45 | 306 |
| 0,50 | 302 |
| 0,55 | |
| 0,60 | |
| 0,65 | |
| 0,70 | |
| **Jezgra (HV)** | |
| 318 | |
| 299 | |
| 304 | |
| **Srednja vrijednost (HV)** | |
| 307 | |



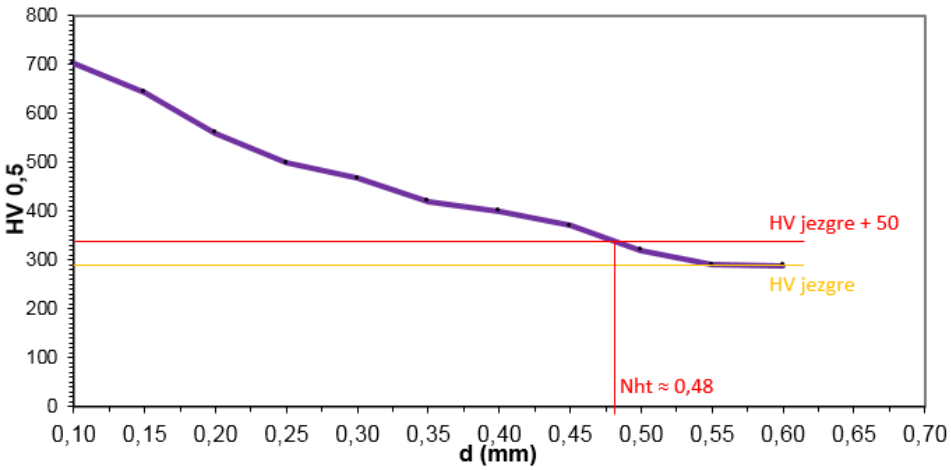

Slika 40: Dijagram i tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,5 za uzorak 3

| d ( mm) | HV 0,3 |
|---|---|
| 0,10 | 511 |
| 0,15 | 493 |
| 0,20 | 444 |
| 0,25 | 398 |
| 0,30 | 370 |
| 0,35 | 348 |
| 0,40 | 319 |
| 0,45 | 301 |
| 0,50 | 292 |
| 0,55 | |
| 0,60 | |
| 0,65 | |
| 0,70 | |
| **Jezgra (HV)** | |
| 288 | |
| 290 | |
| 293 | |
| **Srednja vrijednost (HV)** | |
| 290 | |



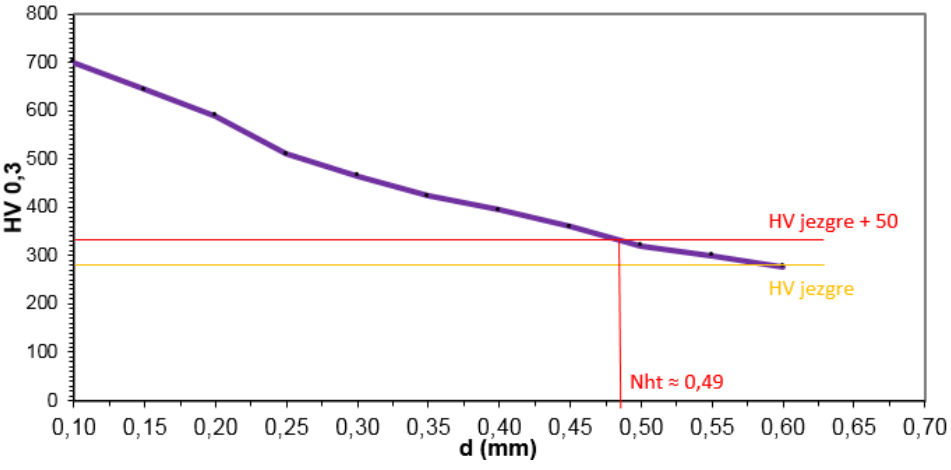

Slika 41: Dijagram i tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,3 za uzorak 3

