

# Utjecaj pozicioniranja strojnih dijelova pri pougljičenju u krutim sredstvima na rezultate dubine pougljičenja

---

**Havidić, Goran**

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

**2018**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:057287>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**



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

*Repository / Repozitorij:*

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



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
SPECIJALISTIČKI STUDIJ STROJARSTVA

**Goran Haviđić**

**UTJECAJ POZICIONIRANJA DIJELOVA PRI POUGLJIČENJU U  
KRUTOM SREDSTVU NA REZULTATE DUBINE  
POUGLJIČENJA**

**ZAVRŠNI RAD**

Karlovac, 2018. Godina

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
SPECIJALISTIČKI STUDIJ STROJARSTVA

**Goran Haviđić**

**UTJECAJ POZICIONIRANJA DIJELOVA PRI POUGLJIČENJU U  
KRUTOM SREDSTVU NA REZULTATE DUBINE  
POUGLJIČENJA**

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:  
Tomislav Božić, dipl. ing.

Karlovac, 2018. Godina



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni / **specijalistički studij**: Strojarsstvo

Usmjerenje: Proizvodno strojarstvo

Karlovac, 23.02.2018.

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Goran Haviđić

Matični broj: 0111415044

**Naslov: Utjecaj pozicioniranja dijelova pri pougljičenju u krutom sredstvu na rezultate dubine pougljičenja**

.....  
Opis zadatka:

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

U teoretskom dijelu rada obraditi termodifuzijski proces pougljičenja u svim agregatnim sredstvima. Definirati uvjete ispitivanja kvalitete izvođenja procesa sukladno standardima i propisima.

Eksperimentalni dio rada izvoditi prema zadanom planu pokusa na više različitih materijala u različitim oblicima naprava za pripremu i izvođenje procesa pougljičenja u krutom sredstvu. Analizom dobivenih rezultata definirati uzroke eventualnih odstupanja i predložiti ispravan način provođenja procesa sa prijedlogom konstrukcije pomoćne naprave.

Rad izraditi sukladno pravilniku za izradu završnih radova VuKa.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

23.02.2018

23.03.2018

30.03.2018

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

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

Zahvaljujem se profesoru Tomislavu Božiću, dipl. ing. na mentorstvu i stručnoj pomoći tijekom izrade rada. Posebno bi se htio zahvaliti djelatnicima odjela toplinske obrade Adriadiesel d.d. Livojević Ivici i Golubić Dubravku, dipl. ing. na tehničkoj pomoći u izradi ovog rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji na podršci i motivaciji tijekom čitavog školovanja.

Goran Havičić

---

## SAŽETAK

Ovim završnim radom ispitan je utjecaj pozicioniranja strojnih dijelova pri pougljičenju u krutim sredstvima na dubine pougljičavanja. Korišteni materijal je čelik za cementiranje Č.1221, Č.4320, Č.5426 kao pokazatelj utjecaja kemijskog sastava i legirnih elemenata na dubinu pougljičenja.

U teorijskom dijelu dan je kratak pregled na proces toplinske obrade cementacije i metode ispitivanja.

Eksperimentalni dio obuhvatio je pripremu radnih komada, toplinsku obradu pougljičavanja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja i izvođenje mehaničkih ispitivanja s analizom dobivenih rezultata.

Analizom rezultata dobivenih mehaničkim ispitivanjem doneseni su zaključci kako utječe pozicioniranje strojnih dijelova na dubinu pougljičenja.

Ključne riječi:

Toplinska obrada cementiranje, dubina pougljičavanja, pozicioniranje strojnih dijelova, Č.1221, Č.4320, Č.5426

## SUMMARY

This thesis studies the influence of machine parts positioning at carburizing on the depth of carburizing, during pack carburizing. As an indicator of the impact of chemical composition and alloying elements of carburizing depth, carbon steel Č.1221 and alloy steels Č.4320 and Č.5426 were used.

The theoretical part gives a short overview of carburizing heat treatment and methods of testing.

The experimental part includes preparation of test samples, heat treatment by carburizing, quenching and low temperature tempering, testing of mechanical properties and finally analyzing the results.

The influence of machine parts positioning on the depth of carburizing was determined by analyzing the results obtained from mechanical tests.

Key words:

Heat treatment by carburizing, depth of carburizing, positioning of machine parts, Č.1221, Č. 4320, Č.5426

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. IZBOR POSTUPKA.....	3
3. SVOJSTVA DOBIVENIH SLOJEVA.....	4
3.1. Tribologija slojeva.....	6
3.1.1. Adhezijsko trošenje.....	7
3.1.2. Trošenje tribooksidacijom.....	8
3.1.3. Trošenje abrazijom.....	9
3.1.4. Trošenje razbijanjem površine udarcima.....	10
4. POSTUPAK CEMENTIRANJA.....	11
4.1. Pougličavanje.....	12
4.1.1. Pougličavanje u krutim sredstvima.....	17
4.1.2. Pougličavanje u solnim kupkama.....	18
4.1.3. Pougličavanje u plinskim atmosferama.....	19
4.1.3.1. Atmosfere na osnovi plina nosača.....	20
4.1.3.2. Atmosfere koje se dobe ukapljivanjem ugljikovodika.....	21
4.1.3.3. Pougličavanje pod pritiskom plinske atmosfere.....	21
4.1.4. Vakumsko pougličavanje.....	22
4.1.5. Plazma pougličavanje.....	22
5. KALJENJE.....	23
5.1. Popuštanje nakon kaljenja.....	27
6. ISPITIVANJE CEMENTIRANIH ČELIKA.....	28
6.1. Metoda po Rockwell – u.....	29
7. EKSPERIMENTALNI DIO.....	30
7.1. Plan pokusa.....	30
7.2. Ispitivanje tvrdoće površine i dubine pougličanja.....	35
7.3. Analiza rezultata.....	43
8. ZAKLJUČAK.....	48
9. LITERATURA.....	50

## POPIS SLIKA

Slika 1.1. Podjela postupaka za povećanje otpornosti na trošenje.....	1
Slika 3.1. Izlučene iglice željeznog nitrida Fe <sub>4</sub> N u difuznoj zoni.....	4
Slika 3.1.1. Parametri u procesu trošenja.....	6
Slika 3.1.1.1. Otpornost kliznih parova na adhezijsko trošenje.....	7
Slika 3.1.2.1. Otpornost na trošenje tribooksidacijom.....	8
Slika 3.1.3.1. Trošenje metodom brusnih papira.....	9
Slika 3.1.4.1. Trošenje pri razbijanju površine udarcima.....	10
Slika 4.1.1. Dijagram procesa pougljičavanja.....	12
Slika 4.1.2. Pougljičavanje legiranog Č.4320 i nelegiranog Č.1120 čelika.....	14
Slika 4.1.3. Krivulje pougljičavanja za različita vremena pougljičavanja.....	15
Slika 4.1.4. Zavisnost Dc o temperaturi i C – potencijalu.....	15
Slika 4.1.5. Utjecaj temperature na dubinu pougljičavanja.....	16
Slika 4.1.3.1. Odnos temperature kondenzacije i C – potencijala.....	19
Slika 4.1.3.1.1. Odnosi zraka i propana u smjesi.....	20
Slika 4.1.3.3.1. Tok postupka kod podpritiska.....	21
Slika 5.1. Stanje nakon pougljičavanja u Fe – C dijagramu.....	23
Slika 5.2. Kaljenje za tri različite temperature.....	24
Slika 5.3. Postupci toplinskih obrada poslije pougljičavanja.....	25
Slika 5.1.1. Ovisnost tvrdoće o temperaturi i trajanju popuštanja.....	27
Slika 6.1. Efektivna dubina cementiranog sloja.....	28
Slika 6.1.1. Penetrator u Rockwell metodi.....	29
Slika 6.1.2. Shematski prikaz HRC metode ispitivanja tvrdoće.....	29
Slika 7.1.1. Pripremljenje i označene epruvete.....	30
Slika 7.1.2. Korištene pripreme.....	31
Slika 7.1.3. Razmještaj epruveta u pripremi.....	31
Slika 7.1.4. Komorna peć.....	32
Slika 7.1.5. Kaljenje epruveta.....	32
Slika 7.1.6. Gašenje u vodi i solnoj kupki.....	32
Slika 7.1.7. Niskotemperaturno popuštanje.....	33
Slika 7.1.8. Visokobrzinsko rezanje epruveta.....	33
Slika 7.1.9. Polirka BUEHLER ECOMET 3.....	34
Slika 7.1.10. Izgled ispolirane površine.....	34
Slika 7.2.1. Uređaj za ispitivanje površinske tvrdoće po metodi Rockwell.....	35
Slika 7.2.2. Mjerni uređaj LEITZ WETZLAR MODEL DURIMET 2.....	36
Slika 7.3.1. Dijagram epruveta od čelika Č.1221.....	46
Slika 7.3.2. Dijagram epruveta od čelika Č.4320.....	46
Slika 7.3.3. Dijagram epruveta od čelika Č.5426.....	47
Slika 8.1. Dijagram srednje vrijednosti mikrotvrdoće okrugle pripreme.....	48
Slika 8.2. Skica prijedloga konstrukcije držača strojnih dijelova.....	49



## POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Najvažniji toplinsko – kemijski postupci.....	5
Tablica 4.1.1. Utjecaj legirnih elemenata.....	13
Tablica 7.1.1. Sastav odabranog čelika.....	30
Tablica 7.1.2. Oznake probnih uzoraka.....	30
Tablica 7.2.1. Površinska tvrdoća proba – HRC.....	35

## **POPIS PRILOGA**

Prilog 1. Informacija o sigurnosti proizvoda KG 6.2 – specifikacija korištenog granulata.

## 1. UVOD

Tehnološkim razvojem čovječanstva dolazi do sve složenijih naprava i konstrukcija koje zahtijevaju određena mehanička svojstva. Najrašireniji materijal je čelik (legura željeza i ugljika) od koje se traže i dobivaju raznom obradom razna svojstva. Postupak u kojem se predmet namjerno podvrgava temperaturno – vremenskim ciklusim kako bi se postigla željena (mehanička, fizička, kemijska...) svojstva se naziva Toplinska obrada. Tako danas imamo čitav niz postupaka toplinsko – kemijske obrade za povećanje otpornosti na trošenje. Njih dijelimo u dvije skupine – slika 1.1.:

- postupci koji mijenjaju postojeći površinski sloj metala
- postupci kod kojih se prevlaka dobiva nanošenjem ili izlučivanjem.

### NAJVAŽNIJI POSTUPCI ZA POVCANJE OTPORNOSTI NA TROŠENJE

MIJENJANJEM POVRŠINSKOG SLOJA:	NANOŠENJEM ILI IZLUČIVANJEM PREVLAKA:
MEHANIČKI -SAČMARENJE -VALJANJE	MEHANIČKI – PLATIRANJE
TOPLINSKI – KALJENJEM: - PLAMENO - INDUKCIJSKO - IMPULSNO - LASERSKO - SNOPOM ELEKTRONA	TOPLINSKI – TALJENJEM: - CINČANJE - NAVARIVANJE - SINTERIRANJEM: - LEGURE NA BAZI Ni – Mo - LEGURE NA BAZI Fe
TOPLINSKO – KEMIJSKI: - SA KALJENJEM - CEMENTIRANJE - KARBONITRIRANJE - EVENTUALNO SA NAKNADNIM KALJENJEM: - BORIRANJE - KROMIRANJE - VANADINIRANJE	MEHANIČKO TOPLINSKI: - PLATIRANJE - ŠPRICANJEM – METALI - TVRDI METALI
- BEZ KALJENJA: - NITRIRANJE - OKSIDIRANJE - SULFIDIRANJE	ELEKTRO – KEMIJSKI: - KATODNIM TALOŽENJEM: - KROMIRANJE - NIKLOVANJE - CINČANJE - DISPERZIJA Ni
	KEMIJSKI: - TALOŽENJEM BEZ STRUJE - NIKLOVANJE - NIKL+polikristalni dijamant - KEMIJSKOM REAKCIJOM - FOSFATIRANJE - TALOŽENJEM IZ PLINSKE FAZE - CVD - PVD

Slika 1.1. Podjela postupaka za povećanje otpornosti na trošenje.

Postupci koji mijenjaju postojeći površinski sloj metala se temelje na difuziji stranih elemenata u osnovni materijal. Tako dobivamo povećanje otpornosti na trošenje, a možemo utjecati i na svojstva osnovnog materijala i to uzimamo u obzir prilikom izbora postupka.

Kod postupaka gdje se prevlaka dobiva nanošenjem ili izlučivanjem, površinski sloj se stvara na polaznoj površini. Primijenju se različiti postupci koji se svrstavaju prema načinu nanošenja ili izlučivanja. Tako imamo toplinska prevlačenja, mehanička prevlačenja, kemijska – elektrokemijska prevlačenja ili u kombinaciji.

Dobivena mehanička svojstva su nam jako bitna zbog eksploatacije, a najvažnija od njih započinju na površini. Statička čvrstoća na savijanje proizlazi iz naprezanja koje je maksimalno na površini materijala. Trajan dinamička izdržljivost je vrlo ovisna o promjenama površinskog sloja.

Trajna statička čvrstoća određena je temperaturom, a bitna je zbog opteretivosti strojnog dijela i javljanja fenomena puzanja. Naprezanja nastala pri promjenjivoj temperaturi često nastupaju sa trošenjem, a tom prilikom ispitujemo čvrstoću pri promjenjivoj temperaturi.

Pri udarnom naprezanju važno svojstvo materijala je žilavost, a otpornost na koroziju ovisi o mediju i uvjetima u kojima strojni dio radi. Jako važno svojstvo je i održavanje točnosti dimenzija u tehnološkom pogledu, na koje različiti postupci imaju i različit utjecaj.

Kao tehnološki bitno svojstvo je i sposobnost oblikovanja i to obrada skidanjem čestica i oblikovanje deformacijom.

## 2. IZBOR POSTUPKA

Veliki broj postupaka toplinsko – kemijskih obrada i varijanti postupaka te različit utjecaj na svojstva osnovnog materijala zahtjeva određene kriterije prilikom izbora samog postupka. Pristup određivanju samog postupka je sistematski.

