

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ZAVRŠNI RAD**

**Mate Zoričić**

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

Student:

Mate Zoričić

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Franji Cajneru na mentorstvu i pomoći pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se asistentu Ivanu Kumiću, mag. ing. na brojnim korisnim savjetima pri izradi rada i pomoći pri radu u laboratoriju.

Zahvaljujem se i dr.sc. Hrvoju Cajneru na pomoći pri statističkoj analizi rezultata ispitivanja.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci iskazanoj tijekom studija.

Mate Zoričić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MATE ZORIČIĆ** Mat. br.: 0035182032

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **OTPORNOST ČELIKA X155CrVMo12-1 NA ABRAZIVNU EROZIJU ČESTICAMA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **X155CRVMO12-1 STEEL RESISTANCE TO HARD PARTICLES ABRASIVE EROSION**

Opis zadatka:

Erozija česticama je gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed relativnog gibanja krutih čestica. U slučaju kada čestice na površinu ispitnog uzorka padaju pod ostrim kutem (do 30°) govorimo abrazivnoj eroziji.

U radu treba:

- opisati mehanizme trošenja uslijed erozije česticama,
- povezati određena svojstva materijala s erozijskim trošenjem, bilo udarnim (oko 90°) ili abrazivnim mehanizmom (do 30°),
- povezati različite postupke toplinske obrade čelika X155CrVMo12-1 (prema dostupnoj literaturi) s očekivanim ponašanjem uslijed abrazivne erozije i pojasniti tu međuovisnost,
- na različito toplinski obrađenim uzorcima čelika X155CrVMo12-1 obaviti ispitivanja otpornosti na abrazivnu eroziju primjenom kvarcnog pijeska,
- obaviti karakterizaciju erodiranih površina,
- analizirati dobivene rezultate.

Zadatak zadan:  
11. studenog 2013.

Rok predaje rada:  
1. rok: 21. veljače 2014.  
2. rok: 12. rujna 2014.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 3., 4. i 5. ožujka 2014.  
2. rok: 22., 23. i 24. rujna 2014.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Čajner

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA .....	II
POPIS OZNAKA.....	III
SAŽETAK.....	IV
1. TEORIJSKI DIO .....	1
1.1. UVOD.....	1
1.2. ABRAZIVNA EROZIJA ČESTICAMA.....	1
1.2.1. Općenito .....	1
1.2.2. Utjecaj brzine udara čestice .....	2
1.2.3. Utjecaj kuta udara čestice .....	2
1.2.4. Utjecaj veličine čestice .....	4
1.2.5. Utjecaj oblika čestice.....	4
1.2.6. Utjecaj temperature .....	5
1.3. VISOKOLEGIRANI ALATNI ČELICI ZA HLADNI RAD.....	6
1.3.1. Sferoidizacijsko žarenje .....	6
1.3.2. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja .....	7
1.3.3. Kaljenje .....	8
1.3.4. Popuštanje.....	11
1.3.4.1. Procesi pri popuštanju.....	12
1.3.4.2. Sekundarno otvrdnuće .....	13
1.3.5. Duboko hlađenje .....	14
2. EKSPERIMENTALNI DIO .....	18
2.1. CILJ ISTRAŽIVANJA .....	18
2.2. PLAN POKUSA.....	18
2.3. ISPITIVANI MATERIJAL.....	20
2.4. TOPLINSKA OBRADA UZORAKA .....	21
2.5. TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA .....	22
2.6. REZULTATI ISPITIVANJA .....	25
2.7. ANALIZA REZULTATA .....	27
3. ZAKLJUČAK.....	28
4. LITERATURA.....	29

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Jedinični događaj abrazije [2] .....	2
Slika 2. Utjecaj kuta udara čestice na erozijsko trošenje [3] .....	3
Slika 3. Mogući mehanizmi erozije: a) abrazija pri malim kutevima, b) umor površine pri malim brzinama i velikim kutevima, c) višestruka plastična deformacija ili krhki lom pri srednjim brzinama i velikim kutevima, d) taljenje površine uslijed velikih brzina udara [3] .....	3
Slika 4. Ovisnost trošenja o veličini čestica [5] .....	4
Slika 5. Utjecaj oblika čestice na brzinu erozije [2] .....	5
Slika 6. Utjecaj temperature na eroziju nehrđajućeg čelika [3] .....	5
Slika 7. Različiti postupci sferoidizacije čelika s 12 %Cr, a) klasični postupak, b) modificirani postupak, c) izotermičko žarenje [6] .....	7
Slika 8. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja čelika s 12 %Cr [6] .....	8
Slika 9. Postupak kaljenja nekog podeutektoidnog čelika [7] .....	9
Slika 10. Pojednostavnjeni pseudobinarni dijagram stanja Fe-Cr-C za čelik s 12 %Cr [6] .....	9
Slika 11. Volumenski udjeli faza i zakaljenost čelika X155CrVMo12-1 u ovisnosti o temperaturi austenitizacije [6] .....	10
Slika 12. Ovisnost temperatura početka i završetka stvaranja martenzita (M) o temperaturi austenitizacije čelika X155CrVMo12-1 [6] .....	11
Slika 13. Krivulje popuštanja različitih vrsta čelika [10] .....	14
Slika 14. Uptonov dijagram .....	14
Slika 15. Utjecaj duljine trajanja dubokog hlađenja na broj $\eta$ -karbida za uzorke gašene s različitih temperatura austenitizacije [12] .....	16
Slika 16. Utjecaj broja karbida na brzinu trošenja [12] .....	16
Slika 17. Skica izrade ispitnih uzoraka .....	20
Slika 18. Toplinska obrada ispitnih uzoraka .....	21
Slika 19. Uređaj za ispitivanje u Laboratoriju za tribologiju FSB-a .....	22
Slika 20. Shematski prikaz rada uređaja za tribološka ispitivanja .....	23
Slika 21. Erodent korišten u ispitivanju .....	24
Slika 22. Vaga METLER B5C 1000 za precizno mjerenje gubitka mase pri tribološkim ispitivanjima....	24
Slika 23. Tvrdće uzoraka .....	25
Slika 24. Prosječni gubici mase .....	26
Slika 25. Regresijska funkcija ovisnosti gubitka mase o temperaturi popuštanja .....	26

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Plan pokusa .....	19
Tablica 2. Značenje oznaka ispitivanih uzoraka.....	20
Tablica 3. Kemijski sastav ispitivanog čelika.....	20
Tablica 4. Rezultati ispitivanja .....	25

**POPIS OZNAKA**

Oznaka ili kratica	Jedinica	Opis
Az		zaostali austenit
$F_N$	N	normalna sila
$F_T$	N	tangencijalna sila
HRC		tvrdća po Rockwellu
$m$	kg	masa
M''		sekundarni martenzit
Mf	°C	temperatura završetka stvaranja martenzita pri gašenju
Ms	°C	temperatura početka stvaranja martenzita pri gašenju
$t$	s	vrijeme
$\vartheta$	°C	temperatura
$\vartheta_a$	°C	temperatura austenitizacije
$\vartheta_p$	°C	temperatura popuštanja



## SAŽETAK

U ovom radu opisana je problematika trošenja alatnog čelika abrazivnom erozijom česticama. U prvom je dijelu opisana abrazivna erozija česticama te parametri koji utječu na erozijsko trošenje. Zatim je dan teorijski pregled toplinskih obrada kojima se u praksi najčešće podvrgavaju visokolegirani alatni čelici za hladni rad, s posebnim naglaskom na utjecaj tih toplinskih obrada na otpornost na trošenje.

U eksperimentalnom dijelu opisano je tribološko ispitivanje čelika X155CrVMo12-1 (AISI D2) abrazivnom erozijom česticama s kutem upada čestica od 30°. Ispitni uzorci su kaljeni sa dvije različite temperature austenitizacije, popušteni na dvjema različitim temperaturama popuštanja te je polovica uzoraka bila podvrgnuta dubokom hlađenju, dok druga polovica nije. Tako je dobiveno osam različitih skupina uzoraka. Statističkom obradom rezultata dobivenih ispitivanjem pokušalo se utvrditi na koji način različiti parametri toplinske obrade utječu na otpornost na trošenje.

## 1. TEORIJSKI DIO

### 1.1. UVOD

Gdje god postoji relativno gibanje dvaju tijela u kontaktu, postoji i trošenje, tj. gubitak materijala s površine krutog tijela. Posljedice toga mogu biti brojne – promjene dimenzija i oblika, smanjenje kvalitete površine, vibracije, zračnosti ili općenito smanjena sposobnost opreme da obavlja svoju funkciju.

Čelici koji su osobito izloženi trošenju su alatni čelici. Kalupi, štance, škare, rezni alati, alati za oblikovanje deformiranjem samo su neki od primjera alata koji su redovito izloženi površinski zahtjevnim uvjetima. Osim toga, alati trpe i velike sile i naprezanja zbog čega se od njih zahtijeva i visoka žilavost. Međutim, otpornost na trošenje i žilavost često su međusobno oprečna svojstva. Želi li se postići maksimalna otpornost na trošenje potrebno je žrtvovati žilavost i obrnuto. Stoga se različitim toplinskim obradama nastoji postići optimalan odnos tih svojstava.

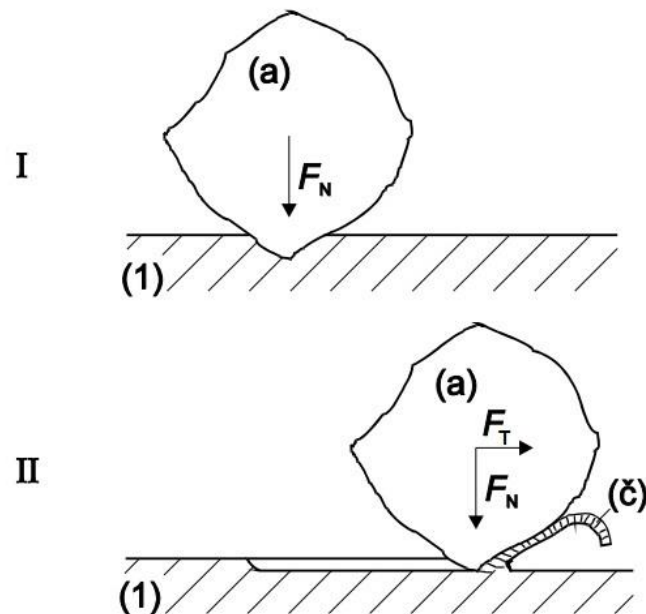
U ovom radu izabran je čelik X155CrVMo12-1 kao predstavnik visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad kako bi se utvrdio utjecaj različitih toplinskih obrada na otpornost na trošenje. Od posebnog je interesa duboko hlađenje čiji utjecaj na mikrostrukturu i svojstva čelika još uvijek nije u potpunosti istražen, no pokazalo se da pozitivno djeluje na otpornost na trošenje, produljujući vijek trajanja alata i do tri puta.