| d ( mm) | HV 0,5 |
|---|---|
| 0,10 | 701 |
| 0,15 | 642 |
| 0,20 | 560 |
| 0,25 | 498 |
| 0,30 | 467 |
| 0,35 | 420 |
| 0,40 | 400 |
| 0,45 | 370 |
| 0,50 | 320 |
| 0,55 | 290 |
| 0,60 | 288 |
| 0,65 | |
| 0,70 | |
| **Jezgra (HV)** | |
| 285 | |
| 300 | |
| 290 | |
| **Srednja vrijednost (HV)** | |
| 292 | |




Slika 42: Dijagram i tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,5 za uzorak 4

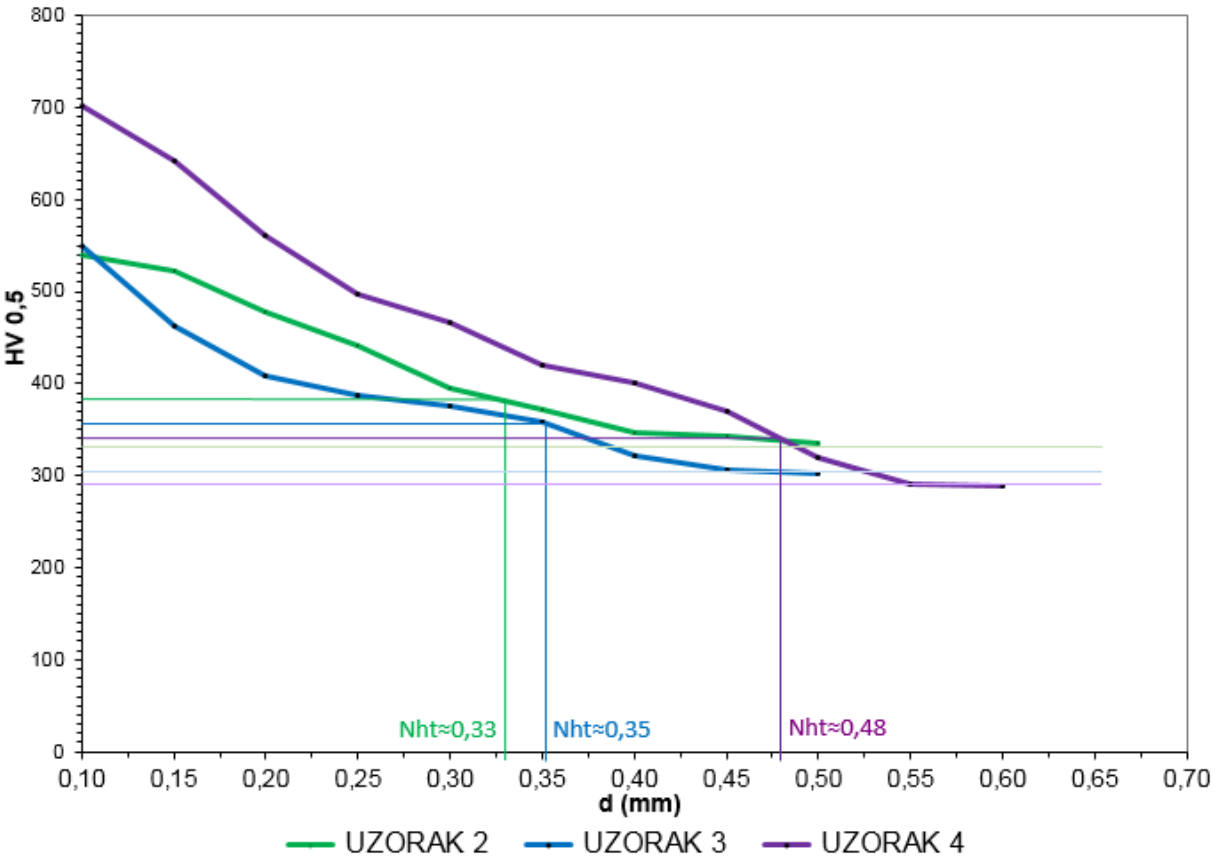
| d ( mm) | HV 0,3 |
|---|---|
| 0,10 | 700 |
| 0,15 | 643 |
| 0,20 | 590 |
| 0,25 | 510 |
| 0,30 | 465 |
| 0,35 | 423 |
| 0,40 | 394 |
| 0,45 | 360 |
| 0,50 | 321 |
| 0,55 | 300 |
| 0,60 | 277 |
| 0,65 | |
| 0,70 | |
| **Jezgra (HV)** | |
| 298 | |
| 260 | |
| 288 | |
| **Srednja vrijednost (HV)** | |
| 282 | |