Kod promatranja određenog slučaja analiza štete predstavlja utvrđivanje uzroka štete. Prilikom toga uzima se u obzir korozija i toplinsko naprezanje koji su često iznad procesa trošenja. Ukoliko se ustanovi da je trošenje uzrok štete, cijeli proces postupka se podvrgava sistematskoj analizi s svim uzajecajnim veličinama da bi se ustanovili tribološki zahtjevi. Konstrukcije postavljaju zahtjeve vezane uz funkciju i eksploatacijska svojstva promatranog strojnog dijela. Tako se određuje potrebna debljina sloja otpornog na trošenje ovisno o očekivanom vijeku trajanja i uvjetima rada. Postavljaju se zahtjevi u pogledu estetike, mase, sigurnosti ili neki specifični zahtjevi vezani uz određeno područje upotrebe. Definiira se očekivani vijek trajanja i rada strojnog dijela koji je naveden u kriteriju neupotrebljivosti. Nakon temeljite analize poduzimaju se koraci da se donese alternativa za uklanjanje štete i produljenje vijeka dijelova.

Izbor postupka za stvaranje sloja otpornog na trošenje je sljedeći korak. Naročita pozornost se poklanja temperaturi kod koje se provodi postupak, vrijeme trajanja određenog postupka kao i način hlađenja sa temperature na kojoj se provodi postupak do temperature okoline. Ovi parametri, između ostalog, utječu i na svojstva osnovnog materijala.

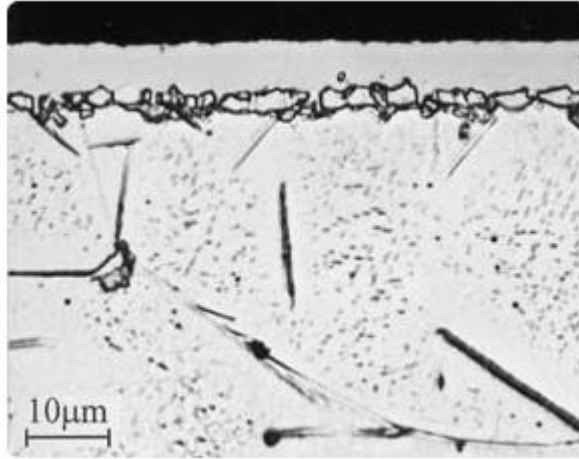
Određivanje svih potrebnih parametara dovodi do sljedećeg koraka a to je izbor jednog ili više postupaka toplinske obrade i analize mogućnosti izvođenja postupka. Ta analiza se provodi s ciljem utvrđivanja dimenzija dijelova, raspoloživu opremu i kapacitete, montažu ili demontažu i popravak na mjestu i sl. Tokom cijele te analize biran je podataka da li radimo u maloserijskoj ili velikoserijskoj proizvodnji. Ukoliko je riječ o velikoserijskoj proizvodnji preporuča se izvesti određen broj pokusa, ispitivanje postignutih slojeva i mogućnosti nastajanja škart proizvoda. Također se provjerava kompatibilnost izabranog sloja sa osnovnim materijalom da ne bi došlo do pada mehaničkih svojstava osnovnog materijala.

Sljedeći i završni korak u izboru postupaka je ekonomičnost primjene izabranog postupa, a pri tome se gledaju nastali troškovi stvaranja trošenju otpornog sloja. Najjeftiniji postupak se odabire kada je obrađivani predmet dostatan za svoju funkciju, a produženje vijeka trajanja donosi beznačajnu ekonomsku korist. Drugi slučaj je kada bi se morali odabrati drugi skuplji materijali jer osnovni materijal ne traje dovoljno dugo.

Ponekad se neke od faza i koraka preskaču jer su beznačajne. Ukoliko dobijemo skup ili negativan rezultat tada se vraćamo u nazad u koracima. Bitno je da se uzmu u obzir svi relevantni faktori i mogućnosti svih postojećih postupaka.

### 3. SVOJSTVA DOBIVENIH SLOJEVA

Svaka toplinsko – kemijska obrada daje određena svojstva i debljine slojeva, a to ovisi o vremenu trajanja postupka i o kvaliteti osnovnog materijala. Ukoliko je čelik legiran to se kod većine postupaka, uz isto vrijeme trajanja, dobije manja debljina sloja. Ti spojevi se teško ili ne nagrizaju travljenjem - (skidanje anorganskih nečistoća koje su čvrsto priljubljene uz površinu pomoću tekućih rastvora ), a na mikrosnimkama izgledaju kao kompaktne bijele zone – slika 3.1.



Slika 3.1. Izlučene iglice željeznog nitrida  $Fe_4N$  u difuznoj zoni.

To su zone spojeva i glavni su nosioci otpornosti na trošenje, a njihova duktilnost ovisi o fazama koje su u njima zastupljene. Kod većine postupaka ( osim kod boriranja, aluminiranja i siliciranja ) maksimalne debljine zona spojeva ne prelaze 20  $\mu m$ . Tablica 2.1. daje određene vrijednosti koje se postižu za pojedine postupke.

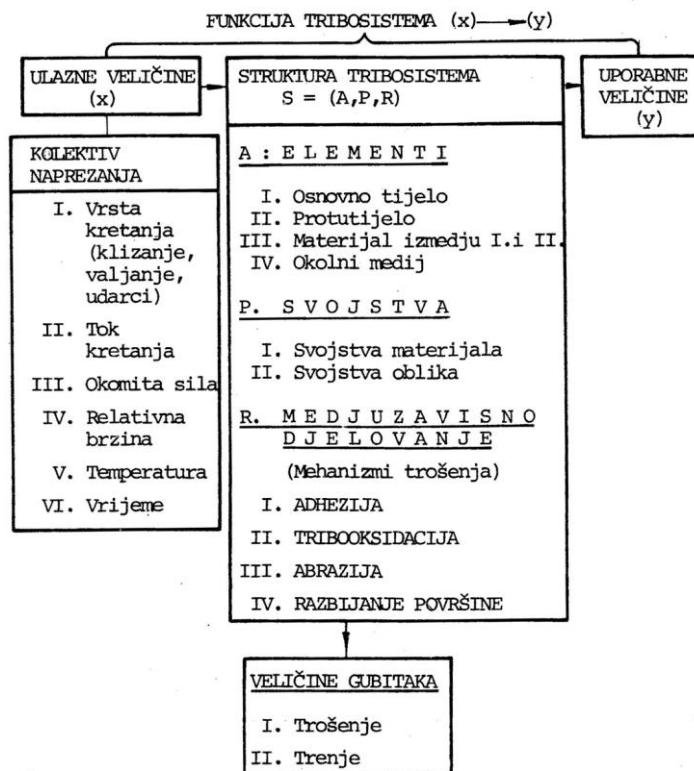
Iz tablice je vidljivo koji postupak daje maksimalnu, a koji minimalnu tvrdoću i do koje dubine. Profil toka tvrdoće od površine po dubini dobivenog sloja nam je jako važan za određivanje otpornosti na trošenje. Nakon cementacije ( efektivna dubina sloja do 3 mm) i karbonitriranja tvrdoća opada postepeno od površine prema jezgri. Isto tako je vidljiva i hrapavost, a primijećuje se da većina navedenih postupaka povećava hrapavost što je bitno kod podmazivanja određenih dijelova i samim time većeg trošenja.

POSTUPAK	ELEMENTI KOJI DIFUNDIRAJU	SREDSTVO	TEMPERATURA POSTUPKA °C	STRUKTURNE FAZE	DEBLJINA ZONE SPOJEVA $\mu\text{m}$	POVRŠINSKA TVRDOĆA $\text{HV}_{0,2}$	HRAPAVOST $R_z, \mu\text{m}$
CEMENTIRANJE	C	PLIN SOLNA KUPKA GRANULAT PASTA	850 - 1050	MARTENZIT + $\text{Fe}_3\text{C}$	-	700 - 1000	~ 1
KARBONITRIRANJE	C, N	PLIN PLAZMA SOLNA KUPKA	600 - 930	MARTENZIT + $\text{Fe}(\text{C}, \text{N})$	< 15	700 - 1000	~ 3
NITRIRANJE	N (C, O)	PLIN PLAZMA PRAŠAK SOLNA KUPKA	400 - 600	$\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ $\text{Fe}_4\text{N}$	< 20	450 - 1200	~ 3
SULFONITRIRANJE	N, S, (C, O)	SOLNA KUPKA	~570	$\text{FeS}$ $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ $\text{Fe}_4\text{N}$	< 20	350 - 600	~ 3
SULFIDIRANJE	S	SOLNA KUPKA	200 - 600	$\text{FeS}$	< 10	400	~ 8
BORIRANJE	B	PRAŠAK GRANULAT PASTA PLAZMA SOLNA KUPKA	850 - 1000	$\text{Fe}_2\text{B}$ ( $\text{FeB}$ )	10 - 350	1400 - 2200	~ 3
VANADIRANJE	V	PRAŠAK SOLNA KUPKA	1000 - 1100	VC $\text{V}_2\text{C}$	< 20	1800 - 2000	~ 5
DIFUZIONI KROMIRANJE	Cr	PLIN PRAŠAK SOLNA KUPKA	900 - 1200	MIJEŠANI KARBIDI Cr - Fe	< 50	1400 - 2000	
ALUMINIRANJE	Al	PLIN PRAŠAK SOLNA KUPKA	< 1200	INTERMETALNI SPOJ Fe - Al	< 1000	200 - 1200	
SILICIRANJE	Si	PRAŠAK	930 - 1200	INTERMETALNI SPOJ Fe - Si	< 250	-	

Tablica 2.1. Najvažniji toplinsko – kemijski postupci.

### 3.1. Tribologija slojeva

Tribološko ponašanje slojeva dobivenih toplinsko – kemijskom obradom je od bitnog značaja za određivanje trošenja materijala. Kako bismo odredili tribološko ponašanje dobivenih slojeva potrebno je provesti niz raznovrsnih triboloških pokusa. Ta ispitivanja se provode odvojeno za svaki specifični mehanizam trošenja. Analizom dobivenih pokusa utvrđujemo utjecaje ostalih relevantnih faktora u tribosistemu te konstantne vrijednosti nekih parametara, što nam omogućuje da uvidimo ovisnost pojedinih veličina jedne o drugoj – slika 3.1.1.

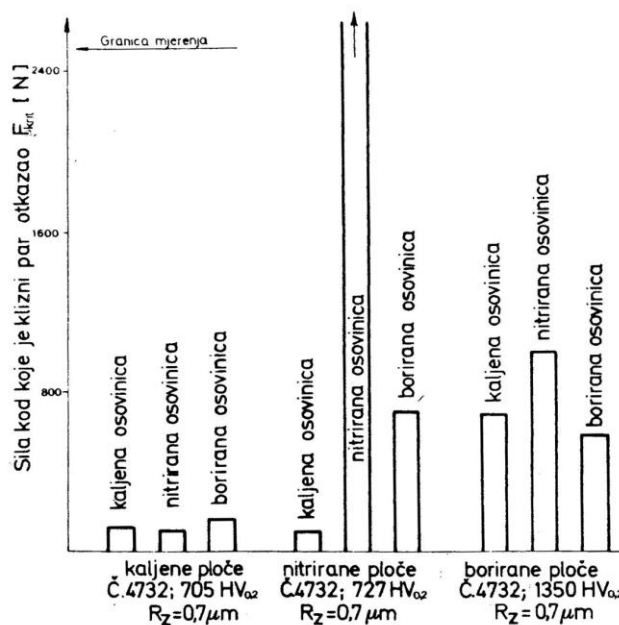


Slika 3.1.1. Parametri u procesu trošenja.



### 3.1.1. Adhezijsko trošenje

Adhezijsko trošenje (zaribavanje ili izjedanje) javlja se kada klizujući tarni par pri preopterećenju probije mazivi film, kao i adsorpcijski i reakcijski sloj. Tada dolazi do dodira između "golih" površina tarnog para a time i kritičnog trošenja površinskog sloja do otkazivanja. Ovakvih primjera u praksi ima dovoljno i provedeno je pokusno ispitivanje između osovine i rotirajuće ploče gdje je namjerno sila (opterećenje) povećavano do trenutka otkaza tarnog para – slika 3.1.1.1.



Slika 3.1.1.1. Otpornost kliznih parova na adhezijsko trošenje.

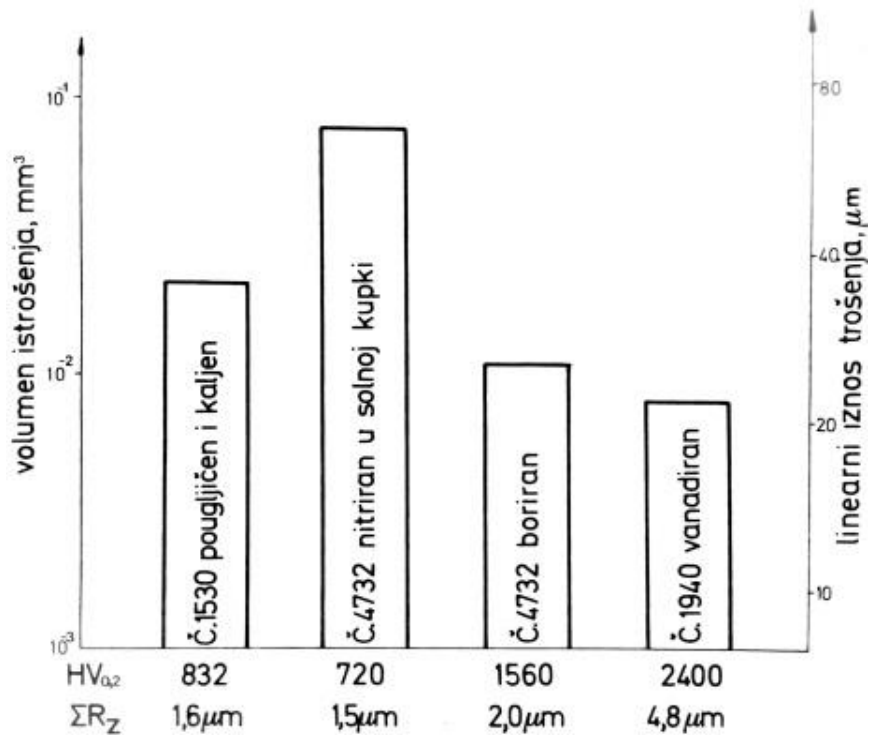
Ovim pokusom je uvrđena kritična sila kod koje je došlo do otkazivanja kliznog dijela a time i sparivanje dvaju slojeva.