### 1.2. ABRAZIVNA EROZIJA ČESTICAMA

#### 1.2.1. *Općenito*

Erozija česticama je gubitak materijala s površine krutog tijela zbog relativnog gibanja fluida u kojem se nalaze krute čestice. Ako je to strujanje pod malim kutem u odnosu na površinu (do 30°), tada se radi o abrazivnoj eroziji. [1]

Abrazija se može opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice.



Slika 1. Jedinični događaj abrazije [2]

Slika 1 prikazuje dvije faze jediničnog događaja abrazije. U prvoj fazi (I) abraziv (a) prodire u materijal (1) pod djelovanjem normalne komponente opterećenja  $F_N$ . U drugoj fazi (II) dolazi do istiskivanja materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_T$ . [1]

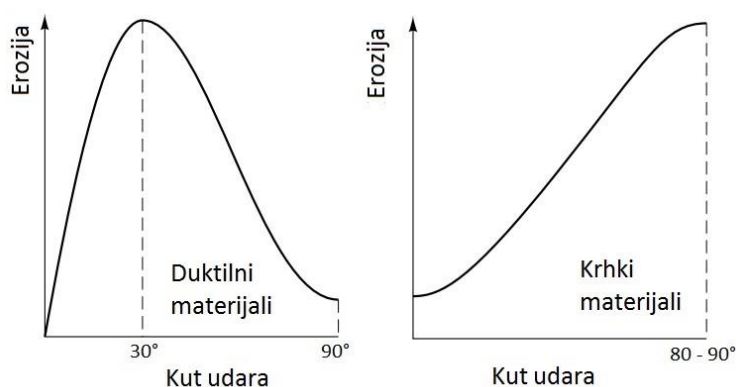
Najznačajniji faktori koji utječu na trošenje uslijed abrazivne erozije su brzina čestice, kut udara čestice, oblik čestice te omjer tvrdoće abraziva i površine.

### 1.2.2. Utjecaj brzine udara čestice

Brzina udara ima velik utjecaj na trošenje materijala. Ako je brzina mala, naprezanja pri udaru nisu dovoljna da izazovu plastičnu deformaciju te trošenje nastupa uslijed umora površine. Pri većim brzinama trošenje je izazvano višestrukom plastičnom deformacijom površine. Pri izrazito velikim brzinama može doći i do taljenja površine pri udaru. [3]

### 1.2.3. Utjecaj kuta udara čestice

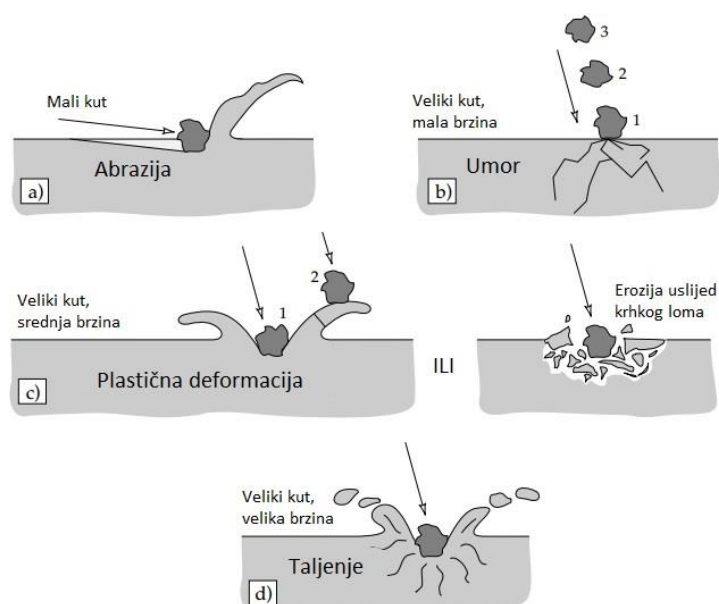
Slika 2 prikazuje utjecaj kuta udara čestice na erozijsko trošenje za duktilne i krhke materijale.



**Slika 2. Utjecaj kuta udara čestice na erozijsko trošenje [3]**

Pri manjim kutevima udara, kinetička energija čestice na površinu se prenosi u vidu plastične deformacije i rezanja dok se pri većim kutevima ona prenosi u vidu udarnog opterećenja. Kako duktilni materijali imaju višu plastičnu deformabilnost i lomnu žilavost, kod njih je erozija izraženija pri manjim kutevima udara, dok je kod krhkih materijala situacija obrnuta. [4]

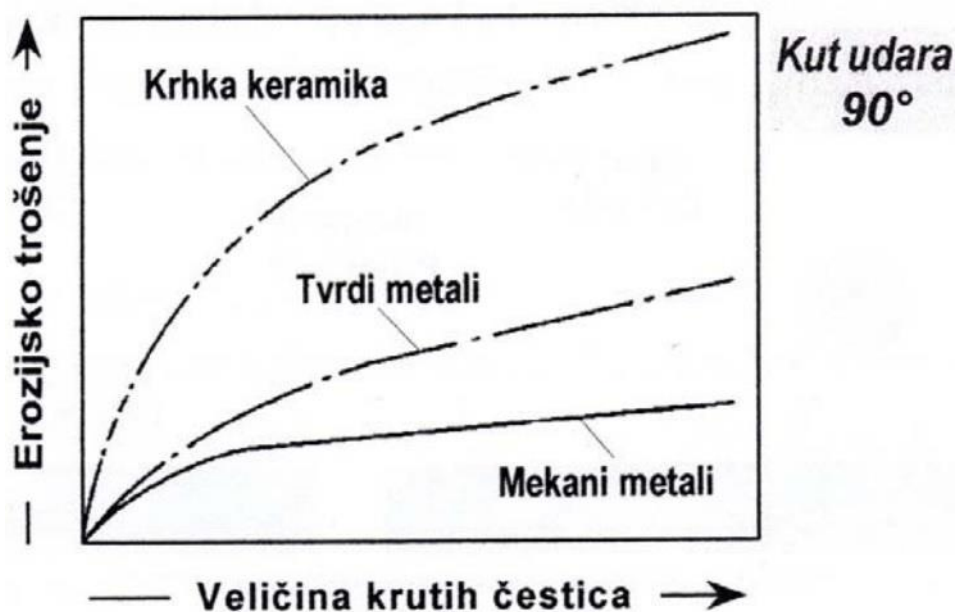
Na slici 3 prikazana je erozija pri različitim slučajevima brzina i kuteva udara čestice.



**Slika 3. Mogući mehanizmi erozije: a) abrazija pri malim kutevima, b) umor površine pri malim brzinama i velikim kutevima, c) višestruka plastična deformacija ili krhki lom pri srednjim brzinama i velikim kutevima, d) taljenje površine uslijed velikih brzina udara [3]**

#### 1.2.4. Utjecaj veličine čestice

Porastom veličine čestice raste i njena udarna energija što u konačnici rezultira intenzivnijim trošenjem. (slika 4). [5]

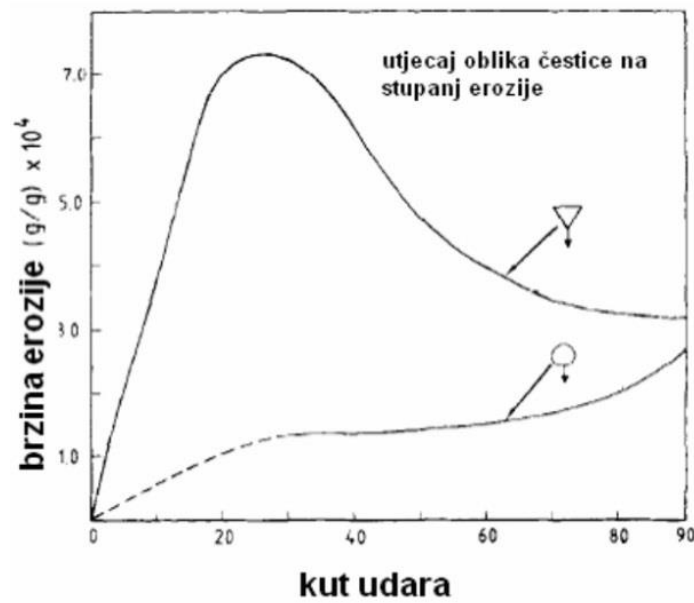


Slika 4. Ovisnost trošenja o veličini čestica [5]

Također je vidljivo da su krhki materijali podložniji povećanju erozijskog trošenja porastom čestica budući da su osjetljiviji na udarna opterećenja.