Slika 43: Dijagram i tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,3 za uzorak 4

| UZORAK 2 | | UZORAK 3 | | UZORAK 4 | |
|---|---|---|---|---|---|
| d ( mm) | HV 0,5 | d ( mm) | HV 0,5 | d ( mm) | HV 0,5 |
| 0,10 | 539 | 0,10 | 550 | 0,10 | 701 |
| 0,15 | 523 | 0,15 | 462 | 0,15 | 642 |
| 0,20 | 478 | 0,20 | 409 | 0,20 | 560 |
| 0,25 | 441 | 0,25 | 388 | 0,25 | 498 |
| 0,30 | 395 | 0,30 | 375 | 0,30 | 467 |
| 0,35 | 372 | 0,35 | 358 | 0,35 | 420 |
| 0,40 | 347 | 0,40 | 321 | 0,40 | 400 |
| 0,45 | 342 | 0,45 | 306 | 0,45 | 370 |
| 0,50 | 335 | 0,50 | 302 | 0,50 | 320 |
| 0,55 | | 0,55 | | 0,55 | 290 |
| 0,60 | | 0,60 | | 0,60 | 288 |
| 0,65 | | 0,65 | | 0,65 | |
| 0,70 | | 0,70 | | 0,70 | |
| Jezgra (HV) | | Jezgra (HV) | | Jezgra (HV) | |
| 341 | | 318 | | 285 | |
| 330 | | 299 | | 300 | |
| 330 | | 304 | | 290 | |
| Srednja vrijednost (HV) | | Srednja vrijednost (HV) | | Srednja vrijednost (HV) | |
| 334 | | 307 | | 292 | |