Upotrebom različitih materijala u pokusu utvrđeno je da najveću otpornost na adhezijsko trošenje daje par nitrirane osovine i ploče. Nadalje slijedi par gdje je osovinica bila nitrirana a ploča borirana. Parovi sa kaljenim pločama su pokazali najmanju otpornost na adhezijsko trošenje i kod njih je došlo do prijenosa materijala s ploče na osovinu.

### 3.1.2. Trošenje tribooksidacijom

Glavni mehanizam trošenja kada imamo klizni i odvalni dio koji je tribološki napregnut u zraku, bez podmazivanja, naziva se tribooksidacija. Odlikuje se stvaranjem reakcijskih slojeva koji u mnogo slučajeva ograničavaju adheziju. Provedbom pokusa utvrđeno je da borirani i vanadinirani klizni parovi imaju najniži iznos trošenja – slika 3.1.2.1.

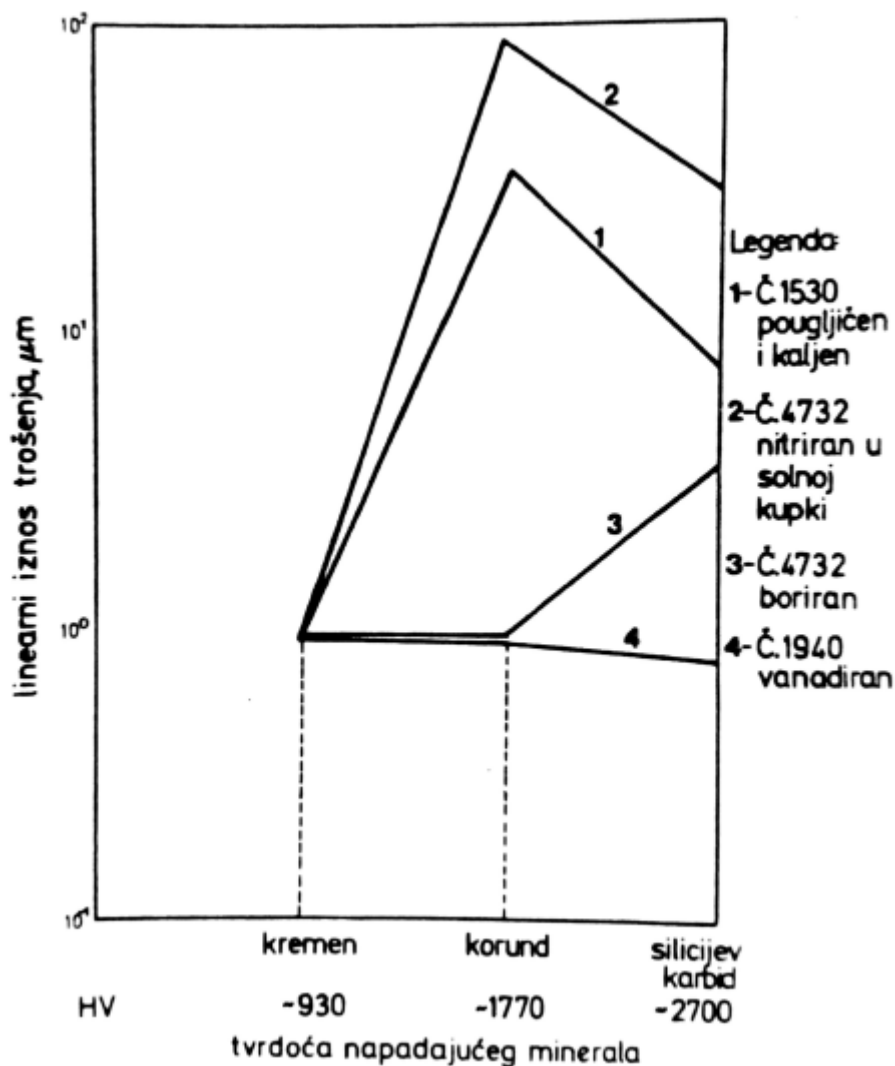
Jednako tako kod vanadiniranih kliznih parova nije uočeno postojanje tribokemijskih produkata i to je najpovoljniji postupak za spriječavanje tribooksidacije.



Slika 3.1.2.1. Otpornosti na trošenje tribooksidacijom.

### 3.1.3. Trošenje abrazijom

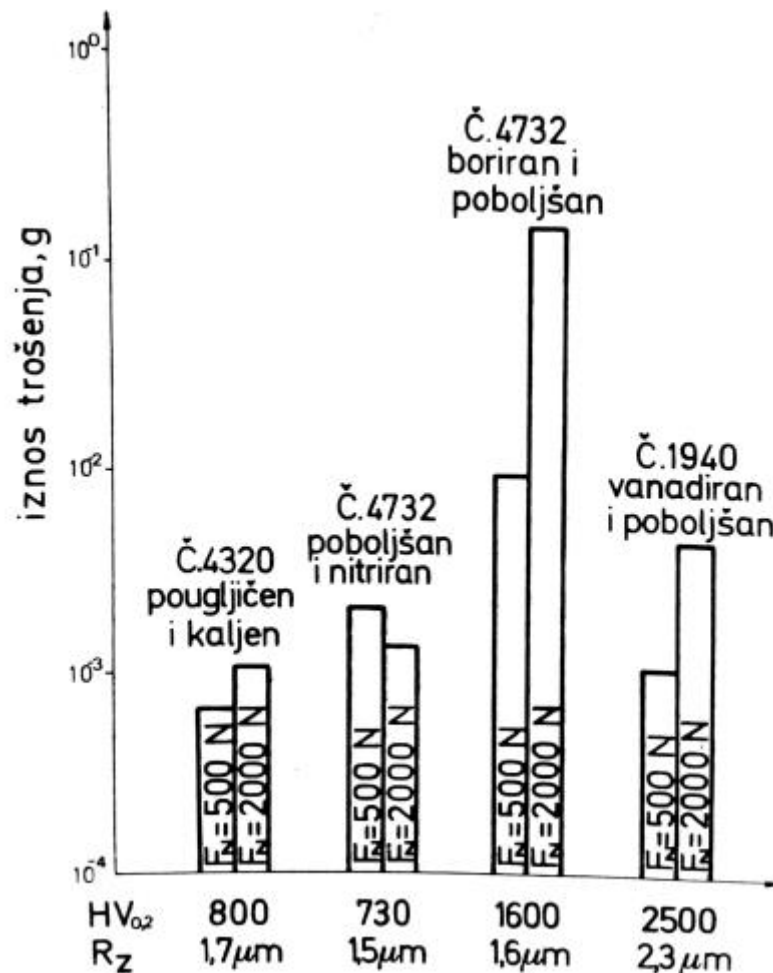
Otpornost na abraziju mjeri se postupkom pomoću brusnog tanjura na kojem su mineralni abrazivni materijali različitih tvrdoća. Utvrđeno je da kremeniti papir daje niske iznose trošenja i za sve probe je jednak, a to je ujedno i najmekši materijal – slika 3.1.3.1. Tvrdi materijal od kremenita je korund, a on povećava iznose trošenja za pougljičene, kaljene i nitrirane probe i sam je tvrdi od takvih slojeva. Upotrebom najtvrdjeg materijala silicijeva karbida jedino iznos trošenja vanadinirane probe ostaje nizak i to zbog vrlo visoke tvrdoće slojeva dobivenih vanadiniranjem.



Slika 3.1.3.1. Trošenje metodom brusnih papira.

### 3.1.4. Trošenje razbijanjem površine udarcima

Razbijanje površine udarcima ima najmanji iznos trošenja i to za pougljičene i kaljene – cementirane i poboljšane - nitrirane probe. Postupak vanadiniranja proba daje nešto slabije vrijednosti za razliku od boriranog sloja koji je u ovakvim uvjetima potpuno podbacio – slika 3.1.4.1.



Slika 3.1.4.1. Trošenje pri razbijanju površine udarcima.

#### 4. POSTUPAK CEMENTIRANJA

Postupak toplinske obrade čelika koji se sastoji od pougljičavanja površinskog sloja i zatim kaljenja se naziva cementiranje čelika, a obrađuju se čelici koji sadrže 0,25% ugljika. Cilj postupka je povećati tvrdoću površinskog dijela povećanjem sadržaja ugljika tako da se nakon kaljenja postigne visoka tvrdoća površine dok jezgra strojnog dijela se nepougljičuje i ima znatno nižu tvrdoću.

Uvjeti pougljičenja nam diktiraju dubinu pougljičavanja dok se sadržaj ugljika na samoj površini kreće od 0,8 do 1,0 i prema jezgri ravnomjerno opada. Dobivanje visoke tvrdoće u površinskom sloju uvjetuje austenitno – martenzitna transformacija koja se dobiva kaljenjem. Martenzit odlikuje visoka tvrdoća i visoka otpornost prema trošenju što je posebno važno kod visokih specifičnih naprežanja npr. "umor površine". Za razliku od površine, nepougljičena jezgra zadržava visoku žilavost što daje visoku otpornost prema udarnim naprežanjima. Zbog površinske tvrdoće, a žilavosti jezgre, ovaj postupak toplinske obrade se primjenjuje za strojne dijelove koji su izloženi površinskom trošenju i visokim dinamičkim naprežanjima.

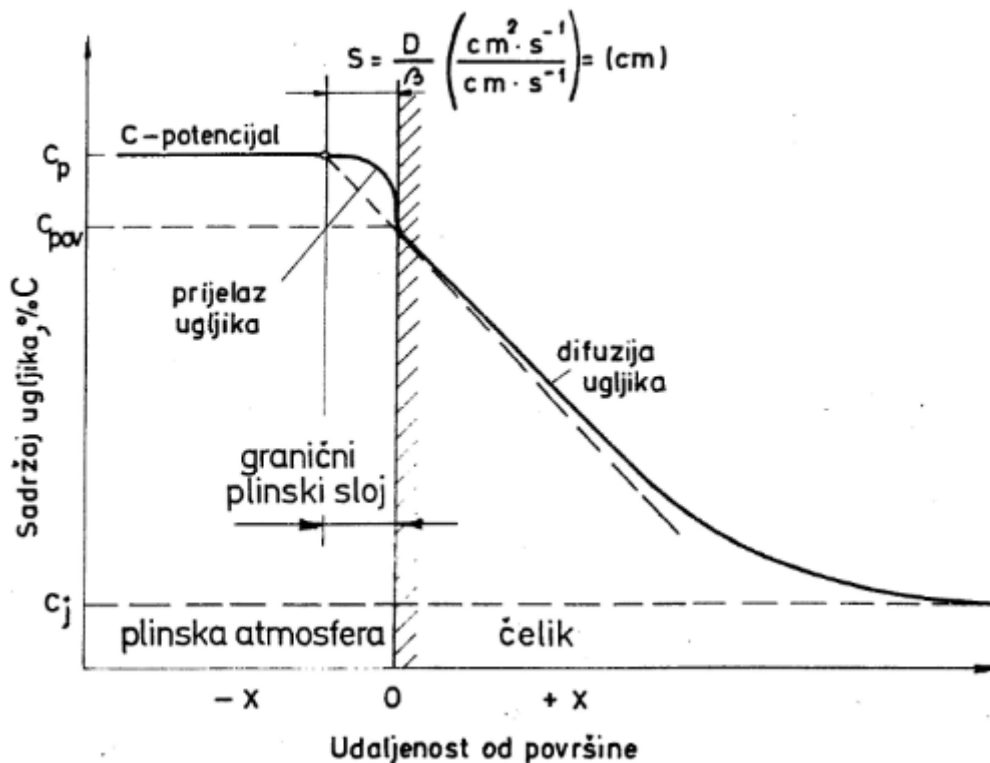
Postupci cementiranja čelika se dugo primijenjuju u industriji tako da danas imamo relativno veliki broj postupaka. Dijelimo ih prema agregatnom stanju sredstava za pougljičavanje i to:

1. Pougljičavanje u krutim sredstvima
2. Pougljičavanje u tekućim sredstvima
3. Pougljičavanje u plinosvitim sredstvima
4. Vakumsko pougljičavanje
5. Plazma pougljičavanje

Postoji veći broj postupaka unutar svake grupe koji se razlikuje prema sastavu i svojstvima sredstava za pougljičavanje.

## 4.1. Pougličavanje

Unatoč razlikama po agregatnim stanjima, cementacija čelika ima neka zajednička svojstva. Najvažnije svojstvo je temperatura pougličavanja koja je visoka za sve postupke i obično je od 880°C do 950°C. Visoke temperature su potrebne zbog postizanja visokog sadržaja ugljika na površini i potrebne dubine pougličavanja. Sam proces se sastoji od više etapa – slika 4.1.1.



Slika 4.1.1. Dijagram procesa pougličavanja.

Iz ovog kvalitativnog dijagrama nam je vidljivo koje su to etape u procesu. C – potencijal je zapravo ravnotežni sadržaj ugljika sredstva za pougličavanje. Zagrijavanjem na potrebnu temperaturu i držanjem na istoj dolazi do reakcije u graničnom sloju i difuzije ugljika u površinu materijala. Zato dolazi do pada C – potencijala u širini "S" koja se dobije po formuli:

$$S = \frac{D}{\beta} \left( \frac{cm^2 \cdot s^{-1}}{cm \cdot s^{-1}} = cm \right)$$

Samim time na površini materijala se povećava sadržaj ugljika -  $C_{pov}$  i ova etapa se naziva prijelaz ugljika. Difuzija se odvija skroz od površine prema jezgri materijala koja ima svoj sadržaj ugljika –  $C_j$  i on ostaje nepromijenjen. Obzirom da na površini materijala dominira austenitna struktura (plošno centrirana kubična rešetka), ugljik zauzima intersticijski (uključinski) položaj. Cijelokupan postupak se može matematički izraziti pomoću formule za transport ugljika:

$$\frac{M}{F \cdot dt} = \beta * (C_p - C_{pov}) = Dc * \left( \frac{\partial C}{\partial t} \right) \left( \frac{gC}{mm^2 \cdot s} \right)$$

M je masa ugljika koja prodire kroz površinu F u vremenu dt, a to je jednako koeficijentu prijelaza ugljika ( $\beta$ ) pomnoženog razlikom C – potencijal i C – površine što je jednako koeficijentu difuzije ugljika ( $Dc$ ) pomnoženog razlikom ugljika materijala i trajanja procesa.