#### 1.2.5. Utjecaj oblika čestice

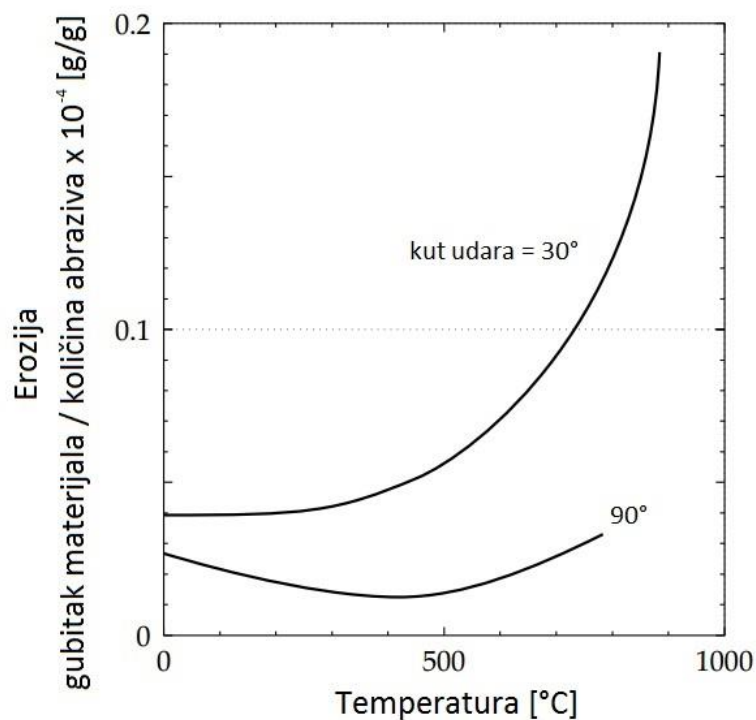
Na slici 5 vidi se da je erozija znatno intenzivnija ukoliko su čestice nepravilnog oblika. Razlika je izraženija pri manjim kutevima udara. Manji kutevi udara te oštri bridovi na česticama nepravilnog oblika pogoduju stvaranju efekta „oranja“ koji je zaslužan za plastičnu deformaciju i rezanje materijala.



Slika 5. Utjecaj oblika čestice na brzinu erozije [2]

### 1.2.6. Utjecaj temperature

Porastom temperature materijal postaje duktilniji pa zbog toga pada otpornost na abrazivnu eroziju. Na slici 6 prikazan je utjecaj temperature na eroziju nehrđajućeg čelika. [3]



Slika 6. Utjecaj temperature na eroziju nehrđajućeg čelika [3]

Ako se erozija odvija pri povišenim temperaturama u oksidirajućem mediju, trošenje može biti potpomognuto oksidacijom. Na površini se stvaraju relativno krhki oksidi te se erozija odvija brže nego što je to slučaj kod duktilnog metala. [3]

### 1.3. VISOKOLEGIRANI ALATNI ČELICI ZA HLADNI RAD

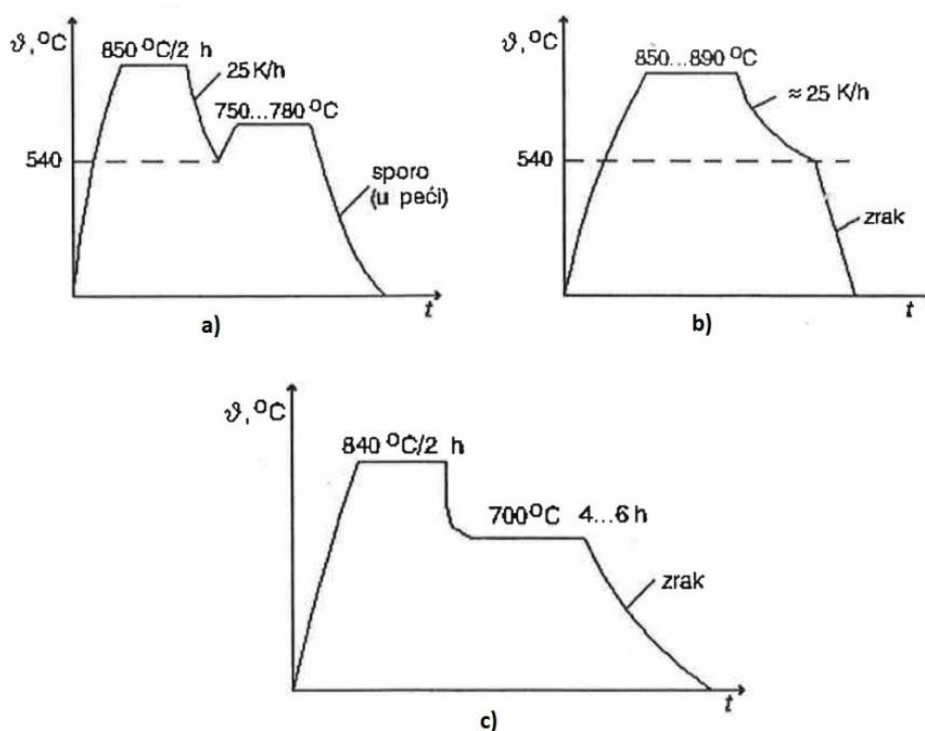
Visokolegirani alatni čelici za hladni rad su alatni čelici koji se primjenjuju do radnih temperatura od oko 200 °C. Glavni legirni element je krom kojeg ima više od 5 %, a osim kroma pojedini čelici mogu biti legirani vanadijem, molibdenom i volframom. Zbog prisutnosti kroma stvaraju se karbidi  $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  ili  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , ovisno o udjelu ugljika i kroma. [5]

Variranjem kemijskog sastava dobivaju se različita svojstva čelika. Povećanje masenog udjela kroma dovodi do višeg udjela slobodnih karbida što čeliku daje znatnu veću otpornost na trošenje, ali također povisuje potrebnu temperaturu austenitizacije. Povišenjem stupnja legiranosti i temperature austenitizacije, raste i udio zaostalog austenita u zakaljenoj mikrostrukturi što smanjuje deformacije nakon kaljenja. Niskim masenim udjelom ugljika te visokim udjelom kroma (> 13 %) postižu se opći uvjeti korozijske postojanosti čelika pa takav sastav daje martenzitni nehrđajući čelik velike otpornosti na koroziju u zakaljenom i popuštenom stanju, ali manje otpornosti na trošenje. [5, 6]

Alatni čelici primjenjuju se u toplinski obrađenom stanju. U nastavku slijedi pregled toplinskih obrada kojima se podvrgava čelik X155CrVMo12-1

#### 1.3.1. Sferoidizacijsko žarenje

Sferoidizacijsko (meko) žarenje je postupak ugrijavanja čelika na temperaturu oko  $A_1$ , duljeg držanja na toj temperaturi te vrlo sporog ohlađivanja. Takvo žarenje čeliku snižava tvrdoću i transformira karbide u kuglasti oblik te se provodi u svrhu povećanja svojstava obradljivosti odvajanjem čestica. Različiti postupci sferoidizacije čelika s 12 %Cr prikazani su na slici 7. [7]



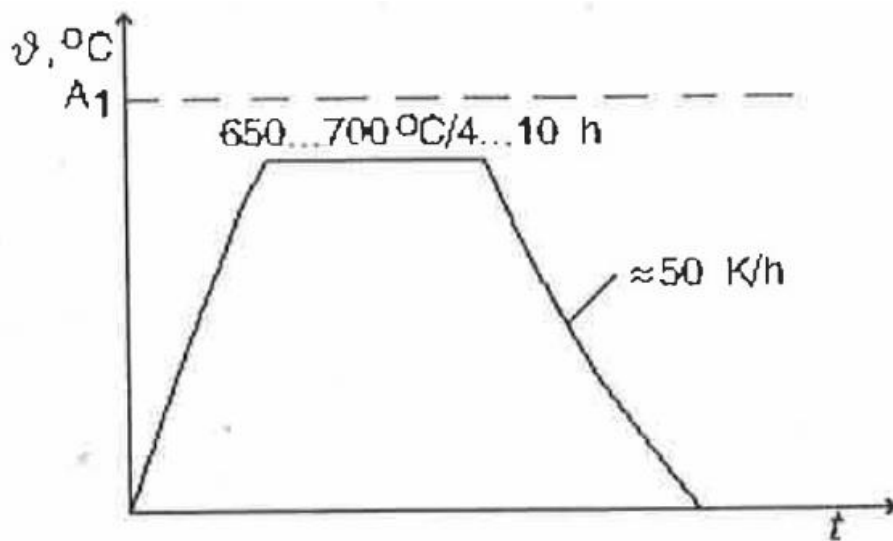
Slika 7. Različiti postupci sferoidizacije čelika s 12 %Cr, a) klasični postupak, b) modificirani postupak, c) izotermičko žarenje [6]

Čelik se nakon mehaničke obrade ponovo toplinski obrađuje kako bi mu se dala tražena eksploatacijska svojstva. [7]

### 1.3.2. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja izvodi se u svrhu razgradnje zaostalih naprezanja koja su unesena u materijal plastičnom deformacijom, obradom odvajanjem čestica ili toplinskim opterećenjima. Dijagram postupka ovakvog žarenja prikazan je na slici 8. [6, 7]





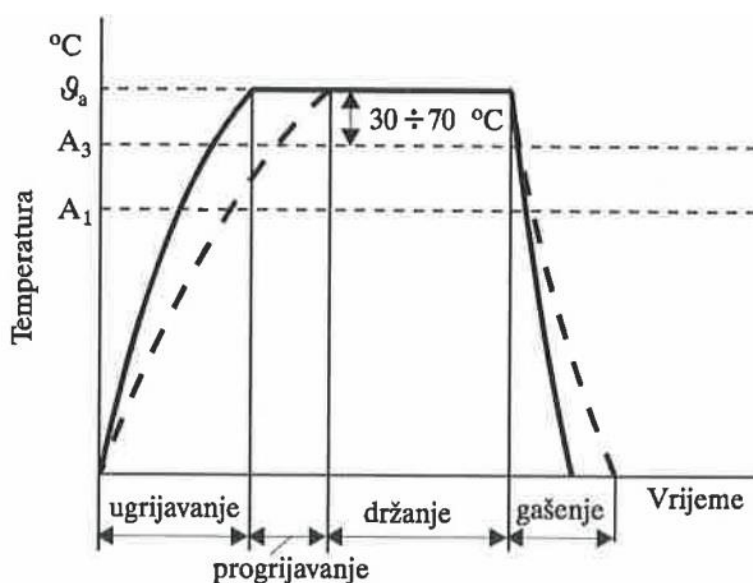
Slika 8. Žarenje za redukciju zaostalih napreznja čelika s 12 %Cr [6]