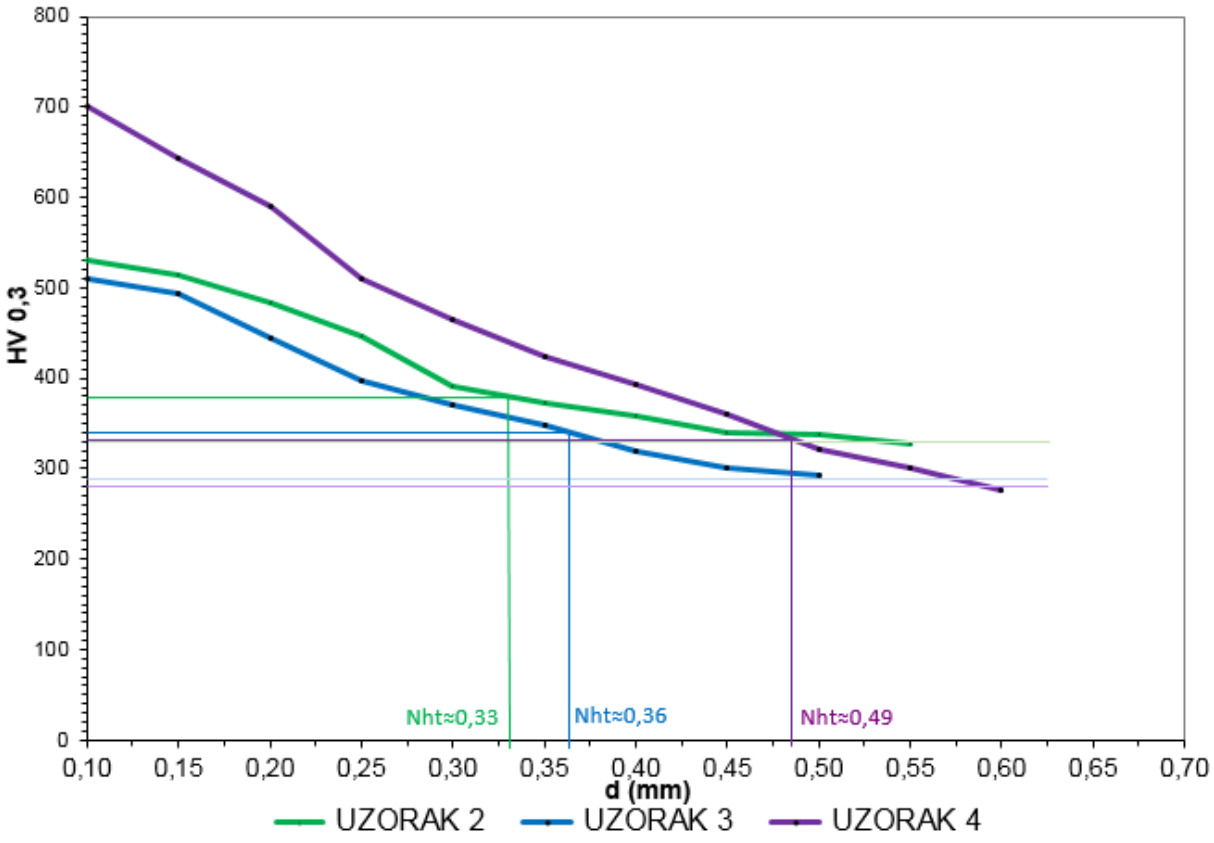
Tablica 14: Tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,5 za sve uzorke




Slika 44: Dijagram vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,5 za sve uzorke

| UZORAK 2 | | UZORAK 3 | | UZORAK 4 | |
|---|---|---|---|---|---|
| d ( mm) | HV 0,3 | d ( mm) | HV 0,3 | d ( mm) | HV 0,3 |
| 0,10 | 530 | 0,10 | 511 | 0,10 | 700 |
| 0,15 | 515 | 0,15 | 493 | 0,15 | 643 |
| 0,20 | 483 | 0,20 | 444 | 0,20 | 590 |
| 0,25 | 447 | 0,25 | 398 | 0,25 | 510 |
| 0,30 | 392 | 0,30 | 370 | 0,30 | 465 |
| 0,35 | 372 | 0,35 | 348 | 0,35 | 423 |
| 0,40 | 358 | 0,40 | 319 | 0,40 | 394 |
| 0,45 | 340 | 0,45 | 301 | 0,45 | 360 |
| 0,50 | 338 | 0,50 | 293 | 0,50 | 321 |
| 0,55 | 328 | 0,55 | | 0,55 | 300 |
| 0,60 | | 0,60 | | 0,60 | 277 |
| 0,65 | | 0,65 | | 0,65 | |
| 0,70 | | 0,70 | | 0,70 | |
| **Jezgra (HV)** | | **Jezgra (HV)** | | **Jezgra (HV)** | |
| 344 | | 288 | | 298 | |
| 331 | | 290 | | 260 | |
| 312 | | 293 | | 288 | |
| **Srednja vrijednost (HV)** | | **Srednja vrijednost (HV)** | | **Srednja vrijednost (HV)** | |
| 329 | | 290 | | 282 | |

Tablica 15: Tablični prikaz vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,3 za sve uzorke




Slika 45: Dijagram vrijednosti ispitane mikrotvrdoće opterećenja HV 0,3 za sve uzorke

Pregledom dijagrama i dobivenih vrijednosti tvrdoća vidi se da su ispitivanja opterećenjem od HV 0,5 i HV 0,3 vrlo slična. Krivulje se gotovo poklapaju, što nam je pokazatelj da je mjerenje bilo ispravno. Nema velikih razlika u vrijednostima.