Koeficijent prijelaza ugljika zavisi o vrsti i sastavu sredstva za pougljičavanje, potencijalu ugljika, temperaturi procesa pougljičavanja i vrsti čelika ( utjecaj legirajućih elementa ).

Koeficijent difuzije ugljika u čeliku zavisi o temperaturi procesa, vrsti čelika ( utjecaj legirajućih elemenata ) i o sadržaju ugljika u materijalu.

Cijeli proces podliježe zakonitostima termodinamike i kinetike, a glavna svojstva su temperatura i trajanje pougljičavanja, vrsta čelika i legiranih elemenata te sredstva za pougljičavanje. Temelj za difuziju ugljika je Austenitna faza koja je realan kruti rastvor te se kod čistog materijala Fe – C ( nelegiranih čelika ) odvija termodinamička aktivnost ovisna o temperaturi i sadržaju ugljika. Pri tim svojstvima standardno stanje je grafit. Porastom temperature povećava se rastvorljivost ugljika u austenitu i to za 900°C iznosi 1,2 %C a kod 950°C 1,35%C. Ovo vrijedi samo za nelegirane čelike jer kod legiranih čelika svaki element ima različit utjecaj na termodinamičku aktivnost i rastvorljivost ugljika. Kako bi se odredilo utjecaj legiranih elemenata, provedeno je ispitivanje te se dobila jedinstvena formula po Gunnarsonu-u za proračun korekcije pougljičavanja različitih čelika za cementiranje:

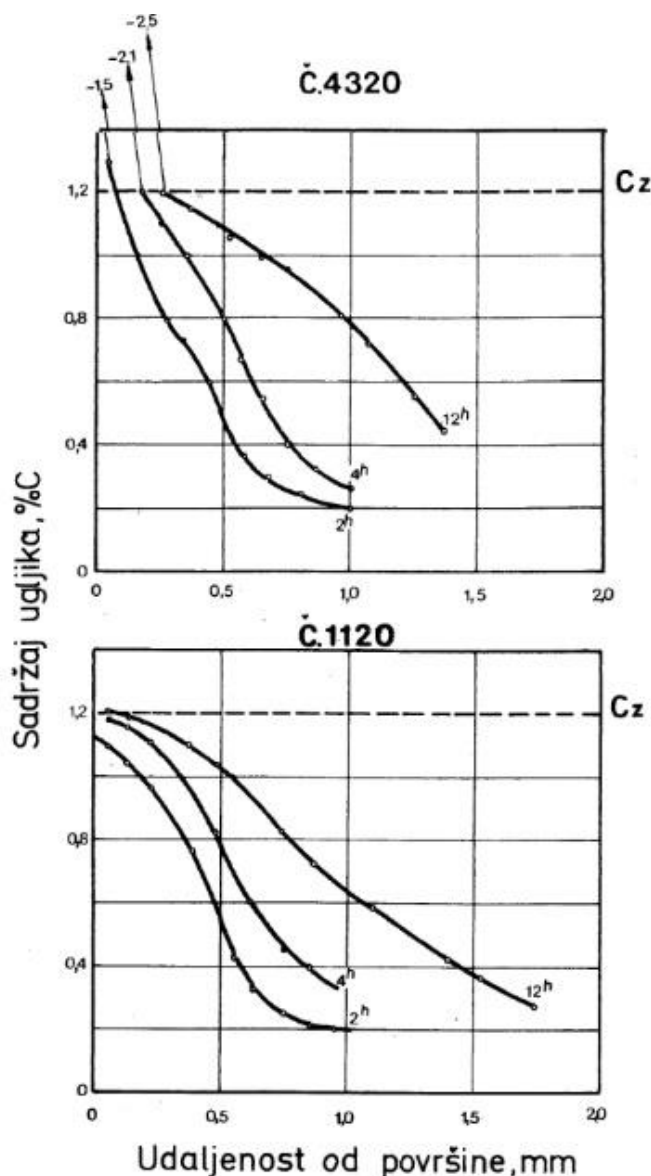
$$\log\left(\frac{c^{(Fe-c)}}{c^{\check{c}}}\right)_{ac} = konst = \% * 0,055 - \% * 0,013 - \% * 0,040 + \% * 0,014 - \% * 0,013$$

Ova jednadžba nam daje uvid u izračun sadržaja ugljika na površini za čisti čelik i sadržaj ugljika kod određenog čelika, a u tablici 4.1.1. je prikazan utjecaj pratećih i legirajućih elemenata na uvjete pougljičavanja.

Čelik	Koeficijent $\frac{c^{(Fe-C)}}{c^{\check{c}}}$
Č.1121 (Ck10)	1,02
Č.1221 (Ck15)	1,02
Č.4120 (17Cr3)	0,97
Č.4320 (16MnCr5)	0,91
Č.4321 (20MnCr5)	0,89
Č.4720 (15CrMo5)	0,91
Č.4721 (20CrMo5)	0,89
Č.7420 (20MoCr4)	0,96
Č.7421 (25MoCr4)	0,95
Č.5420 (15CrNi6)	0,93
Č.5421 (18CrNi8)	0,91

Tablica 4.1.1. Utjecaj legiranih elemenata.

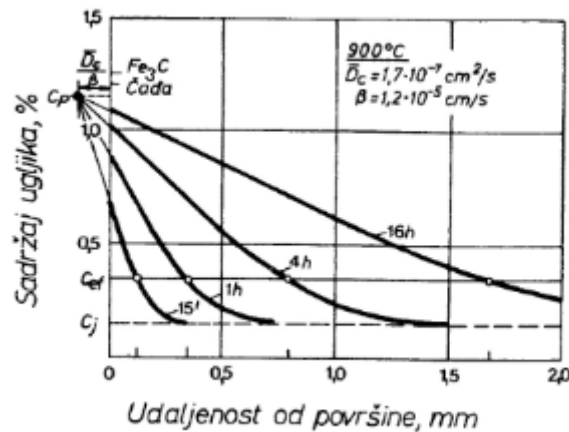
Ove vrijednosti nam daju uvid u korekcije uvjeta pougljičavanja kako bi postigli optimalne vrijednosti ugljika na površini materijala. Glavni razlog korekcije je izbjegavanje dobivanje različitih vrijednosti sadržaja ugljika na površini kod različitih čelika, a za iste uvjete pougljičavanja. Legirni čelici koji sadrže jake karbidotvorce ( krom i dr. ) imaju manju rastvorljivost ugljika tako da kod pougljičavanja mogu nastupiti karbidi koji štetno utječu na u cementiranom sloju. To dolazi do izražaja u eksploataciji jer se smanjuje dinamička izdržljivost i mogu dovesti do pojave rupičenja ( eng. Pitting ), zato se kod pougljičavanja sprječava nastajanje karbida i to prvenstveno zavisi o C – potencijalu sredstva, maksimalnoj rastvorljivosti ugljika u austenitu i difuziji ugljika u legirnom austenitu – slika 4.1.2.



Slika 4.1.2. Pougličavanje legiranog Č.4320 i nelegiranog Č.1120 čelika.

Vidljivo je kako je pod istim uvjetima pougličavanja sa visokim potencijalom ugljika u sredstvu za Č.4320, uz visoki sadržaj ugljika ( 1,5; 2,1; 2,5 %C ) i Č.1120 nemaju iste dubine i koncentracije ugljika. Kod legiranog čelika nastaju karbidi i time negativno utječu na dubinu pougličavanja i koncentraciju ugljika, te da bi to izbjegli primjenjuju se sredstva koja nisu jako aktivna i sa nižim potencijalom ugljika. Opasnost nastanka karbida time je veća što je vrijeme pougličavanja veće. Zbog velikog broja utjecajnih faktora kod legiranih čelika nije pouzdano za utvrditi koeficijente difuzije ugljika koji se uzimaju u obzir prilikom proračuna potrebnog vremena pougličavanja. Za nelegirane elemente ti podaci postoje i vjerodostojniji su te se može proračunati tok difuzije ugljika i prema njima utvrditi odnos dubine pougličavanja i vremena pougličavanja – slika 4.1.3.





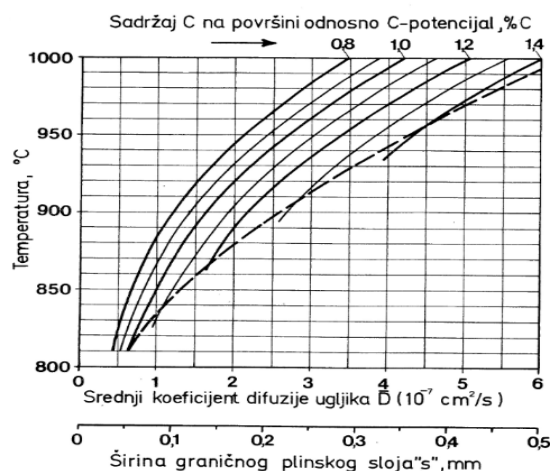
Slika 4.1.3. Krivulje pougljičavanja za različita vremena pougljičavanja.

Vidimo rezultate pougljičavanja nelegiranog čelika sa visokim C – potencijalom, a to je u ovom slučaju granica kada nastupa čađa. Vidljivo je kako kod kratkog vremena pougljičavanja površinski sadržaj ugljika je nizak, dok sa povećanjem vremena pougljičavanja raste i približuje se vrijednosti C – potencijala, a samim time raste i dubina pougljičavanja. Brzina pougljičavanja je veća u početku i ravnomjerno opada sa trajanjem procesa. Ove krivulje nam služe kako bismo odredili ukupnu dubinu pougljičavanja a to je dubina gdje se izjednači sadržaj ugljika sa sadržajem ugljika jezgre ( Cj ). Najčešću primjenu u praksi je pokazala efektivna dubina pougljičavanja ( Cef ~ 0,35 – 0,40 %C ), a može se izračunati prema sljedećoj formuli:

$$def = \frac{0,79 \cdot \sqrt{Dc \cdot \tau}}{0,24 + \left(\frac{C_{ef} - C_j}{C_p - C_j}\right)} - 0,7 * \left(\frac{Dc}{\beta}\right) (cm)$$

- Dc je srednji koeficijent difuzije ugljika,
- Cp je potencijal ugljika,
- Cj je sadržaj ugljika u jezgri,
- τ je vrijeme pougljičavanja u satima.

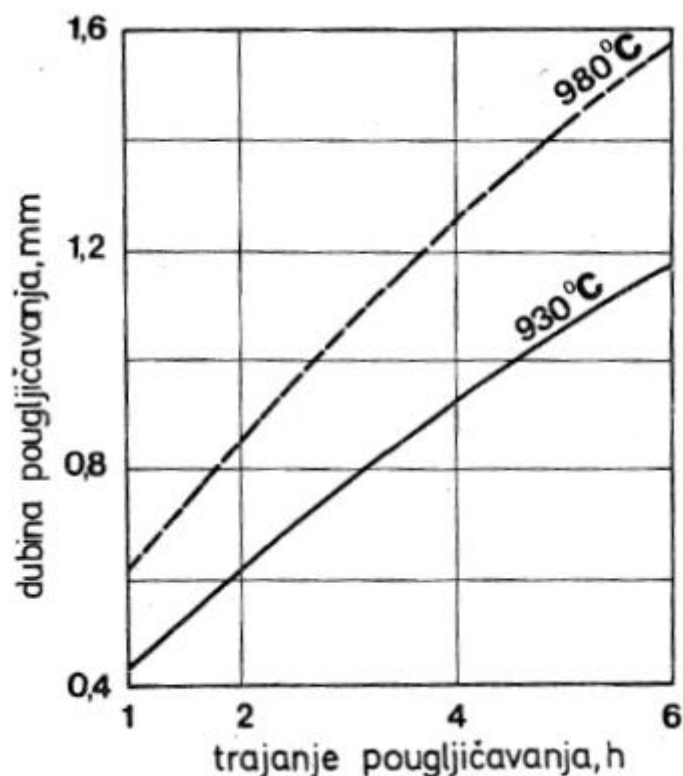
Također se se u praksi koristi dijagram za određivanje trajanja pougljičavanja nelegiranih čelika – slika 4.1.4.



Slika 4.1.4. Zavisnost Dc o temperaturi i C – potencijalu.

Za taj dijagram se najprije odredi srednji koeficijent difuzije ugljika  $D_c$  za određenu temperaturu i sadržaj ugljika na površini, a zatim i širina graničnog plinskog sloja "s".

Osim ovih vrijednosti, veliki utjecaj temperatura ima i na "brzinu" pougljičavanja – slika 4.1.5.

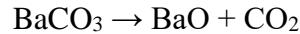


Slika 4.1.5. Utjecaj temperature na dubinu pougljičavanja.

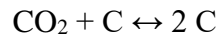
Povišenje temperature pougljičavanja od samo 50°C (s 930 na 980 °C) ima za posljedicu osjetno povećanje dubine pougljičavanja, od 1,08 na 1,58 mm. Kada nam se zahtjeva velika dubina pougljičavanja primjenjuje se "visokotemperaturna cementacija" i provodi se na višim temperaturama uz skraćivanje trajanja pougljičavanja. Negativna strana ovoga je veća potrošnja toplinske energije i oprema traje kraće. Značaj visokotemperaturne cementacije je porast austenitnog zrna i većinom se koriste sitnozrnati čelici za cementiranje ili se provodi postupak usitnjavanja zrna prije kaljenja za obične čelike.