Kada se govori o alatnim čelicima, žarenje za redukciju zaostalih napreznja bitno je provesti prilikom izrade alata i kalupa koje treba bezdeformacijski kaliti. Kako se granica razvlačenja materijala snižava porastom temperature, postojanje zaostalih napreznja bi izazvalo deformacije alata pri nekom budućem ugrižavanju (npr. pri ugrižavanju na temperaturu austenitizacije). [6]

### 1.3.3. Kaljenje

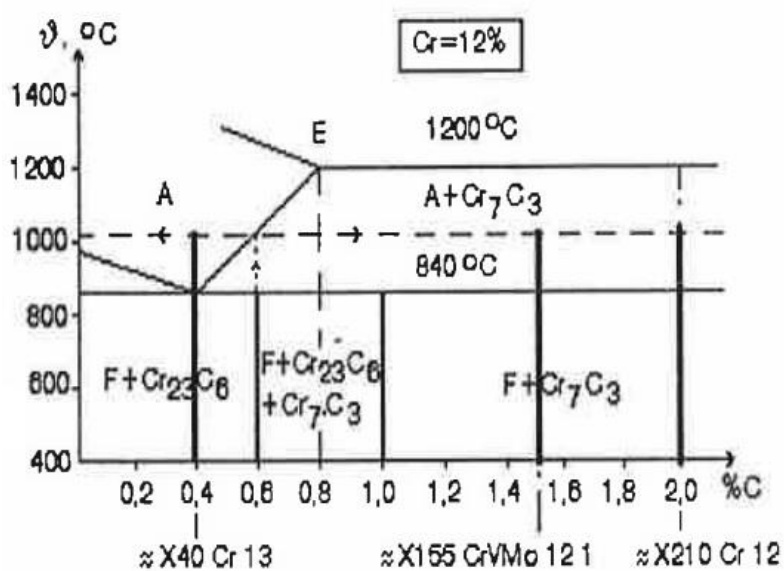
Kaljenje je postupak ugrižavanja čelika na temperaturu austenitizacije, držanja pri toj temperaturi u svrhu otapanja ugljika i legirnih elemenata u austenitu te gašenja. Svrha je postizanje martenzitne mikrostrukture, a time i maksimalno moguće tvrdoće ovisno o udjelu ugljika u čeliku. [7]

Na slici 9 prikazan je postupak kaljenja nekog podeutektoidnog čelika.



Slika 9. Postupak kaljenja nekog podutektoidnog čelika [7]

Temperaturu austenitizacije treba izabrati tako da se austenitu omogući otapanje 0,5...0,6 %C. Iz pseudobinarnog dijagrama (slika 10) se vidi da će se takav udio ugljika otopiti u austenitu pri temperaturi od oko 1000 °C. Prema Burnsovom dijagramu, 0,6 % je upravo onaj udio ugljika koju treba sadržavati martenzit da bi se postigla maksimalna tvrdoća [6]



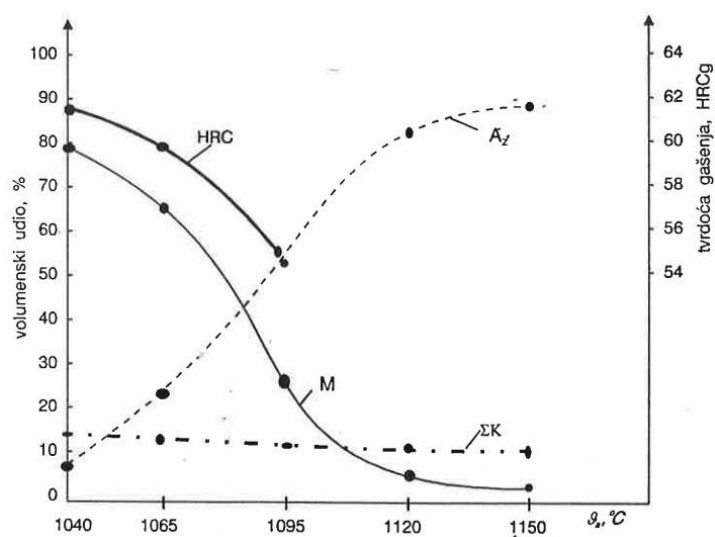
Slika 10. Pojednostavnjeni pseudobinarni dijagram stanja Fe-Cr-C za čelik s 12 %Cr [6]

Svrha držanja čelika na temperaturi austenitizacije je da se rastvore karbidi te da se ugljik iz tih karbida otopi u austenitu. Budući da ovi čelici sadrže razmjerno teško topive posebne karbide, držanje na temperaturi austenitizacije treba biti nešto duže nego što je to slučaj kod niže legiranih alatnih čelika (prosječno treba držati oko 20 minuta dulje). [6]

Zbog visoke legiranosti, čelik o kojem je riječ u ovom radu (X155CrVMo12-1) zakaljiv je već hlađenjem na zraku. Na primjer, hlađenjem na zraku blok dimenzija 75x150x250 mm austenitiziran na 1010 °C može se zakaliti na tvrdoću 62 do 64 HRC. Međutim, taj čelik ima sklonost pojavi martenzita po granicama zrna i pretvorbi unutrašnjosti tako opkoljenog zrna u bainit, što uzrokuje krhkost materijala. Zbog toga se preporuča gasiti taj čelik brzinom većom od 15 K/s. [6, 8]

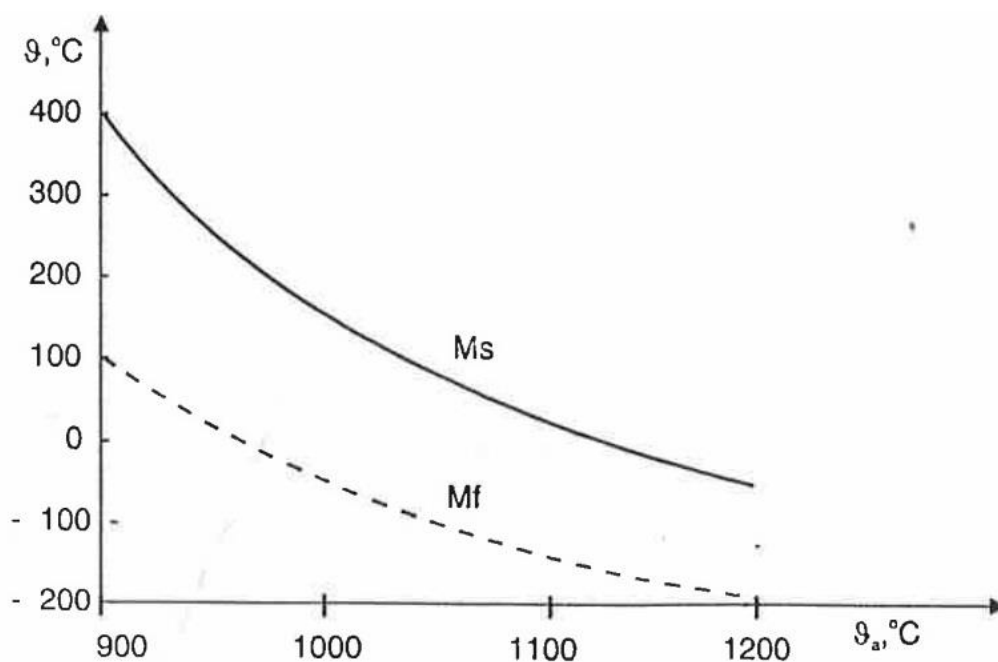
Na slici 11 prikazana je tvrdoća te udjeli faza u gašenoj strukturi (zaostali austenit, martenzit i neotopljeni karbidi) u ovisnosti od temperature austenitizacije.

Vidljivo je da porastom temperature austenitizacije raste udio zaostalog austenita dok udio martenzita i tvrdoća padaju.



Slika 11. Volumenski udjeli faza i zakaljenost čelika X155CrVMo12-1 u ovisnosti o temperaturi austenitizacije [6]

Čelik X155CrVMo12-1 zahvaljujući vanadiju nije sklon porastu austenitnog zrna. Zbog toga ga je moguće kaliti sa 1100 °C što daje ~35 %  $A_2$  koji pri popuštanju pri  $v_p = 550$  °C daje karbide popuštanja i sekundarni martenzit što rezultira pojavom sekundarnog otvrdnuća. Uzrok povišenog udjela zaostalog austenita tumači se činjenicom da se porastom temperature austenitizacije snižavaju granice pretvorbe austenita u martenzit  $M_s$  i  $M_f$ . (slika 12) [6]



Slika 12. Ovisnost temperatura početka i završetka stvaranja martenzita (M) o temperaturi austenitizacije čelika X155CrVMo12-1 [6]

S dijagrama je također vidljivo da će za temperature austenitizacije niže od 1050 °C pri dubokom hlađenju zadovoljiti smjesa alkohola i suhog leda koje se daju rashladiti do -75 °C, dok bi čelik austenitiziran na više od 1050 °C trebalo duboko hladiti u tekućem dušiku (-196 °C). [6]

#### 1.3.4. Popuštanje

Popuštanje je postupak ugrijavanja kaljenog čelika na neku temperaturu ispod  $A_1$  u svrhu povišenja žilavosti martenzita postignutog kaljenjem, sniženja zaostalih naprezanja

martenzita te postizanja dimenzijske postojanosti. Popuštanjem se također snizuje tvrdoća, ali to nije cilj nego nužna (neželjena) posljedica. [7]

Prema temperaturi, postupci popuštanja dijele se na:

- niskotemperaturno popuštanje ( $v_p < 220 \text{ °C}$ );
- visokotemperaturno popuštanje ( $400 \text{ °C} < v_p < A_1$ )

Ugrijavanjem martenzita na temperaturu popuštanja omogućuje se difuzija atoma ugljika kroz kristalnu rešetku. Kada se čelik nalazi u gašenom stanju, on ima rešetku martenzita koja je karakterizirana visokim stupnjem tetragonalnosti ( $\frac{c}{a} > 1$ ). Pri popuštanju, a zbog difuzije atoma ugljika, u nekim jediničnim ćelijama kristalne rešetke dolazi do sniženja stupnja tetragonalnosti jer se atom ugljika smješta na povoljnije mjesto, dok u drugim ćelijama stupanj tetragonalnosti poprima vrijednost 1 jer atom ugljika izlazi iz rešetke. [7]

#### 1.3.4.1. *Procesi pri popuštanju*

Popuštanje se odvija u nekoliko tzv. stadija koje karakteriziraju različite mikrostrukturne promjene.