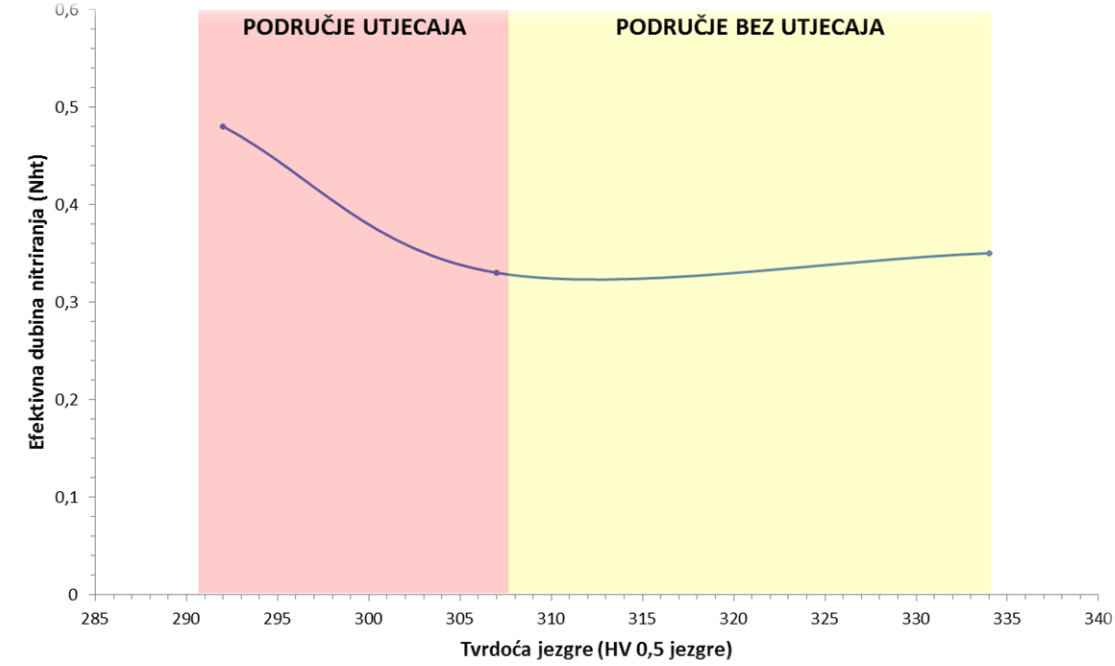
Slika 44 i 45 prikazuju dijagram gdje se nalaze krivulje triju epruveta. Vidljivo je da između uzoraka postoje razlike. Između uzorka 2 i 3 razlika nije velika, uzorak 2 ima približnu vrijednost efektivne dubine nitriranja $N_{ht2} \approx 0{,}33$ mm, dok uzorak 3 ima $N_{ht3} \approx 0{,}35 \div 0{,}36$ mm. Podsjetimo se, vrijednost vlačne čvrstoće uzorka 2 iznosila je $\delta_{m2} = 1175$ N/mm$^2$, a za uzorak 3 iznosila je $\delta_{m3} = 1040$ N/mm$^2$. Razlika između čvrstoća nije bila velika pa tako ni vrijednosti efektivne dubine nitriranja nisu velike. Točnije, između uzorka 2 i 3 razlika efektivne dubine nitriranja približno iznosi $\Delta N_{ht\,2,3} \approx 0{,}03$mm. Gledamo li krivulju uzorka 4, vidimo dosta veću razliku od uzorka 2 i 3. Vrijednost vlačne čvrstoće uzorka 4 bila je najmanja, $\delta_{m4} = 870$ N/mm$^2$, posljedica toga je veća efektivna dubina nitriranja koja iznosi $N_{ht4} \approx 0{,}48 \div 0{,}49$ mm. Dakle, što nam je čvrstoća uzorka manja to imamo veću efektivnu dubinu nitriranja. Padanjem vrijednosti vlačne čvrstoće, efektivna dubina raste.