#### 4.1.1. Pougličavanje u krutim sredstvima

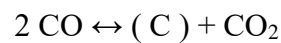
Pougličavanje u krutim sredstvima je jedan od najstarijih postupaka koji se i danas uspješno koristi jer je vremenom prošao kroz usavršavanje procesa. Smjesa koja se koristi za pougličavanje je mješavina drvenog uglja, aktivatora i veziva u obliku zrnatog granulata od 3 do 5 mm. Za aktivator se koristi najčešće barijev karbonat koji se pri povišenim temperaturama raspada na ugljični dioksid i barijev oksid:



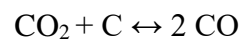
Pri temperaturama pougličavanja ugljični dioksid reagira sa ugljikom iz granulata i nastaje ugljični monoksid, a to uzrokuje uspostavu plinske atmosfere CO i CO<sub>2</sub> koja odgovara ravnotežnim uvjetima za određenu temperaturu:



Zahvaljujući tome, plinska atmosfera reagira sa površinom čelika i dolazi do reakcije pougličavanja:



Produkt cijele reakcije je ugljik koji se difundira u austenitu pri čemu dolazi do povećanja njegove koncentracije na površini, a zatim i prema jezgri materijala. Zbog prisustva drvenog uglja, ugljični dioksid ponovno reagira i obnavlja ugljični monoksid:



Time se zapravo obnavlja cijeli proces i kontinuirano se regenerira plinska atmosfera. Cijeli proces se zapravo odvija u plinskoj fazi, iako je sredstvo za pougličavanje u krutom stanju. Da bi to bilo ostvarivo, bitna je cirkulacija plinova koju omogućava granulat jer je kompaktan tijekom cijelog procesa. Zato se ne koristi praškasto sredstvo ili neko drugo. Sami aktivatori se dijele prema vrsti i sadržaju, a prema djelovanju sredstva se dijele na "oštra" i "blaža". To se manifestira u smislu postizanja određenog sadržaja ugljika i opasnosti nastajanja karbida u površinskom sloju. Naravno, vodi se računa o vrsti čelika i potrebnim zahtjevima pougličavanja.

Sam postupak se provodi tako da se željeni dijelovi upakiraju u kalupe( okrugli, pravokutni ) s granulatom, zatvore se, te se zagrijavaju na određenu temperaturu. Zagrijavanje se provodi najčešće u komornim ili jamskim pećima. Proizvođač granulata sam odredi vrijeme potrebno za zahtjevanu dubinu pougličavanja i vrstu granulata. Nakon upotrebe, granulat se ne baca, već se nadopunjuje novim granulatom u određenom postotku kako bi se održalo pougličavajuće djelovanje i time se smanjuju troškovi.

Nedostaci pougličavanja u krutim sredstvima su:

- nemogućnost kontinuirane kontrole i regulacije C – potencijala,
- opasnost od nastanka karbidne mreže,
- opasnost od lokalnog razugličavanja u fazi ohlađivanja.

Prednosti ovog procesa su:

- jednostavnost provođenja,
- male investicije u odnosu na druge postupke,
- postizanje zadovoljavajuće kvalitete pažljivim izborom uvjeta.

### 4.1.2. Pougličavanje u solnim kupkama

Ovaj proces pougličavanja se provodi u solnim kupkama koje se dobiju taljenjem odgovarajućih soli u loncima zagrijavanih na odgovarajuću temperaturu. Te soli se sastoje od cijanida, najčešće su to natrijev cijanid - NaCN ili kalijev cijanid – KCN, a specifičnost ovih soli je da se mogu koristiti i za nitriranje i karbonitriranje. Cijanidi obogaćuju površinu ugljikom, a također i dušikom. To reguliramo tako da se pri višim temperaturama izražava pougličavajuće djelovanje, a pri nižim temperaturama nitrirajuće djelovanje.

Sve solne kupke se mogu svrstati u dvije osnovne skupine, a zavise o vrsti proizvođača soli:

- 1.) Neaktiviranje solne kupke
- 2.) Aktivirane solne kupke

Razlikuju se po tome što se neaktivirane solne kupke primijenjuju za karbonitriranje pri temperaturama do 850°C i dubine do 0,5mm pri čemu se na površini postiže od 0,4 do 0,6%C. Sam proces je otvoren i u doticaju sa zrakom:



Kisik se iz zraka djelomično rastvara u solnoj kupki i podržava kemijsku reakciju, a u cijelom procesu se kontrolira samo sadržaj cijanida ( CN ).

Aktivne solne kupke sadrže, osim cijanida, aktivatore ( najčešće borijev - BaCl<sub>2</sub> ili stroncijev – SrCl<sub>2</sub> klorid ) koji djeluju na odvijanje reakcije:



Ove kupke se primijenjuju za pougličavanje pri temperaturama od 900 do 1000°C pri čemu se postiže od 0,5 do 1,2 % C. Zahvaljujući tome, postoje "jako" i "slabo" aktivirane solne kupke. Cijeli proces se dopunjava cijanidna sol i sol za aktiviranje kako bismo održali određen C – potencijal i ujednačenu sposobnost pougličavanja. Daljnjim usavršavanjem procesa se razvio sustav nadopunjavanja samo jednom smjesom ( sol + aktivator ) koja se dodaje na temelju rezultata kontrole kupke u samo par minuta.

Dubine pougličavanja zavise o C – potencijalu, vremenu pougličavanja i temperaturi pri kojoj se odvija proces. Naravno, te vrijednosti zavise i o vrsti čelika kojeg se pougličava.

Prednosti svih solnih kupku:

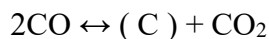
- brzo ugrijavanje čelika na temperaturu kupke,
- jednostavan rad,
- jeftine investicije.

Nedostaci solnih kupki:

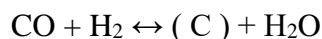
- skupe, otrove soli i njihovo skladištenje,
- nemogućnost kontroliranja i reguliranja sastava kupke,
- neutralizacija otopadnih soli i voda,
- zamjena cijanida kao sredstva.

### 4.1.3. Pougliđavanje u plinskim atmosferama

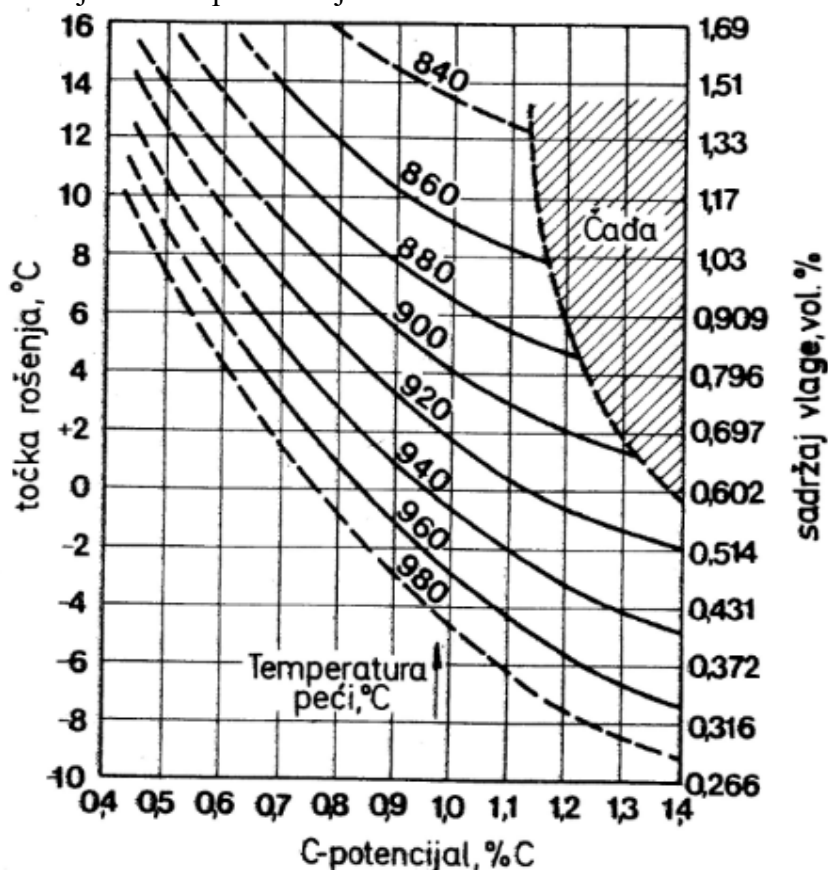
Proces pougličavanja u plinskim atmosferama se počeo šire primjenjivati razvojem automatski regulirane kontrole i regulacije sastava plinske atmosfere. Danas je to najznačajniji komercijalni postupak. Provodi se u pećima u smjesi pročišćenih plinova. Peći koje se koriste su jamaste, prolazne i specijalne komore. Smjesa plinova može biti ugljični monoksid CO, ugljični dioksid CO<sub>2</sub>, vodik H<sub>2</sub>, vodena para H<sub>2</sub>O i metan CH<sub>4</sub>. Sadržaj slobodnog ugljika se regulira prema absorpcijskoj moći površine čelika:



U atmosferama u kojima su CO i H<sub>2</sub>, odvija se reakcija:

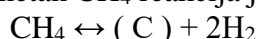


Produkt reakcije je H<sub>2</sub>O čijim se kontroliranjem u plinskoj atmosferi određuje C – potencijal. Kontroliranje vodene pare se obavlja mjerenjem temperature kondenzacije na temelju koje određujemo koncentraciju vodene pare u smjesi – slika 4.1.3.1.



Slika 4.1.3.1. Odnos temperature kondenzacije i C – potencijala.

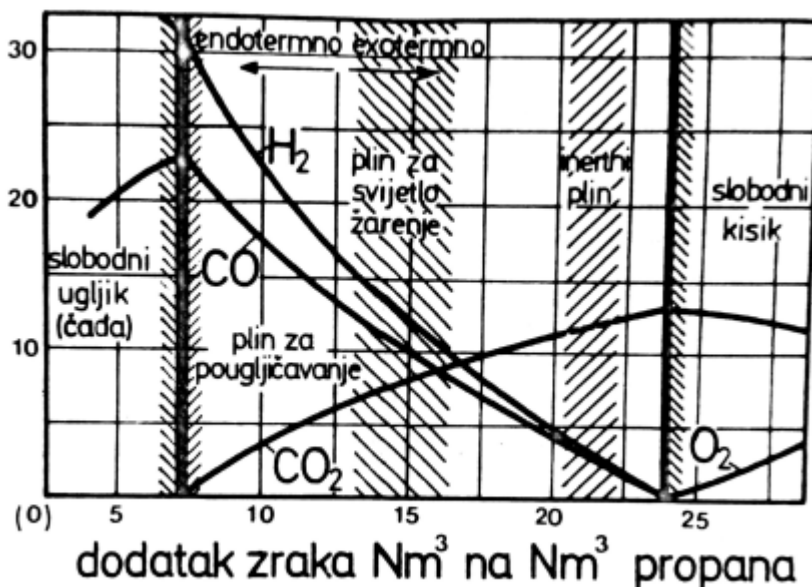
Plinske atmosfere u kojima je prisutan metan CH<sub>4</sub> reakcija je:



Iz ovih reakcija je vidljivo da C – potencijal zavisi o temperaturi i parcijalnim pritiscima plinskih komponenti. Plinske atmosfere koje se primjenjuju najčešće se dijele prema načinu formiranja.

### 4.1.3.1. Atmosfere na osnovi plina nosača

Plin koji je "nosač" se proizvodi u posebnom generatoru, a koristi se propan ili metan koji su određen postotak zraka na temperaturi oko 1000°C uz katalizator daju plin nosač. Odnos zraka i plina daje različit sastav plina – slika 4.1.3.1.1.



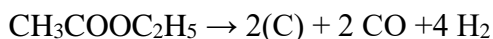
Slika 4.1.3.1.1. Odnosi zraka i propana u smjesi.

Različiti zaštitni plinovi se mogu proizvoditi zavisno o odnosu zraka i plina. Ukoliko je dodatak zraka nedovoljan (ispod 7 Nm<sup>3</sup>) tada nastaje čada, što nam je nepovoljno. Iznad te granice od 7 Nm<sup>3</sup> zraka počinje se stvarati CO<sub>2</sub> i zbog toga se smanjuje sadržaj ugljikovog monoksida. Ovaj dio procesa je endoterman jer sagorjevanje nije potpuno i potrebno je dovođenje topline. Za veće količine zraka (iznad 13 Nm<sup>3</sup>) proces postaje exoterman i nastaju sve veće količine CO<sub>2</sub>, te se u ovom području proizvode plinske atmosfere za svijetlo žarenje i inertni plinovi. Zbog nastanka po endotermnoj reakciji, ovaj plin se još naziva i "endo" – plin.

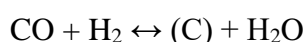
C – potencijal se održava tako da se već postojećem endo – plinu u peći dodaje metan ili propan. Tako osiguravamo automatsko i kontinuirano željeni sastav plinske atmosfere u svim fazama postupka.

#### 4.1.3.2. Atmosfere koje se dobe ukapljivanje ugljikovodika

Kod ovih atmosfera najčešće korištene plinske komponente su CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> koje se nalaze u smjesama kao što su izopropanol ( C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>OH ), aceton ( CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub> ) i sl. Prema površini šarže koja se cementira, određuje se potrebna količina dodatnog sredstva u pjeđinim fazama procesa. Nagli razvoj ove vrste atmosfera je uslijedio nakon razvoja i usavršavanja metoda za kontrolu i regulaciju plinskih atmosfera koje su izrazile prednosti ovog postupka kao što je jednostavnost rada. Razvojem tehnologije se razvio i postupak koji se naziva " Carbomaag ", a provodi se u jamskim pećima sa retortom u koju se doziraju metanol i etilacetat. Oni se raspadaju na temperaturi pougljičavanja gdje dolazi do odvijanja reakcije. Raspadom metanola ( CH<sub>3</sub>OH → CO + 2H<sub>2</sub> ) nastaje plinska atmosfera u retorti. Raspadom etilacetata odvija se reakcija raspada i pougljičenja:



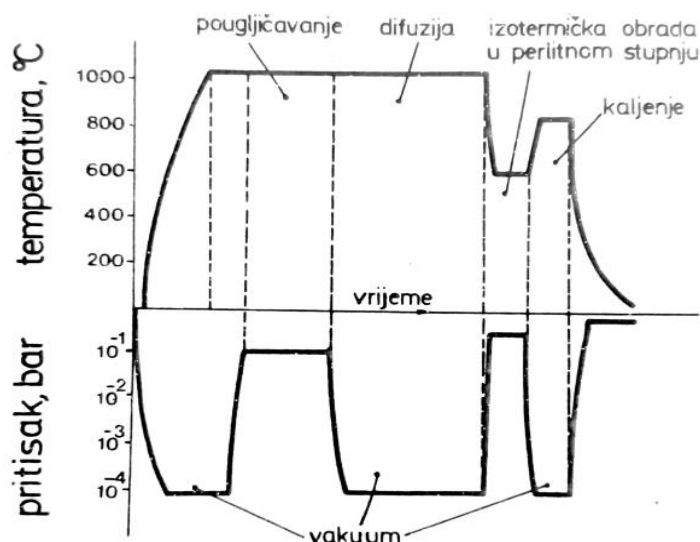
Čime se uspostavlja ravnotežna reakcija:



Značajna prednost ovog postupka je održavanje odnosa H<sub>2</sub> i CO, isto tako šaržu možemo hladiti sa retortom ili direktno kaliti nakon dizanja poklopca retorte.