##### 1. stadij popuštanja (do $v_p = 220 \text{ °C}$ )

Dolazi do stvaranja prijelaznog  $\epsilon$  karbida (prosječnog sastava  $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ ). Time je martenzit osiromašio na ugljiku pa se snizuje stupanj tetragonalnosti. Također dolazi do smanjenja volumena obrađivanog predmeta. [9, 10]

##### 2. stadij popuštanja (200...320 °C za nelegirane čelike, 200..375 °C za legirane čelike)

U ovom stadiju dolazi do tzv. pojave „krhkosti 300“. Točan uzrok te pojave nije poznat, ali čini se da glavnu ulogu ima stvaranje cementita  $\text{Fe}_3\text{C}$  te (kod visokougličnih čelika) posebni oblik izlučivanja Fe-karbida. Zbog opasnosti od ove pojave to se područje popuštanja u praksi izbjegava. [9]

### 3. stadij popuštanja (320...520 °C)

Dolazi do intenzivnog stvaranja  $Fe_3C$ . Tvrdća znatno opada ako ne postoji visok udio karbidotvoraca. [9]

### 4. stadij popuštanja ( $v_p > 550$ °C)

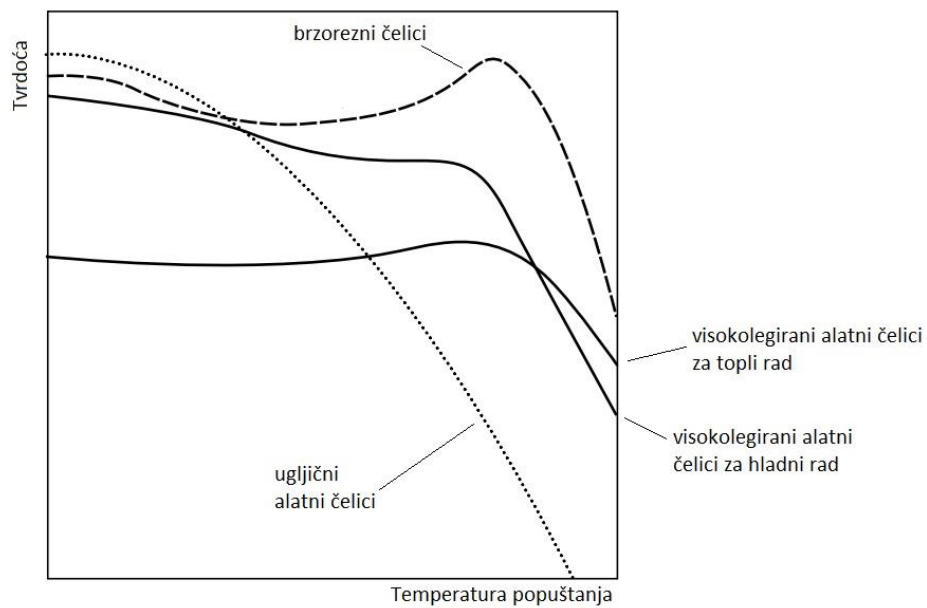
Na tim temperaturama počinju rasti čestice ranije stvorenog  $Fe_3C$ . Kod čelika s visokim sadržajem karbidotvoraca stvaraju se legirani cementit i posebni karbidi. Ovo je stvaranje povezano i s porastom tvrdoće (sekundarno otvrdnuće). Također dolazi i do porasta volumena. [9]

#### 1.3.4.2. Sekundarno otvrdnuće

Visokolegirani čelici koji sadrže V, W ili Mo nakon gašenja imaju strukturu martenzita s većim udjelom visokolegiranog zaostalog austenita (20 do 40 %), a eventualno i neki udio neotopljenih karbida. Pri popuštanju oko 550 °C doći će do kondicioniranja zaostalog austenita te će iz njega precipitirati atomi legirajućih elemenata i otopljenog ugljika koji tvore karbide popuštanja. Snižanjem udjela legirajućih elemenata i ugljika u zaostalom austenitu dovodi do povišenja granice početka i završetka pretvorbe u martenzit ( $M_s$  i  $M_f$ ). Zbog toga se hlađenjem sa temperature popuštanja austenit pretvara u martenzit koji se naziva sekundarni martenzit ( $M''$ ). [7, 9]

Tim procesom iz relativno mekane faze (austenita) nastaju dvije bitno tvrđe faze (karbid popuštanja i sekundarni martenzit) što dovodi do povećanja tvrdoće nakon takvog popuštanja. [7]

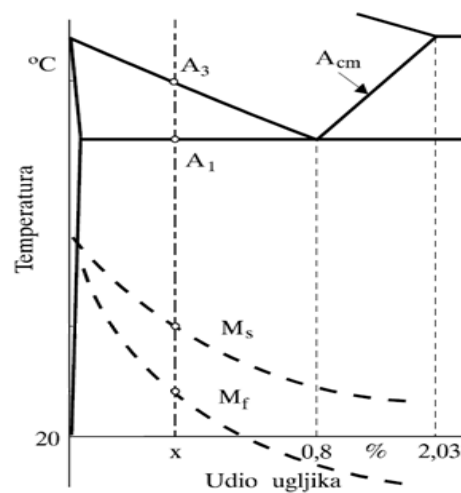
Slika 13 pokazuje krivulje popuštanja vrsta čelika na kojima je vidljiv porast tvrdoće pri višim temperaturama popuštanja.



Slika 13. Krivulje popuštanja različitih vrsta čelika [10]

### 1.3.5. Duboko hlađenje

Pri gašenju čelika često zaostaje neki udio zaostalog austenita koji se nije stigao pretvoriti u martenzit. To je posebice izraženo kod visokolegiranih alatnih čelika budući da svi legirni elementi (osim Co) snižuju granicu pretvorbe  $M_s$ . Povišenjem udjela ugljika također se snižuje  $M_s$ , kao što je vidljivo na Uptonovom dijagramu koji prikazuje utjecaj udjela ugljika na granice pretvorbe  $M_s$  i  $M_f$ . (slika 14)



Slika 14. Uptonov dijagram

Viši udjeli zaostalog austenita mogu nepoželjno djelovati u smislu:

- postupne sponatne transformacije u martenzit i pri 20 °C (prirodno starenje čelika), što bi moglo izazvati promjenu dimenzija i povisiti krhkost;
- transformacije u tzv. deformacijski martenzit pod djelovanjem visokih lokalnih tlakova (npr. na oštirci reznog alata, na boku zuba zupčanika itd.). To bi uzrokovalo lokalnu krhkost, pojavu pukotina i okrhavanje. [9]

Zaostali austenit može se eliminirati (osim popuštanjem) ohlađivanjem gašenog proizvoda na temperaturu ispod granice  $M_f$ , tj. provođenjem postupka dubokog hlađenja. U praksi se to ostvaruje ohlađivanjem u smjesi suhog leda ( $CO_2$ ) i alkohola ili u tekućem dušiku (do -196 °C).

Prema [11], brojna su istraživanja pokazala da duboko hlađenje značajno povisuje otpornost čelika na trošenje. Također se poboljšava dimenzijska stabilnost te se smanjuju zaostala naprezanja. Sve to produljuje životni vijek proizvoda izrađenih od duboko hlađenih alatnih čelika.

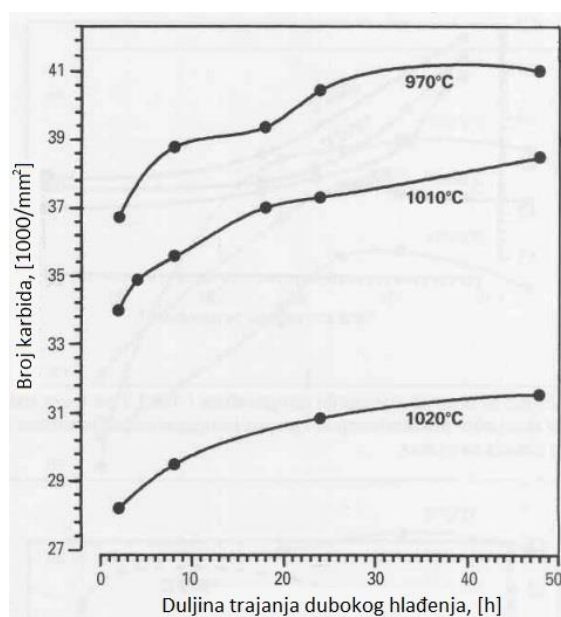
Tijekom dubokog hlađenja čelika odvijaju se dva procesa:

- eliminacija zaostalog austenita, što rezultira povećanom tvrdoćom;
- kondicioniranje martenzita, čime se stvaraju uvjeti nastanka finih  $\eta$ -karbida pri narednom popuštanju [12]

Duboko hlađenje odvija se u nekoliko stadija. U prvom stadiju do -130 °C dolazi do transformacije zaostalog austenita u martenzit (koji nije jednak primarnom martenzitu koji nastaje gašenjem). U drugom stadiju, na -196 °C, započinje raspadanje primarnog martenzita. Tijekom tog stadija dolazi do nukleacije velikog broja fino raspršenih karbida nanometarskih dimenzija. Neka istraživanja navode da tijekom naknadnog popuštanja dolazi do formiranja i precipitacije finih  $\eta$ -karbida. [13]

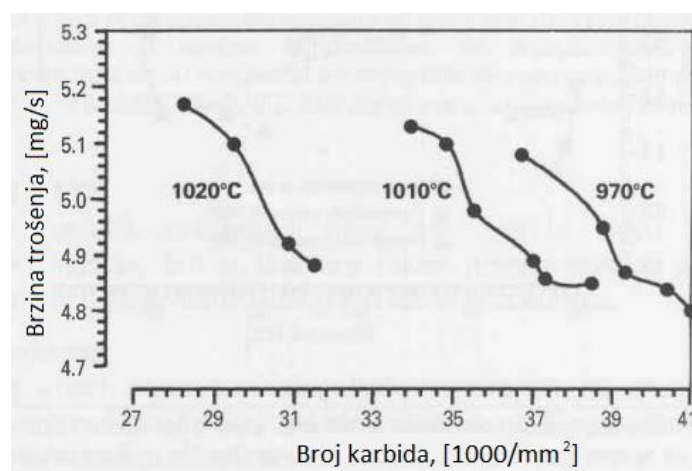
Smatra se da su upravo  $\eta$ -karbidi zaslužni za povećanje otpornosti na trošenje. Broj  $\eta$ -karbida ovisi o duljini trajanja dubokog hlađenja i temperaturi austenitizacije. (slika 15).