Sljedeća tablica (tablica 14) prikazuje pregled svih ključnih parametara i njihovih vrijednosti.

| Uzorak | Tvrdoća HB | Čvrstoća δm [N/mm$^2$] | Tvrdoća jezgre HV 0,5 | Tvrdoća jezgre HV 0,3 | Nht 0,5 [mm] | Nht 0,3 [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **2** | 347 | 1175 | 334 | 329 | 0,33 | 0,33 |
| **3** | 306 | 1040 | 307 | 290 | 0,35 | 0,36 |
| **4** | 262 | 870 | 292 | 282 | 0,48 | 0,49 |

Tablica 14: Ključni parametri i njihove vrijednosti

# 6. ZAKLJUČAK

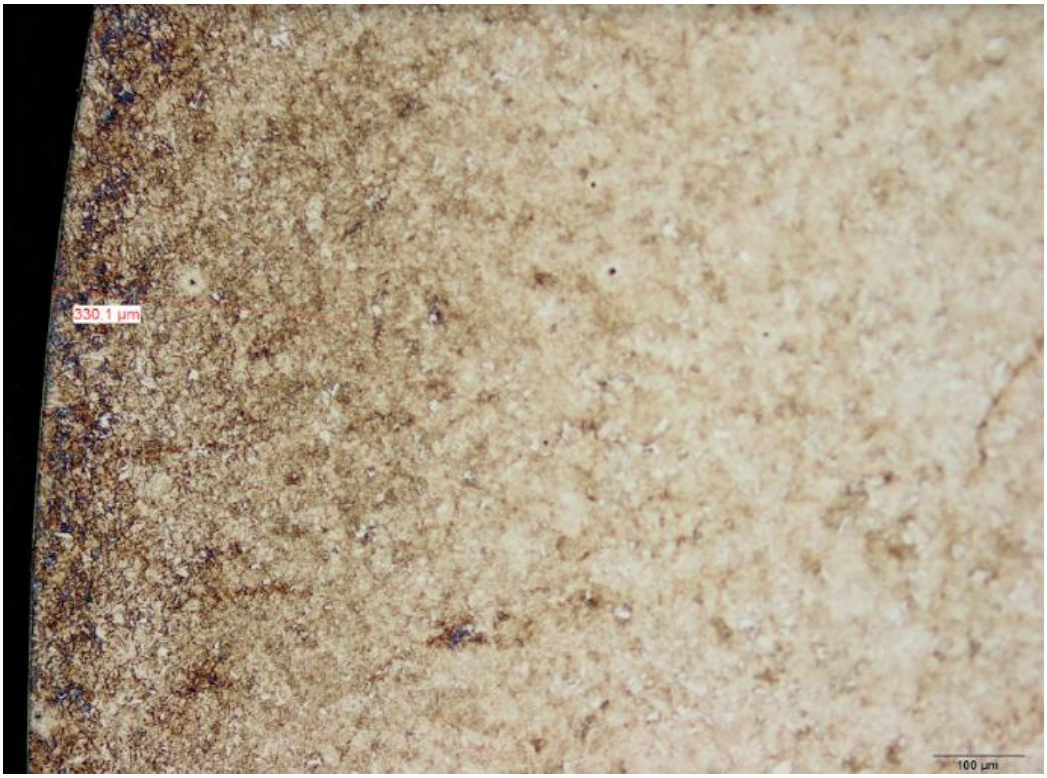



Slika 46: Dijagram ovisnosti efektivne dubine nitriranja i tvrdoće jezgre

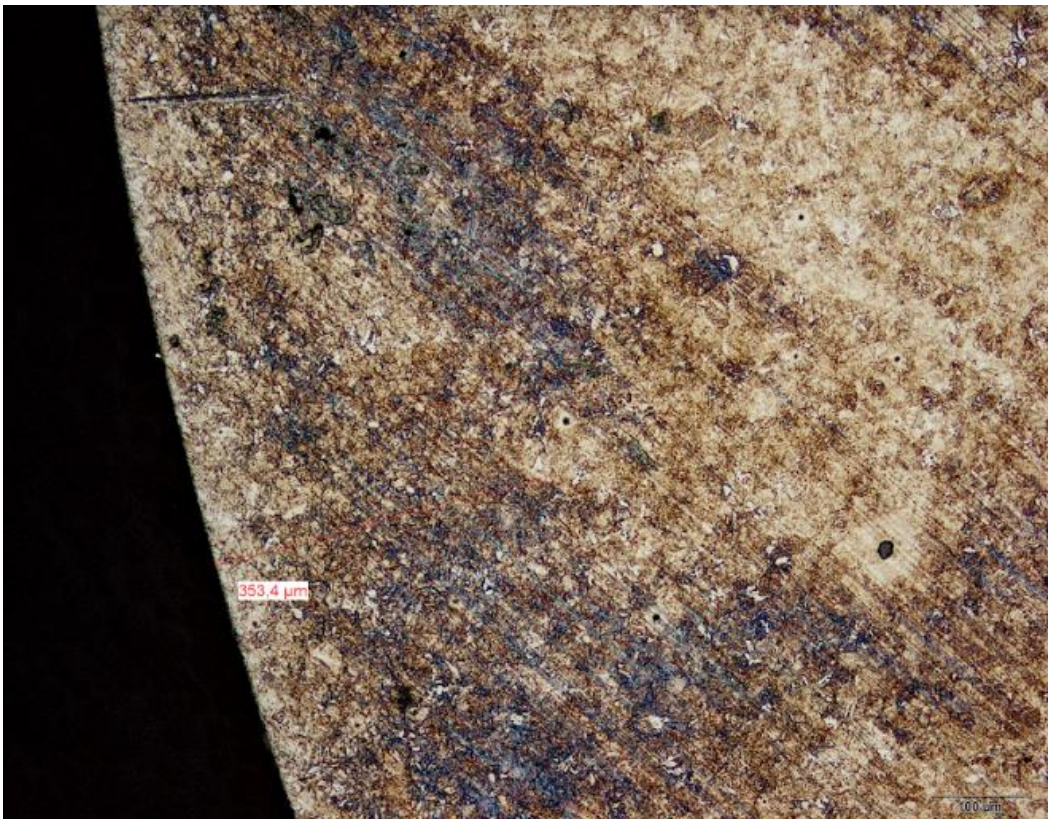
Provedeni plan pokusa ukazuje na utjecaj čvrstoće jezgre na efektivnu dubinu nitriranja u identičnim uvjetima provedbe termodifuzije. Rezultati dobiveni na relativno malom broju uzoraka ukazuju na znatno veću difuziju nitrida kod nižih čvrstoća, dok je utjecaj iznad 1050 N/mm2 beznačajan.

Potvrdu rezultata treba dokazati na znatno većem broju uzoraka uz dodatne kontrolne procese, laboratorijska ispitivanja prilikom poboljšanja i nitriranja bilo koje vrste. Tim načinom došli bi do univerzalne funkcije kojom bi se mogli koristiti u praksi jer u literaturama ona ne postoji. U svakom slučaju, cilj zadatka završnog rada je ostvaren.