#### 4.1.3.3. Pougljičavanje pod pritiskom plinske atmosfere

Glavna odlika ovog postupka je pougljičavanje u vakumskim pećima gdje se šarža zagrije na oko 1100°C i zatim se direktno u peć uvodi metan do pritiska od 0,100 do 0,300 bara – slika 4.1.3.3.1. Tada se odvija pougljičavanje jer nastaje reakcija CH<sub>4</sub> ↔ (C) + 2H<sub>2</sub>, a sastav plinske atmosfere reguliramo automatski uz kontrolu. Zbog visokih temperatura procesa postižu se velike dubine pougljičavanja, ali se zrno jako pogrubljuje. Nakon pougljičavanja moramo provesti izotermičku obradu u perlitnom stanju sa nakanadnim jednostrukim kaljenjem. To se sve odvija u istom uređaju, a prednost ovog postupka je velika produktivnost, mala potrošnja plina, nema rubne oksidacije.



Slika 4.1.3.3.1. Tok postupka kod podpritiska.

#### 4.1.4. Vakumsko pougljičavanje

Ovakav postupak pougljičavanja se odvija na visokim temperaturama, od 900 do 1040 °C i u plinskoj atmosferi koja može biti sastavljena od vodika, ugljikovodika, smjese ugljikovodika i smjese ugljikovodika i dušika. Vakumsko pougljičenje, za razliku od plinskog, C- potencijal određuje zasićenjem ugljika na površini čelika i vremenom pougljičenja kod određenih temperatura. Vakumska peć se izrađuje od grafita ili keramike da se izdrže visoki tlakovi koji nesmiju prijeći vrijednosti od 0,4 bara da se spriječi prekomjerno taloženje ugljika u peći. Prednosti vakumskog u odnosu na plinsko pougljičenje je čistoća obrađivanih predmeta, nema potrebe za endotermnim generatorom, brži postupak i veće debljine sloja ( do 1 mm), više radne temperature, bolja mehanička svojstva. Jednako tako, vakum služi kao zaštitna atmosfera. Nedostaci vakumskog pougljičenja je skupoća opreme, kompromis i balans između procesnih uvjeta kako bi postigli potrebnu dubinu pougljičenja, brzinu i smanjili na minimum rizik od čađe.

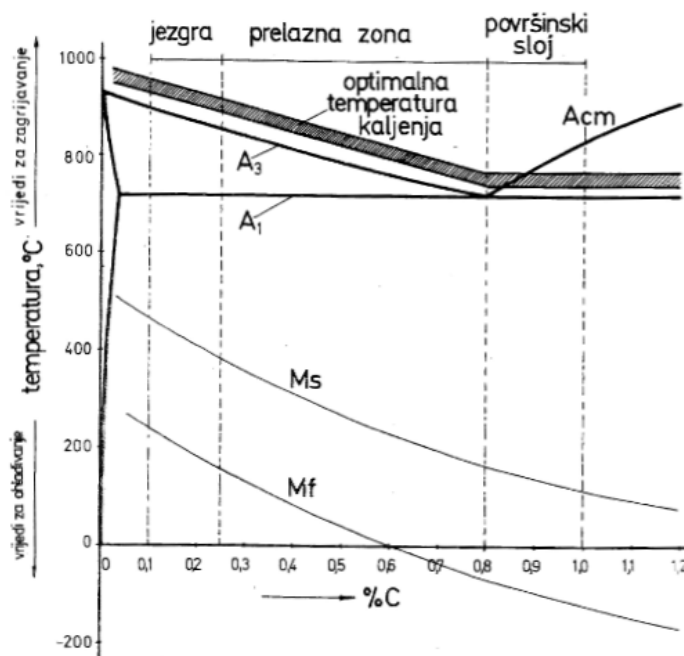
#### 4.1.5. Plazma pougljičavanje

Plazma pougljičavanje je postupak kod kojeg se konstantan C – potencijal ne održava pomoću kisikove sonde već se regulira putem gustoće struje. Glavna karakteristika ovog procesa je bombardiranje površine čelika koncentracijom ugljikovih iona. To se postiže u visokotemperaturnoj peći u koju se postave čelični predmeti s razmakom od najmanje 6 mm i oni služe kao katode. Unutrašnja konstrukcija peći služi kao anoda i između katode i anode se formira plazma. Plin koji se koristi za plazma pougljičenje je smjesa ugljikovodika ( metan ili propan ), vodika i argona ili dušika. Za ionizaciju plina se koristi istosmjerni napon od 350 V do 1 kV kod tlaka od 0,013 do 0,33 bara. Kada se postigne tok plazme, pražnjenjem između katode i anode dovodi do razdvajanja metana na ugljik i vodik i stvaranja odgovarajućeg visokog C – potencijala. Zapravo atom ugljika reagira sa površinom obrađivanog predmeta i difundira u površinu materijala. Taj prijelaz je jako brz za razliku od drugih postupaka. To ima za posljedicu povećanje difuzije ugljika i bolju topivost u austenitu. Cijeli proces se sastoji od dvije faze. Prva faza je zapravo uspostava toka plazme, a druga faza je zaustavljanje plazmenog toka i odvijanje reakcija u površini materijala – odnosno difuzijska faza. Prednost plazma postupka je skraćanje vremena postupka za 2-3 puta, veća jednoličnost u debljini pougljičenog sloja, niža potrošnja plina i niža cijena, nema onečišćenja okoliša. Nedostatak je visoka cijena opreme i postupak nije pogodan za velike predmete zbog potrebnog katodnog kontakta.



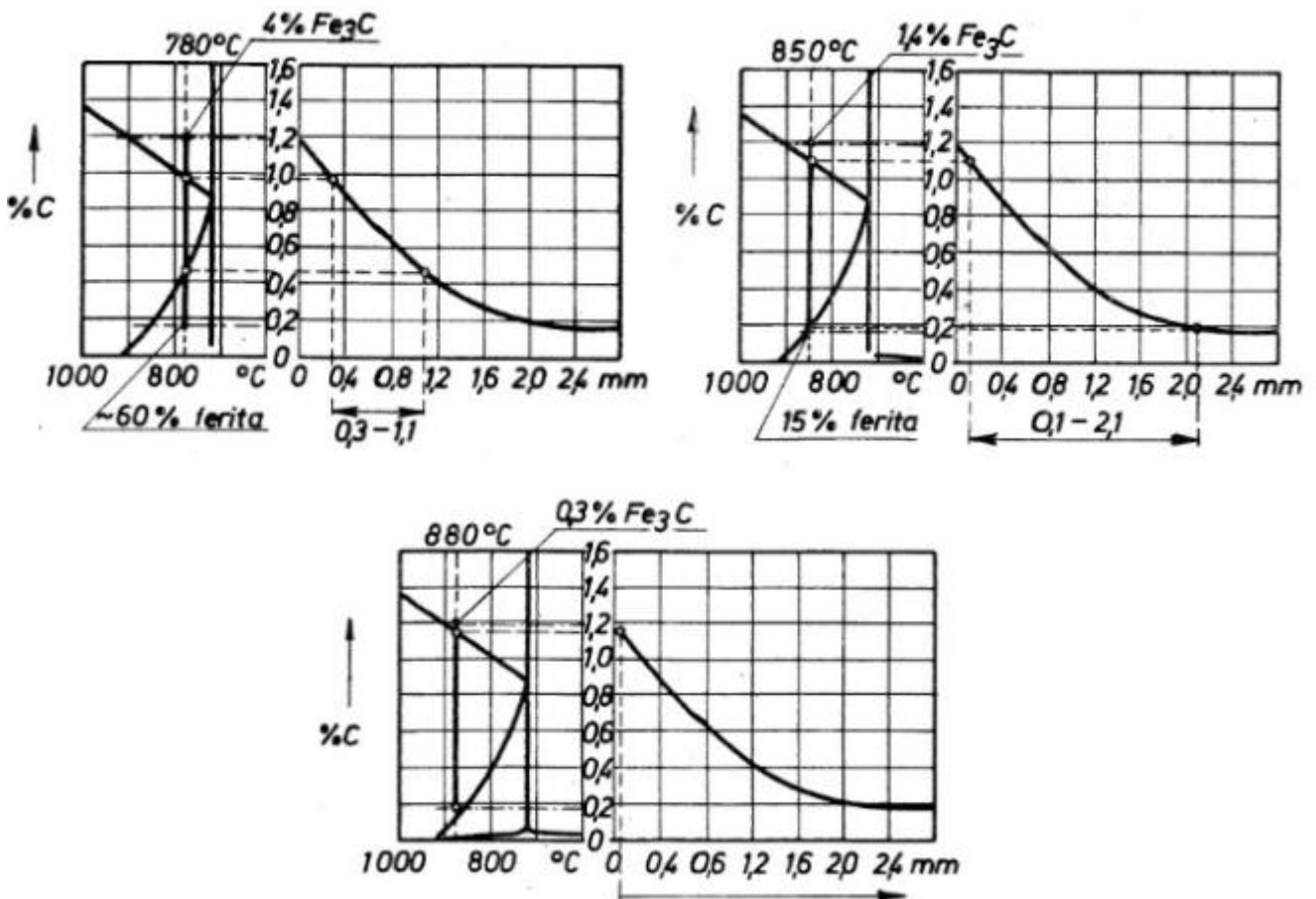
## 5. KALJENJE

Toplinska obrada nakon pougljičavanja nije jednostavna jer se ravnomjerno mijenja sadržaj ugljika od površine prema jezgri a to uzrokuje različit tok strukturnih promjena u pojedinim dijelovima pougljičenog sloja. Kaljenje se provodi u cilju postizanja martenzitne strukture koja ima za posljedicu visoku tvrdoću površinskog sloja. Prikaz ovih promjena je zorno prikazan u Fe – C dijagramu za metastabilnu kristalizaciju – slika 5.1.



Slika 5.1. Stanje nakon pougljičavanja u Fe – C dijagramu.

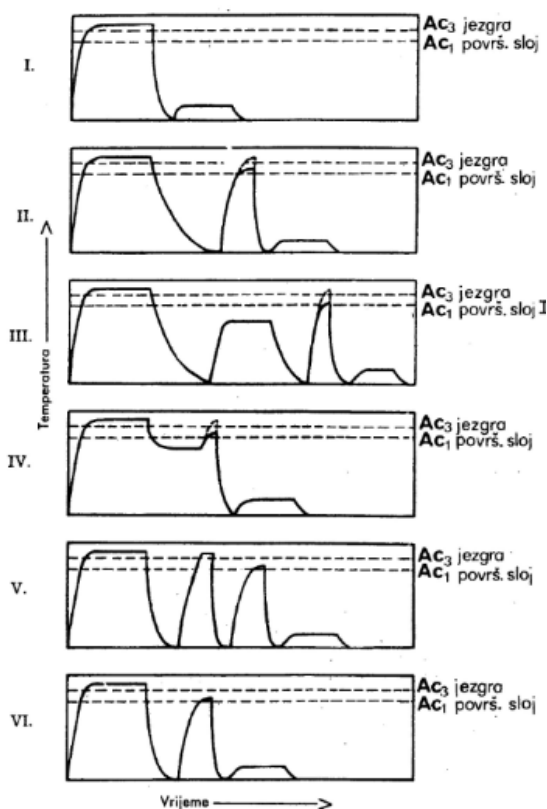
Iz dijagrama stanja je vidljivo kako je jezgra u području podeutektoidnih čelika, a površinski sloj je u području nadeutektoidnog sastava. Prijelazna zona pokazuje sadržaj ugljika koji ravnomjerno opada prema vrijednostima sadržaja jezgre, što je zapravo polazni sadržaj ugljika u čeliku. Isto tako je vidljiva linija optimalne temperature kaljenja koja je u zavisnosti o sadržaju ugljika i iznosi 30-70°C iznad A<sub>3</sub>, te 50-70°C iznad A<sub>1</sub> linije. Zbog toga nismo u mogućnosti odabrati jednu optimalnu temperaturu i za jezgru i za površinski sloj, a ta razlika u temperaturama može ići i više od 100°C. Prilikom izbora temperature kaljenja određuju se prioriteti ili jezgra ili površinski sloj jer ako odaberemo temperaturu jezgre, tada se površinski sloj "pregrije", a ako odaberemo temperaturu površinskog sloja, jezgra nema dovoljnu temperaturu za potpunu austenitizaciju. Ovakav slučaj se najbolje izražava kada postizemo kod pougljičavanja previsok sadržaj ugljika na površini – slika 5.2.



Slika 5.2. Kaljenje za tri različite temperature.

Pri temperaturi kaljenja od 780°C površinski sloj se sastoji od Fe<sub>3</sub>C faze ( austenit + cementit ), a jezgra i prijelazna zona od faze austenit + ferit. Na temperaturi kaljenja od 850°C imamo smanjenje udjela cementita koji se smanjuje i do 0,3%, dok područje jezgre sadrži 15% ferita na temperaturi austenitizacije. Temperatura kaljenja od 880°C nam je najprikladnija jer se eliminira cementit u površinskom sloju, ali ukoliko bi površinski sloj imao 0,8% ugljika, tada bi ova temperatura bila previsoka za kaljenje jer je znatno iznad temperature A<sub>1</sub>.

Početak i kraj transformacije martenzita ( Ms i Mf ) zavise o sadržaju ugljika, a prvo se kod kaljenja ( prilikom gašenja ) transformira iz austenita u području jezgre a tek kod nižih temperatura u površinskom sloju. Ta transformacija neće biti potpuna i pri sobnoj temperaturi u strukturi materijala će biti prisutan zaostali austenit. Potpunu transformaciju postizemo tek "dubokim" ohlađivanjem na temperature ispod Mf. Za legirane čelike su temperature i položaji linija Ms i Mf još i niže. Poslije pougljičavanja postoji veliki broj različitih toplinskih obrada – slika 5.3.



Slika 5.3. Postupci toplinskih obrada poslije pougljičavanja.