**Slika 15. Utjecaj duljine trajanja dubokog hlađenja na broj  $\eta$ -karbida za uzorke gašene s različitim temperatura austenitizacije [12]**

Do formiranja precipitata dolazi samo raspadom primarnog martenzita [13]. To znači da ukoliko se čelik kali s nižih temperatura austenitizacije, dobiva se više primarnog martenzita (prema slici 12) što rezultira većim brojem  $\eta$ -karbida. Slika 16 prikazuje utjecaj broja karbida na brzinu trošenja za AISI D2 alatni čelik gašen s različitim temperatura austenitizacije.



**Slika 16. Utjecaj broja karbida na brzinu trošenja [12]**

Međutim, ovo tumačenje s  $\eta$ -karbidima treba uzeti s rezervom budući da još nije potvrđeno njihovo postojanje. Proces dubokog hlađenja još nije u potpunosti istražen pa se ne može sa sigurnošću tvrditi što se dešava s mikrostrukturom materijala.

## **2. EKSPERIMENTALNI DIO**

### **2.1. CILJ ISTRAŽIVANJA**

Provedena su tribološka ispitivanja visokolegiranog alatnog čelika za hladni rad X155CrVMo12-1 (AISI D2) kako bi se pokušalo utvrditi imaju li duboko hlađenje te popuštanje s različitih temperatura značajnog utjecaja na otpornost na trošenje, tj. abrazivnu eroziju česticama.

### **2.2. PLAN POKUSA**

Trideset dva uzorka nasumičnim su odabirom grupirana u parove kako bi se izbjeglo pojavljivanje uzastopne pogreške (ako je obrađivana ista vrsta uzorka jedan za drugim moguća pogreška će se pojaviti na svima, a da se ni ne primijeti u rezultatu).

Tablica 1. Plan pokusa

std	run	$v_a$	$v_p$	DH	Oznaka
30	1	1080	525	DA	<b>*12</b>
3	2	1020	190	NE	
17	3	1020	190	DA	<b>1</b>
23	4	1080	190	DA	<b>*1</b>
2	5	1020	190	NE	
28	6	1020	525	DA	<b>12</b>
4	7	1020	190	NE	
18	8	1020	190	DA	<b>1</b>
27	9	1020	525	DA	<b>12</b>
14	10	1080	525	NE	<b>*2</b>
21	11	1080	190	DA	<b>*1</b>
31	12	1080	525	DA	<b>*12</b>
16	13	1080	525	NE	<b>*2</b>
20	14	1020	190	DA	<b>1</b>
24	15	1080	190	DA	<b>*1</b>
6	16	1080	190	NE	<b>*</b>
25	17	1020	525	DA	<b>12</b>
10	18	1020	525	NE	<b>2</b>
32	19	1080	525	DA	<b>*12</b>
22	20	1080	190	DA	<b>*1</b>
15	21	1080	525	NE	<b>*2</b>
12	22	1020	525	NE	<b>2</b>
26	23	1020	525	DA	<b>12</b>
8	24	1080	190	NE	<b>*</b>
5	25	1080	190	NE	<b>*</b>
13	26	1080	525	NE	<b>*2</b>
7	27	1080	190	NE	<b>*</b>
9	28	1020	525	NE	<b>2</b>
1	29	1020	190	NE	
29	30	1080	525	DA	<b>*12</b>
19	31	1020	190	DA	<b>1</b>
11	32	1020	525	NE	<b>2</b>

U tablici 1 prikazani su uzorci s pripadajućim oznakama poredani po redosljedu ispitivanja. Pod oznakom std nalazi se redni broj uzorka prije nasumičnog odabira, oznaka run označava redosljed ispitivanja uzorka dok su  $v_a$ ,  $v_p$  i DH oznake za temperaturu austenitizacije, temperaturu popuštanja i duboko hlađenje.

U tablici 2 prikazano je značenje oznaka ispitivanih uzoraka. Uzorci su obrađeni sa dvije različite temperature austenizacije, dvije različite temperature popuštanja te je pola uzoraka duboko hlađeno dok pola nije. Dakle, ukupno osam različitih režima obrade.

Tablica 2. Značenje oznaka ispitivanih uzoraka

	Bez dubokog hlađenja		S dubokim hlađenjem	
	$\nu_{p_1} = 190\text{ }^\circ\text{C}$	$\nu_{p_2} = 525\text{ }^\circ\text{C}$	$\nu_{p_1} = 190\text{ }^\circ\text{C}$	$\nu_{p_2} = 525\text{ }^\circ\text{C}$
$\nu_{a_1} = 1020\text{ }^\circ\text{C}$		2	1	12
$\nu_{a_2} = 1080\text{ }^\circ\text{C}$	*	*2	*1	*12

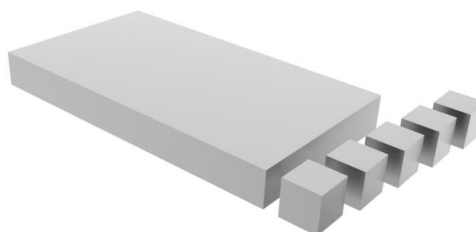
### 2.3. ISPITIVANI MATERIJAL

Kemijski sastav visokolegiranog čelika za hladni rad X155CrVMo12-1 prema specifikaciji proizvođača Böhler Edelstahl prikazan je u tablici 3, kako je ispitan u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Tablica 3. Kemijski sastav ispitivanog čelika

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu
1,56	0,3	0,31	0,021	0,0006	11,19	0,7	0,27	0,72	0,05

Čelik je isporučen u obliku ploče dimenzija 100 x 30 x 600 mm te su iz ploče izrezani prizmatični uzorci dimenzija 25 x 25 x 25 mm za daljnju obradu i predviđena ispitivanja (slika 17)



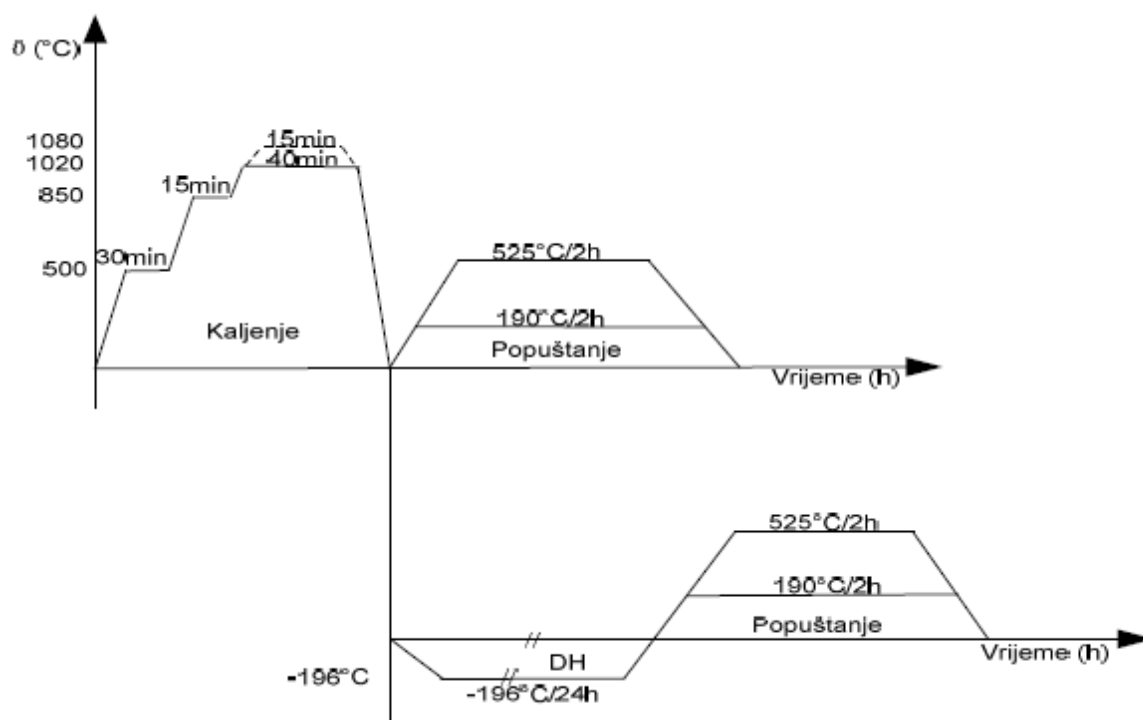
Slika 17. Skica izrade ispitnih uzoraka

## 2.4. TOPLINSKA OBRADA UZORAKA

Toplinska obrada uzoraka provedena je u Laboratoriju za toplinsku obradu na FSB-u. Najprije su uzorci predgrijavani na temperaturama 500 °C / 30 min i 850 °C / 15 min. Nakon toga su austenitizirani na odgovarajuće temperature austenitizacije, jedna polovina na 1020 °C / 40 min i druga polovina 1080 °C / 15 min.

Kaljenje je provedeno u vakuumskoj peći gdje je kao zaštita korišten vakuum s parametrima  $5 \times 10^{-3}$  bara do temperature 700 °C, a nakon toga  $10^{-1}$  bara radi bolje zaštite, budući da čelik sadrži legirne elemente osjetljive na isparivanje.

Nakon toga je dio uzoraka duboko hlađen u tekućem dušiku na -196 °C, dok se ostatak popušta u peći bez zaštitne atmosfere na temperaturama kako je predviđeno planom pokusa, 190 °C / 2 h i 525 °C / 2 h. Nakon 24 sata držanja na temperaturi dubokog hlađenja uzorci se vraćaju na temperaturu okoline te se i oni popuštaju prema planu pokusa. Na slici 18 dijagramom je prikazan cijeli proces toplinske obrade uzoraka.