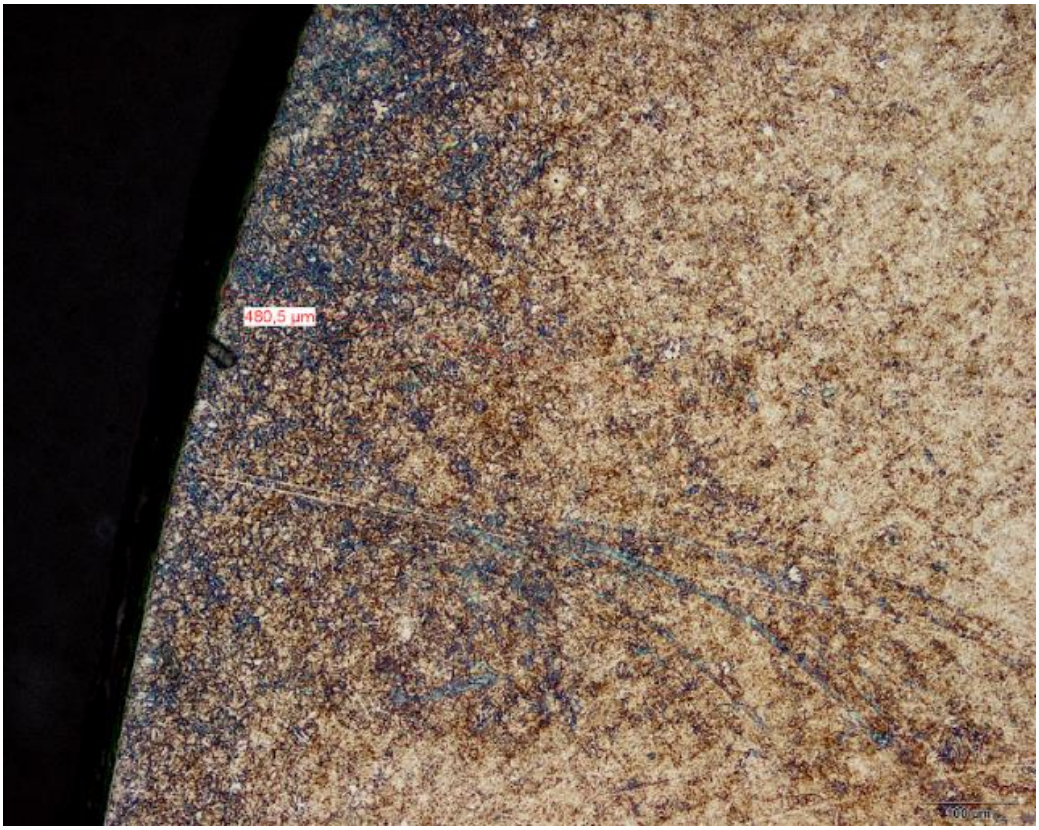
Dodatno uzorci koji su bili ispitani na mikrotvrdomjeru nagriženi su tri postotnom dušičnom kiselinom (nitratna kiselina $HNO_3$). Nagrižena površina uzoraka metalografski je snimljena. Metalografske slike na kojima je izmjerena efektivna dubina nitriranja dodatan su dokaz da je pokus uspješno proveden.




Slika 47: Metalografska slika uzorka 2




Slika 48: Metalografska slika uzorka 3




Slika 49: Metalografska slika uzorka 4

# 7. LITERATURA

[1] Stupnišek, M., Cajner, F.: Osnove toplinske obrade metala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2001.

[2] Liščić, B.: Termička obrada čelika, Metalbiro, Zagreb, 1978.

[3] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1329396769-0 prezentacija_mat_ii_to_pdf_bez_teksta.pdf

[4] D. Krumes: Toplinska obradba, Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod, 2000.

[5] Liščić, B.: Čelični materijali – 2, Metalbiro, Zagreb, 1981.

[6] Gojić, M.: Površinska obrada materijala, Sisak, 2010.

[7] Liščić, B.: Termokemijski postupci, Metalbiro, Zagreb, 1981.

[8] https://www.scribd.com/document/331456470/DIN-50125

[9] http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Ispitivanje%20tvrdoce.pdf

[10] Franz, M.: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 1998.