Pod brojem I je postupak direktnog kaljenja čelika s temperature pougljičavanja. Ovo je najjednostavniji i najjeftiniji postupak, ali nedostaci su mu pogrubljivanje austenitnog zrna i smanjenje žilavosti. Pougljičavanje čelika sa višim C – potencijalom sadrži veću količinu zaostalog austenita. Ovaj postupak se najviše koristi kod standardnih kvaliteta čelika i kada nemamo visoke zahtjeve. Ukoliko postoje viši zahtjevi za mehanička i strukturna svojstva, tada koristimo sitnozrnate čelike jer ne dolazi do bitnog pogrubljenja zrna a i sklonost zaostalom austenitu je manja. Praktičnim iskustvom se često primjenjuje direktno kaljenje sa snižene temperature, to je temperatura kaljenja jezgre i daje nam povoljnija svojstva.

Broj II je jednostruko kaljenje nakon ohlađivanja poslije pougljičavanja. Provođi se sa temperatura kaljenja površinskog sloja ili jezgre. Postoji nekoliko varijanti ovog postupka, a svima je zajedničko da se između pougljičavanja i kaljenja provodi postupak pretvorbe austenita i naknadnom austenitizacijom iznad  $A_1$  postiže djelomična prekrystalizacija. Posljedica toga je usitnjavanje zrna, ali treba voditi računa da se rastvori karbidi stvoreni na granicama zrna.

Broj III je jednostruko kaljenje nakon međuzarenja ima za cilj smanjenje napetosti i deformacija, ali ovaj postupak ne donosi vidno poboljšanje svojstava jer daljnje kaljenje utječe na deformacije strojnih dijelova, a i temperatura žarenja je preniska za uklanjanje karbida.

Nakon pougljičavanja u solnim kupkama i plinskim atmosferama primjenjuje se međuhlađivanje – broj IV. Čelik brzo hladimo s temperature pougljičavanja do temperature oko  $600^{\circ}\text{C}$  i držimo odgovarajuće vrijeme na toj temperaturi pri čemu se izvrši pretvorba austenita u perlitnom stanju. Vrijeme držanja zavisi o vrsti čelika, a nakon toga se ugrijava na temperaturu kaljenja površine ili jezgre. Prednosti ovog procesa je smanjenje ukupnog ciklusa procesa i manji utrošak toplinske energije.

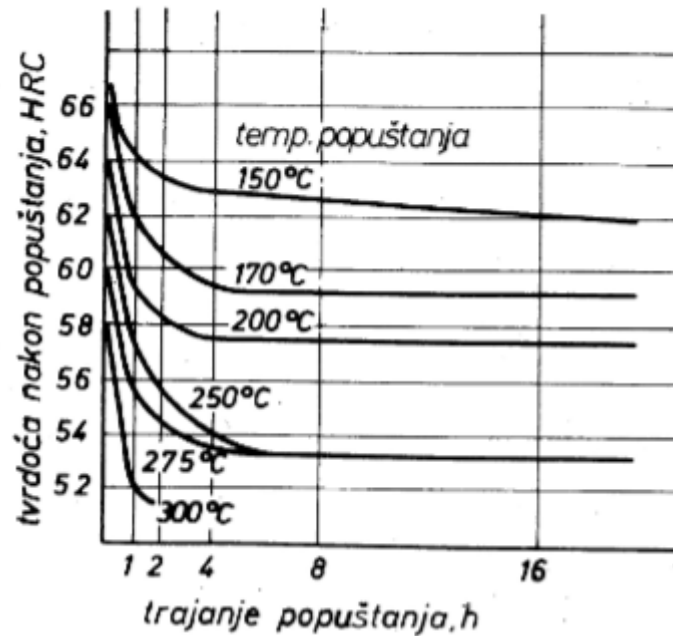
Dvostruko kaljenje – broj V daje najvišu površinsku tvrdoću i najbolju žilavost jezgre, ali u praksi se pokazalo da nije ostvariv. Najbolja žilavost dobivena prvotnim kaljenjem se kasnije bitno smanji

drugim kaljenjem s niže temperature jer se na tim nižim temperaturama provede samo djelomična prekrystalizacija jezgre i pored austenita imamo i ferit. Osim smanjenja željenih svojstava imamo i povećanje broja ciklusa ugrijavanja i hlađenja, a time se povećava mogućnost nastanka defekata u materijalu. Kako bismo te nedostatke reducirali primjenjuje se dovstruko kaljenje direktno sa temperature pougljičavanja broj VI. Drugo kaljenje se provodi sa temperature kaljenja površinskog sloja čime smo smanjili broj ciklusa.

Gašenje se provodi obzirom na vrstu čelika i dimenzija dijelova u vodi, ulju ili toploj kupki.

## 5.1. Popuštanje nakon kaljenja

Kaljenjem u pougljičenom sloju nastaje tetragonalni martenzit, a mi želimo postići kubični martenzit. Posljedica te pretvorbe je pad tvrdoće, dok se popuštanje provodi zbog smanjenja visokih napetosti u cementiranom čeliku i prevencije nastanka defekata. Sam proces zavisi o temperaturi i trajanju popuštanja – slika 5.1.1..



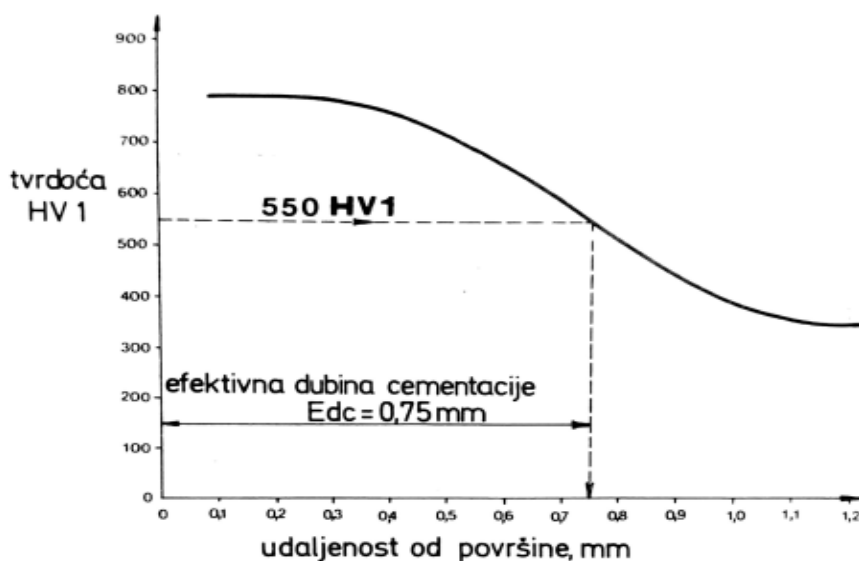
Slika 5.1.1. Ovisnost tvrdoće o temperaturi i trajanju popuštanja.

Proces popuštanja se odvija obično na temperaturama od 150 do 200 °C pri čemu je površinska tvrdoća od 58 do 62 HRC. Temperature iznad 200°C se uglavnom ne primjenjuju zbog smanjenja tvrdoće i dinamičke izdržljivosti uslijed pojave krtosti kod nekih vrsta čelika.

## 6. ISPITIVANJE CEMENTIRANIH ČELIKA

Kontrola kvalitete cementiranih čelika provodi se najčešće ispitivanjem površinske tvrdoće, ispitivanjem dubine cementiranog sloja i provjera strukture.

Ispitivanja se provode metodom po Rockwell – u, a za ispitivanje površinske tvrdoće se mogu koristiti i druge metode. Površina se prvo ugrubo, lagano pobrusi brusnim papirom kako bismo uklonili nečistoće i otklonili hrapavost površine, a zatim se prodire penetratorom i izmjere vrijednosti tvrdoće površine. Za ispitivanje dubine cementiranog sloja koristimo se utegom težine 1000 pounda ( HV1 ) i to tako da se prvo presjeku uzorci za kontrolu uz obavezno intenzivno hlađenje kako bi eliminirali strukturne promjene. Zatim se presječena površina brusi brusnim papirom zrnatosti 600, isto uz hlađenje. Nakon toga se izmjere vrijednosti tvrdoće jezgre, a zatim se mjere vrijednosti tvrdoće od površine prema jezgri uz pomak od 0,2 mm. Nakon izmjerenih vrijednosti određuje se efektivna dubina cementiranog sloja ( Edc ) i to je ona dubina na kojoj je postignuto 80% maksimalne tvrdoće cementiranog sloja – slika 6.1.



Slika 6.1. Efektivna dubina cementiranog sloja.

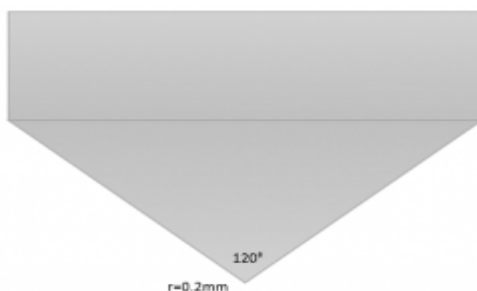
Provjera strukture je slična provjeri dubine cementiranog sloja samo što se površina uzorka dodatno ispolira i nagriže odgovarajućim sredstvom te se svjetlosno – optičkim mikroskopom ispita. Provjera strukture se sastoji u ocjeni veličine zrna, ocjenom udjela zaostalog austenita u martenzitu, provjeri prisutnosti karbida i određivanju eventualnog razugljičenja ili " rubne oksidacije ".

Jedna prisutna metoda za ispitivanje je tokarenje cilindričnih uzoraka i to tako da se postepeno skidaju slojevi debljine 0,1 mm koji se kasnije analiziraju na sadržaj ugljika. Tako izmjerene vrijednosti se unose u dijagram i dobivamo krivulju pougljičavanja iz koje se može isčitati vrijednosti sadržaja ugljika i dubinu pougljičavanja. Osim ovih ispitivanja, mogu se još provoditi i ispitivanje žilavosti jezgre, žilavost i dinamička izdržljivost cijelog cementiranog uzorka i neka druga strukturna ispitivanja.

Ukoliko želimo spriječiti pougljičavanje na nekom strojnom dijelu, tada se provodi lokalna zaštita na tom mjestu ili dijelu. Koriste se razne metode a za pougljičavanje u granulatu i plinskim atmosferama koristimo nanošenje tankog sloja bakra galvanskim putem ili posebne zaštitne paste. Kod pougljičavanja u solnim kupkama ne možemo primijeniti ove dvije metode i zato se ostavlja sloj dodatka za cementaciju koji se kasnije strojno obradi a cijeli se strojni dio naknadno kali.

## 6.1. Metoda po Rockwell – u

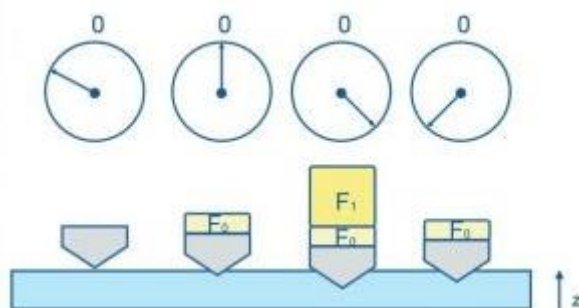
Specifičnost ove metode je mjerenje dubine prodiranja penetratora u materijal. Penetratori su najčešće dijamantni stožci ( HRC metoda ) vršnog kuta od  $120^\circ$  sa zaobljenjem vrha od 0,2 mm u radijusu – Slika 6.1.1.



Slika 6.1.1. Penetrator u Rockwell metodi.

Osim dijamantnog stožca mogu se koristiti i kugljica od kaljenog čelika ( HRB metoda ), HRA ili HRD – za tvrde karbidne kovine, HRF – za hladno valjani tanki lim i bakar i HRG – za slitine bakra s fosforom.

Postupak se provodi prislanjanjem utiskivača na površinu početnom silom  $F_0$  ( obično oko 100 N ) pri čemu se ostavi utisak  $h_0$  i to se uzima kao ishodišni položaj. Opterećenje se zatim povećava dodatnom silom  $F_1$  ( 1372 N ) do ukupne sile  $F$  ( 1472 N ) – slika 6.1.2. Trajanje opterećenja je do 30 sekundi, te se nakon toga rasterećuje i očitavamo dubinu utiska  $h$ .



Slika 6.1.2. Shematski prikaz HRC metode ispitivanja tvrdoće.

Prednosti ove metode je brzo mjerenje tvrdoće i nije potrebna brižljiva priprema mjerne površine. Nedostatak je slaba selektivnost, odnosno čitavo mjerno područje je od 0 do 100 jedinica HRC, sa nepreciznošću od  $\pm 1,5$  HRC.

## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

### 7.1. Plan pokusa

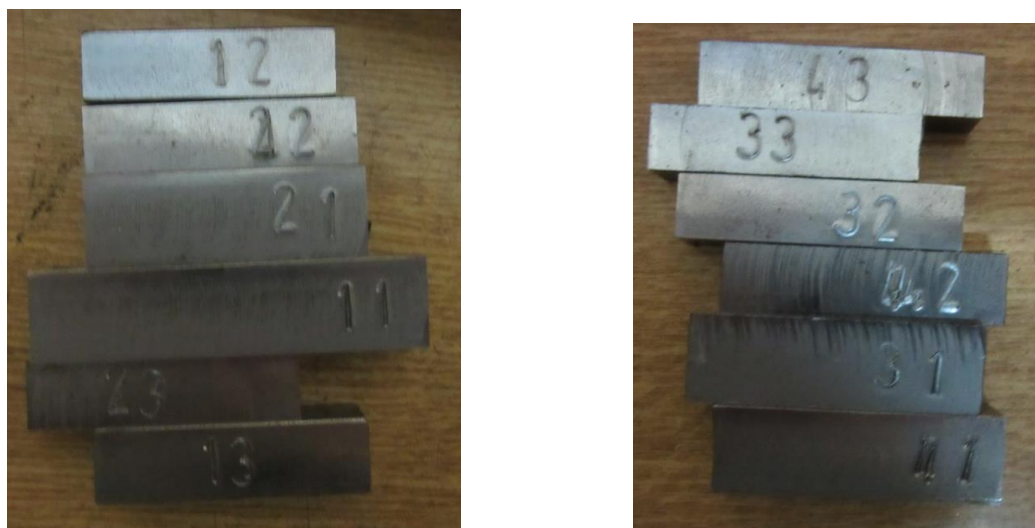
Za eksperimentalni dio određivanja utjecaja pozicioniranja dijelova pri pougljičenju u krutom sredstvu odabrao sam tri različite vrste čelika za cementaciju. Četiri epruvete su izrađene iz nelegiranog čelika Č.1220 ( C – 15 ), četiri iz legiranog čelika Č.4320 ( 16MnCr5 ) i četiri iz Č.5426 ( 14NiCr14 ) - Tablica 7.1.1., ukupno 12 epruveta označenih prema mjestu pozicioniranja – Tablica 7.1.2., Slika 7.1.1.