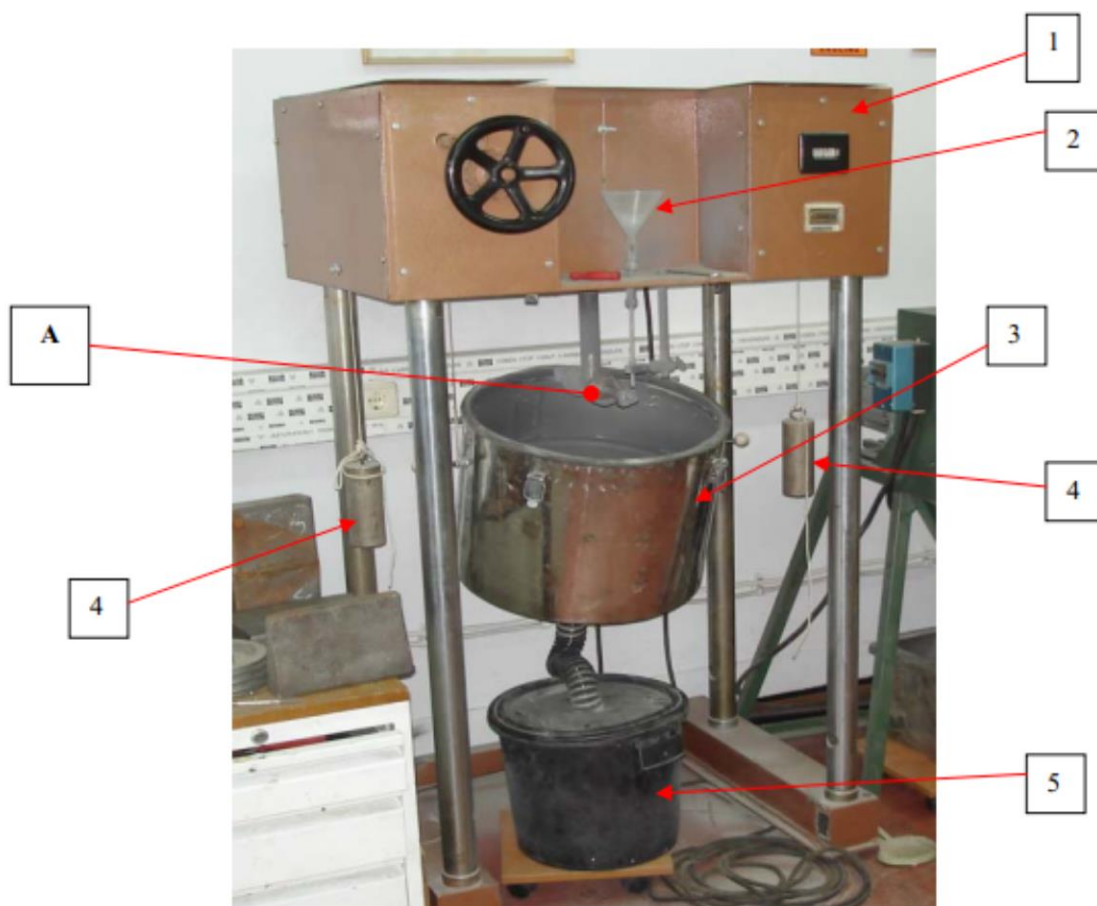
Slika 18. Toplinska obrada ispitnih uzoraka

## 2.5. TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA

Ispitivanje otpornosti na trošenje abrazivnom erozijom provedeno je u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Pri ovom ispitivanju erozivne čestice (suhi kvarcni pijesak) udaraju pod kutem  $30^\circ$  na površinu ispitnih uzoraka te izazivaju njihovo trošenje.

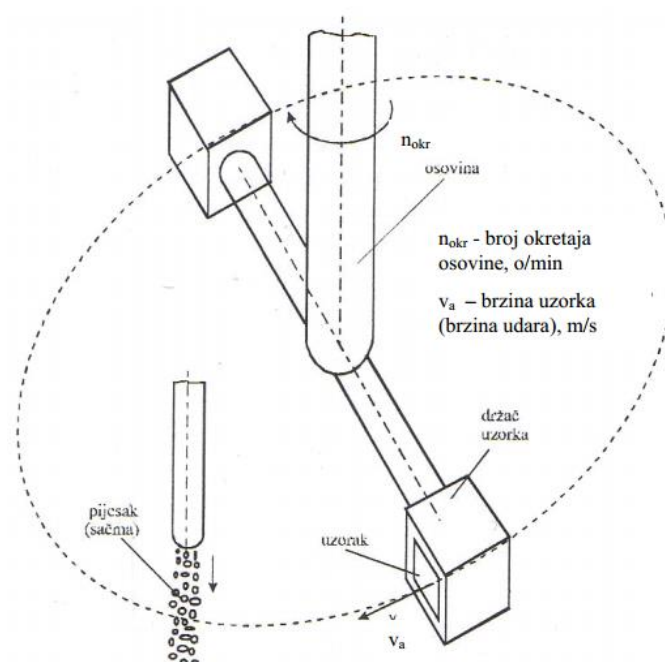
Uređaj funkcionira tako da pijesak istječe djelovanjem gravitacije preko dovodne cijevi iz spremnika, a uzorak rotira konstantnom brzinom te prolazi kroz mlaz pijeska, pri čemu pijesak udara u površinu te je troši. Fotografija uređaja iz Laboratorija za tribologiju prikazana je na slici 19, a na slici 20 prikazan je detalj A, tj. shematski prikaz rada uređaja.



Slika 19. Uređaj za ispitivanje u Laboratoriju za tribologiju FSB-a

Dijelovi uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju su sljedeći:

- 1 – kućište elektromotora sa prekidačima,
  - 2 – lijevak za dovod pijeska (erodenta),
  - 3 – zaštitni bubanj s odvodom pijeska,
  - 4 – utezi za pridržavanje bubnja,
  - 5 – spremnik već korištenog pijeska
- A – rotirajući dio u koji se stežu uzorci



**Slika 20. Shematski prikaz rada uređaja za tribološka ispitivanja**

Prije i poslije svakog ispitivanja na preciznoj vagi mjeri se masa svakog uzorka te se na osnovi gubitka mase donose zaključci o otpornosti na trošenje. Prije vaganja potrebno je očistiti uzorak u ultrazvučnoj kupci u smjesi alkohola i demineralizirane vode kako bi se uklonile sve nečistoće s površine uzorka.

Brzina uzorka određena je brojem okretaja elektromotora koji iznosi 1044 okretaja u minuti. Kao erodent korišten je suhi kvarcni pijesak s veličinom zrna 0,063-0,355 mm (slika 21).



Ispitivanje traje 15 minuta nakon čega se uzorak vadi iz uređaja za ispitivanje, čisti i važe na preciznoj vagi (slika 22).



Slika 21. Erodent korišten u ispitivanju



Slika 22. Vaga METLER B5C 1000 za precizno mjerenje gubitka mase pri tribološkim ispitivanjima.

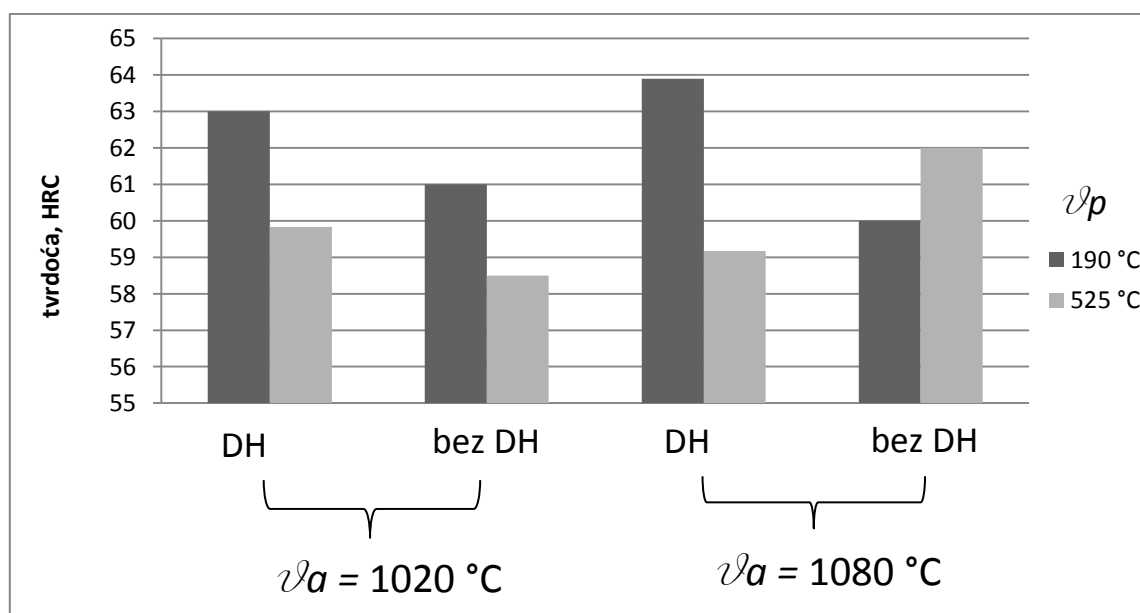
## 2.6. REZULTATI ISPITIVANJA

Mase uzoraka mjere se u gramima, u četiri decimale, a rezultati se izražavaju gubitkom mase. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4, a prosječni gubici mase dijagramski su prikazani na slici 24.

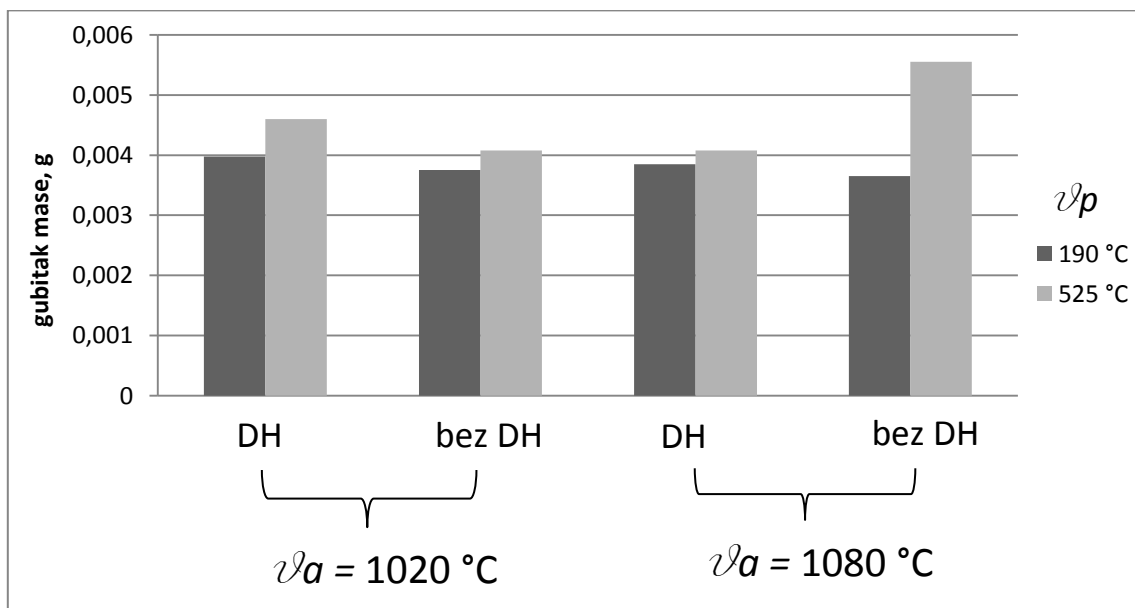
Na rezultatima gubitka mase provedena je statistička obrada te su rezultati prikazani na slici 25. U svrhu tumačenja postignutih rezultata ispitane su i tvrdoće, a rezultate prikazuje slika 23.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja

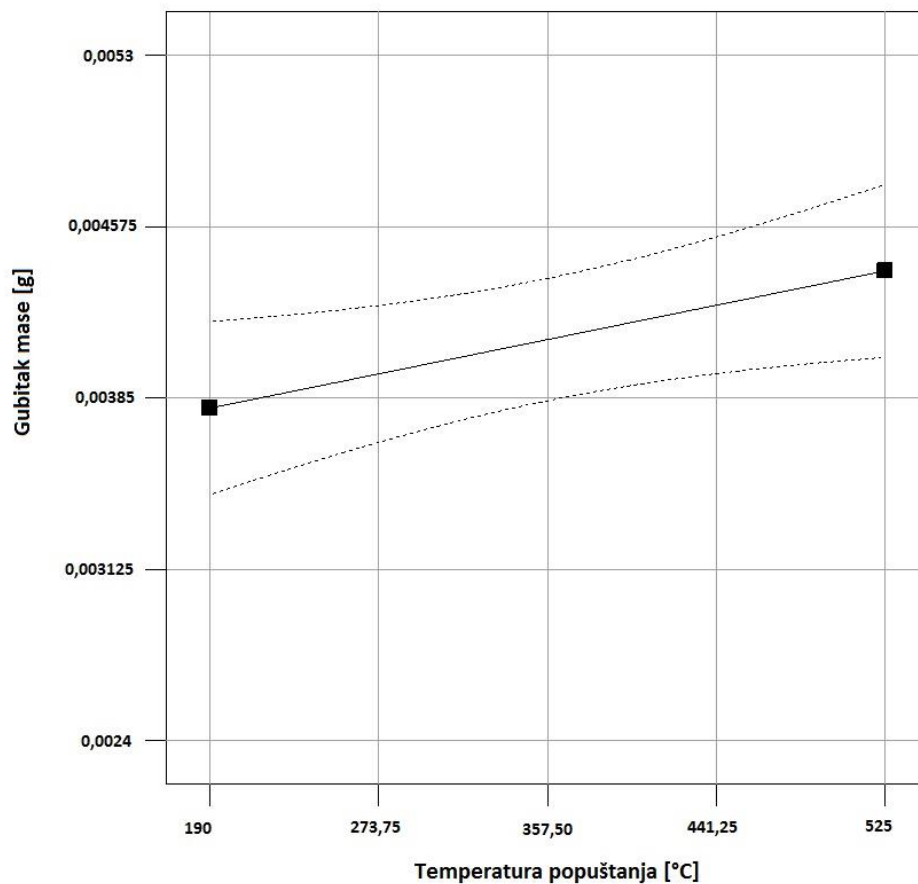
$\vartheta_a$ , °C	DH	$\vartheta_p$ , °C	gubitak mase, g				prosječni gubitak mase, g
			uzorak 1	uzorak 2	uzorak 3	uzorak 4	
1020	da	190	0,0035	0,0048	0,0040	0,0036	0,003975
		525	0,0043	0,0045	0,0045	0,0051	0,004600
	ne	190	0,0030	0,0045	0,0050	0,0025	0,003750
		525	0,0029	0,0052	0,0045	0,0037	0,004075
1080	da	190	0,0037	0,0034	0,0042	0,0041	0,003850
		525	0,0049	0,0046	0,0035	0,0033	0,004075
	ne	190	0,0038	0,0031	0,0045	0,0032	0,003650
		525	0,0080	0,0053	0,0038	0,0051	0,005550



Slika 23. Tvrdoće uzoraka



Slika 24. Prosječni gubici mase



Slika 25. Regresijska funkcija ovisnosti gubitka mase o temperaturi popuštanja

## 2.7. ANALIZA REZULTATA

Uočljivo je da visoko popušteni uzorci imaju manju tvrdoću od nisko popuštenih (osim u slučaju kaljenja s više temperature austenitizacije), slika 23. Unatoč tome što ispitivani čelik pokazuje otpornost na popuštanje, visokim popuštanjem pri 525 °C (u područje maksimalnog sekundarnog otvrdnuća) došlo je do sniženja tvrdoće u odnosu na nisko popuštanje, osim u slučaju visoke temperature austenitizacije (1080 °C) bez dubokog hlađenja kada je postignuta nešto viša tvrdoća (u odnosu na nisko popuštanje), a što bi se moglo pripisati sekundarnoj reakciji velike količine zaostalog austenita na temperaturi popuštanja.

Usporede li se tvrdoće duboko hlađenih uzoraka s tvrdoćama onih koji nisu duboko hlađeni, vidljivo je da duboko hlađeni uzorci imaju višu tvrdoću (osim u već opisanom slučaju primjene visoke temperature austenitizacije).

Provedenom statističnom analizom (analizom varijance, tj. statističkim F-testom) utvrđeno je da temperatura popuštanja značajno utječe na trošenje (gubitak mase). Višom temperaturom popuštanja dobiveni su veći gubici mase, tj. porastom temperature popuštanja pada otpornost na trošenje (slika 25 – regresijska funkcija ovisnosti gubitka mase o temperaturi popuštanja). Taj rezultat dobro korespondira s postignutim tvrdoćama (osim s već prije navedenom iznimkom primjene visoke temperature austenitizacije i visokog popuštanja).

Iako su dobiveni neznatno veći gubici masa u slučaju primjene dubokog hlađenja u odnosu na uzorke koji nisu bili duboko hlađeni (slika 24), statističkom analizom nije utvrđena njihova značajnost.

F-test je također pokazao da nema statistički značajne razlike u gubicima mase između uzoraka gašenih s različitim temperatura austenitizacije.

### 3. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata ispitivanja, uzimajući u obzir uvjete i režim ispitivanja, može se zaključiti:

- Visokotemperaturno popuštanje daje nižu tvrdoću čeliku X155CrVMo12-1 što rezultira slabijom otpornošću na trošenje. No to u praksi nije problematično budući da je to alatni čelik za hladni rad i kao takav nije ni predviđen za visokotemperaturno popuštanje.
- Duboko hlađenje i različite temperature austenitizacije nisu dale statistički značajne razlike u gubicima mase, tj. iz eksperimenta se ne može zaključiti utječu li temperatura austenitizacije i duboko hlađenje na otpornost na trošenje.
- Gubici mase dobiveni ovim ispitivanjem vrlo su mali (tisućinke grama), tj. ispitivanje nije imalo velik utjecaj na uzorke što objašnjava neznačajne razlike u gubicima mase. Kako bi se utvrdio utjecaj dubokog hlađenja i temperature austenitizacije na otpornost na trošenje, potrebno bi bilo provesti dodatna ispitivanja nekom drugom metodom, duljim vremenom trajanja ispitivanja i intenzivnijim trošenjem kako bi razlike među uzorcima postale izraženije te kako bi se utjecaj slučajnih faktora sveo na minimum.

#### 4. LITERATURA

- [1] Ivušić, V.: Tribologija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2] Grilec, K., Ivušić V.: Autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [3] Stachowiak, G.W., Bathchelor, A.W.: Engineering Tribology, University of Western Australia, Australia
- [4] Kumić, I.: Otpornost na eroziju česticama aluminij oksidne i aluminij nitridne keramike, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [5] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [6] Novosel, M., Cajner, F., Krumes, D.: Alatni materijali, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 1996.
- [7] Stupnišek, M., Cajner, F.: Osnove toplinske obradbe metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [8] Roberts, G., Krauss, G., Kenedy R.: Tool Steels: 5th edition, ASM International, 1998.
- [9] Krumes, D.: Toplinska obradba, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2000.
- [10] Totten, G.E.: Steel Treatment Handbook, Second Edition, Portland State University, Portland, Oregon, USA
- [11] Dasa, D., Dutta, A.K., Ray, K.K.: Correlation of microstructure with wear behaviour of deep cryogenically treated AISI D2 steel, *Wear* 276 (2009), p. 1371-1380
- [12] Collins, D.N., Dormer, J.: Deep Cryogenic Treatment of a D2 Cold-work Tool Steel, *Heat Treatment of Metals* 1997.3 p. 71-74
- [13] Šolić, S.: Utjecaj mikrostrukture brzoreznog čelika na tribološka svojstva reznih alata, doktorat, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.