MATERIJAL	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Č.1220	0,12 – 0,18	< 0,40	0,30 – 0,60	< 0,045	< 0,045	-	-
Č.4320	0,14 – 0,19	< 0,40	1,00 – 1,30	< 0,035	< 0,035	1,80 – 1,10	-
Č.5426	0,11 – 0,17	< 0,40	0,30 – 0,60	< 0,035	< 0,035	1,25 – 1,75	3,25 – 3,75

Tablica 7.1.1. Sastav odabranog čelika.

MATERIJAL	PROBA 1.	PROBA 2.	PROBA 3.	PROBA 4.
Č.1220	1.1	2.1	3.1	4.1
Č.4320	1.2	2.2	3.2	4.2
Č.5426	1.3	2.3	3.3	4.3

Tablica 7.1.2. Oznake probnih uzoraka.



Slika 7.1.1. Pripremljene i označene epruvete.

Kako bi što vjernije prikazao utjecaj pozicije na dubinu pougljičenja i prema mogućnostima pogona topline obrade tvrtke Adriadiesel d.d., odabrao sam dvije pripreme. Prva priprema je bila okruglog oblika  $\Phi 370 \times 400$  mmsa probama 1. i 2., a druga priprema je bila pravokutnog oblika  $400 \times 300 \times 700$  mm sa probama 3. i 4. - slika 7.1.2.





Slika 7.1.2. Korištene pripreme.

Razmještaj epruveta je takav da sam po tri od svakog materijala stavio u sredinu pripreme, a tri uz rub same pripreme, udaljen 20 – 30 mm od same stijenke ruba. Prvo sam posude napunio granulatom – Privitak 1., do otprilike polovice posude, zatim postavio epruvete na odgovarajuća mjesta i dubine i nakon toga se posuda ispunila granulatom gotovo do cijelosti. Ostavljen je samo mali dio na vrhu cca. 40 mm koji se ispunio zemljom da se spriječi doticaj sa okolinom i na to je stavljen odgovarajući poklopac – slika 7.1.3. Pougličenje je rađeno u komornoj peći – slika 7.1.4. pri temperaturi od 880°C. Cijela priprema se prvo grijala do temperature od 880°C a zatim se 4 sata držala na toj temperaturi i to je zapravo vrijeme trajanja pougličanja. Nakon toga sam pripremu izvadio van i pustio se da se ohladi. Cijeli postupak je ponovljen dva puta u jednakim uvjetima, jednom za okruglu a drugi puta za pravokutnu pripremu.



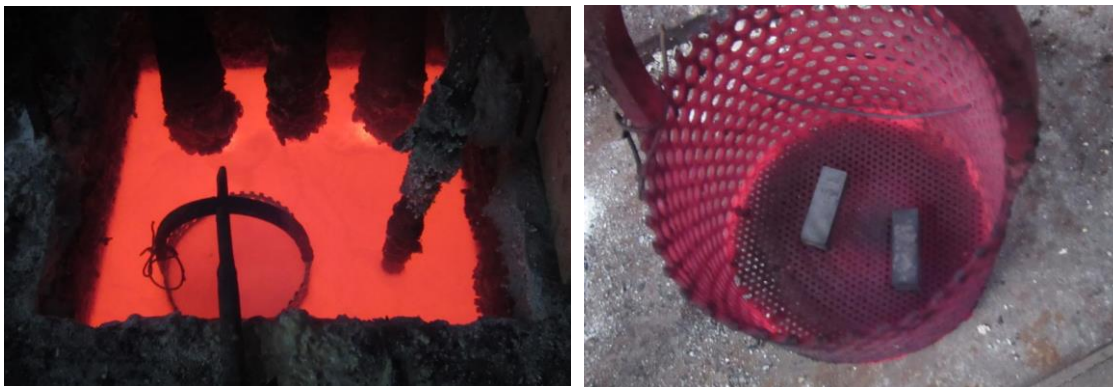
Slika 7.1.3. Razmještaj epruveta u pripremi.



Slika 7.1.4. Komorna peć.

Poslije pougljičenja uslijedilo je kaljenje epruveta – slika 7.1.5. Kaljenje sam provodio tako da sam kalio zajedno po dvije epruvete istog materijala na temperature prema sastavu čelika i to :

- 1.1 i 2.1 na temperaturu  $820^{\circ}\text{C}$  a gašenje je bilo u vodi,
- 1.2 i 2.2 na temperaturu  $840^{\circ}\text{C}$  a gašenje je bilo termalno, u solnoj kupki,
- 1.3 i 2.3 na temperaturu  $810^{\circ}\text{C}$  a gašenje je bilo termalno, u solnoj kupki.



Slika 7.1.5. Kaljenje epruveta.

Osim izbora temperature, sredstvo za gašenje ima isto tako važnu ulogu i bitno je odabrati pravilno sredstvo kako bi se dobile odgovarajuće brzine ohlađivanja materijala što ima za posljedicu pravilnu strukturu i ostala odgovarajuća svojstva – slika 7.1.6.



Slika 7.1.6. Gašenje u vodi i solnoj kupki.



Nakon pougljičenja uslijedilo je niskopopuštanje pri temperaturi od 180 °C i držanju od sat vremena, što je ujedno bio i zadnji korak u procesu cementacije – slika 7.1.7.



Slika 7.1.7. Niskotemperaturno popuštanje.

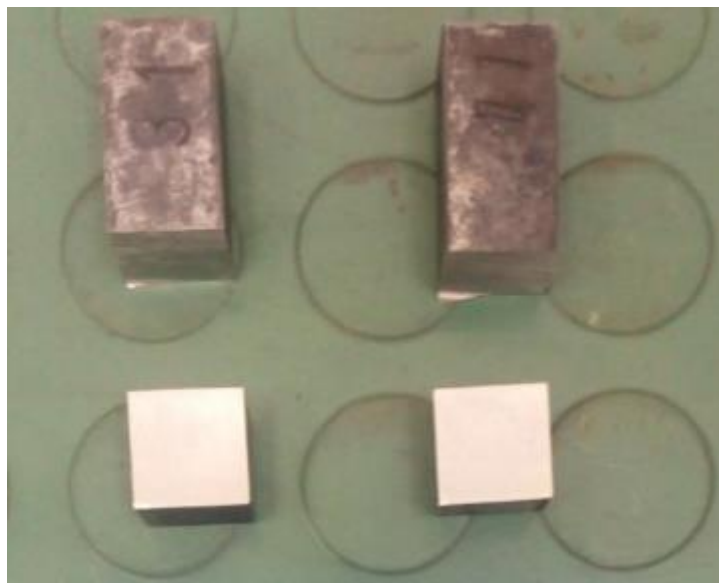
Završetkom procesa niskotemperaturnog popuštanja je završila toplinska obrada, odnosno cementacija epruveta. Sljedeći korak je visokobrzinsko rezanje epruveta, uz odgovarajuće hlađenje, po presjeku kako bi mogli pristupiti ispitivanju – slika 7.1.8. Odrezani dio, prije ispitivanja, sam ispolirao na polirki BUEHLER ECOMET 3 – slika 7.1.9. hrapavosti polirnog papira 400, uz odgovarajuće hlađenje, kako bi površina bila pravilno pripremljena i dobiveni rezultati kvalitetni – slika 7.1.10.



Slika 7.1.8. Visokobrzinsko rezanje epruveta.



Slika 7.1.9. Polirka BUEHLER ECOMET 3.



Slika 7.1.10. Izgled ispolirane površine.

## 7.2. Ispitivanje tvrdoće površine i dubine pougljičenja

Nakon odrađene toplinske obrade i potrebne pripreme materijala za ispitivanje, krenuo sam sa ispitivanjem površinske tvrdoće na uređaju po metodi Rockwell – slika 7.2.1. i dobio sam sljedeće vrijednosti – Tablica 7.2.1. Svako mjerenje sam ponovio tri puta.



Slika 7.2.1. Uređaj za ispitivanje površinske tvrdoće po metodi Rockwell.

PROBA	1. MJERENJE HRC	2. MJERENJE HRC	3. MJERENJE HRC	SREDNJA VRIJEDNOST
1.1	55,5	56	55,5	55,6
2.1	58	59	60,5	59,2
3.1	65	65	64	64,6
4.1	64	64,5	64,5	64,3
1.2	55	55,5	55,5	55,3
2.2	61	60,5	59	60,2
3.2	62	63	63	62,6
4.2	63	62,5	63,1	62,9
1.3	59,5	59,5	59,5	59,5
2.3	58	58	59	58,3
3.3	59	59,5	60	59,5
4.3	59,5	59,5	59,5	59,5

Tablica 7.2.1. Površinska tvrdoća proba – HRC.

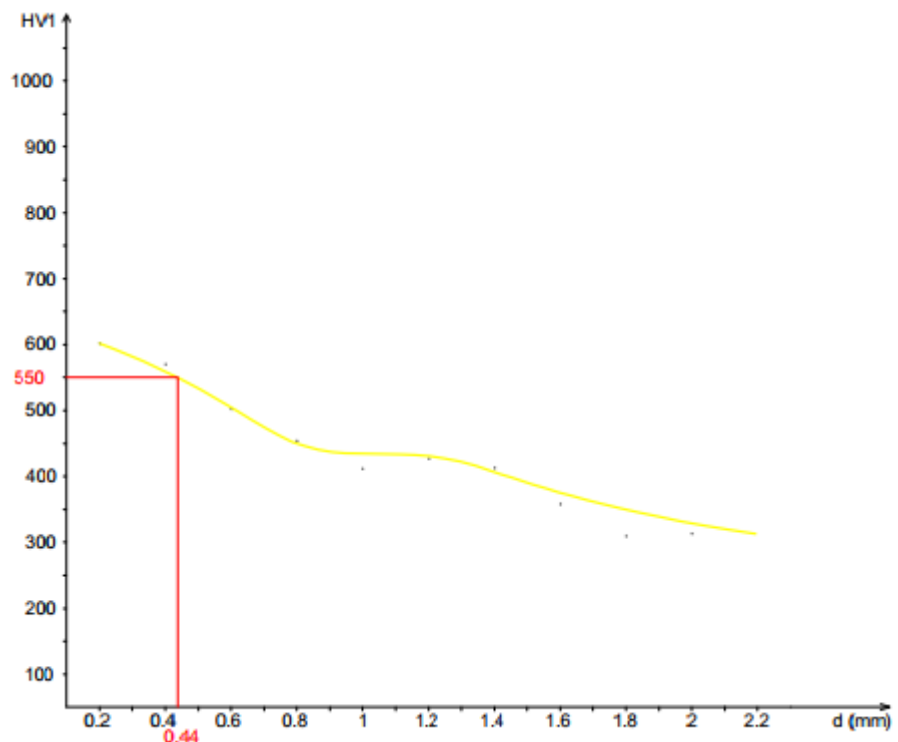
Nakon ispitane površinske tvrdoće, ispitaio sam dubinu pougljičenja na uređaju LEITZ WETZLAR MODEL DURIMET 2 s utegom 1000 pounda ( HV1 ) – slika 7.2.2. Prvo sam izmjerio tvrdoću jezgre ( tri mjerenja po svakoj epruveti ), zatim sam krenuo sam mjerenjem dubine pougljičenja od površine materijala do dubine od 2 mm, odnosno vrijednosti tvrdoće jezgre, s pomakom za 0,20 mm.



Slika 7.2.2. Mjerni uređaj LEITZ WETZLAR MODEL DURIMET 2.

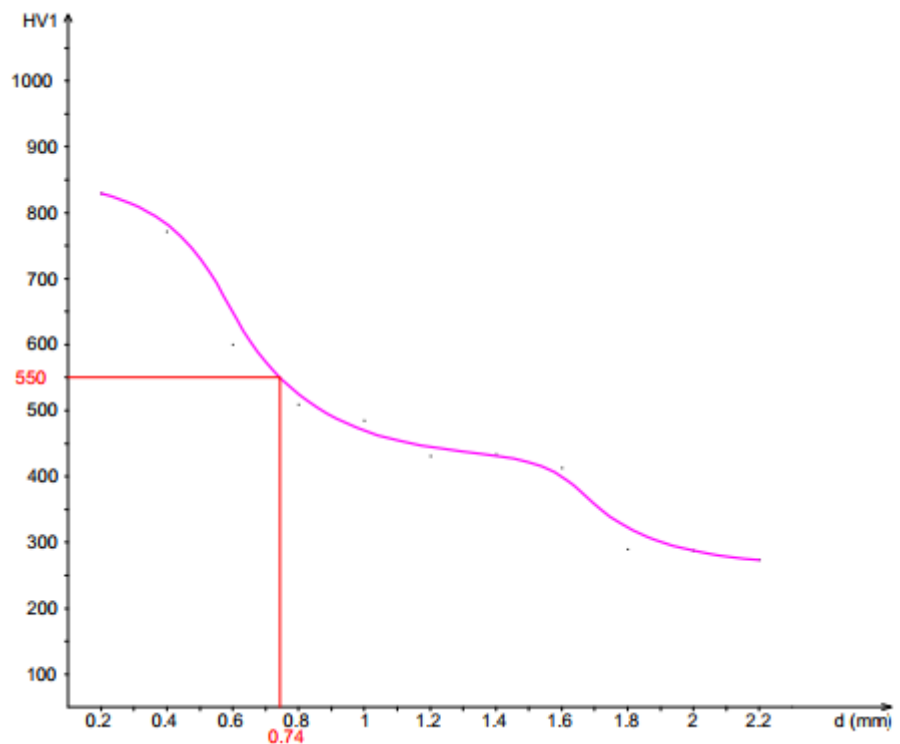
Proba 1.1:

d ( mm )	HV1
0,20	602
0,40	589
0,60	505
0,80	455
1,00	419
1,20	439
1,40	426
1,60	363
1,80	325
2,00	-
Tvrdoća jezgre HV1	
	309
	317
	330



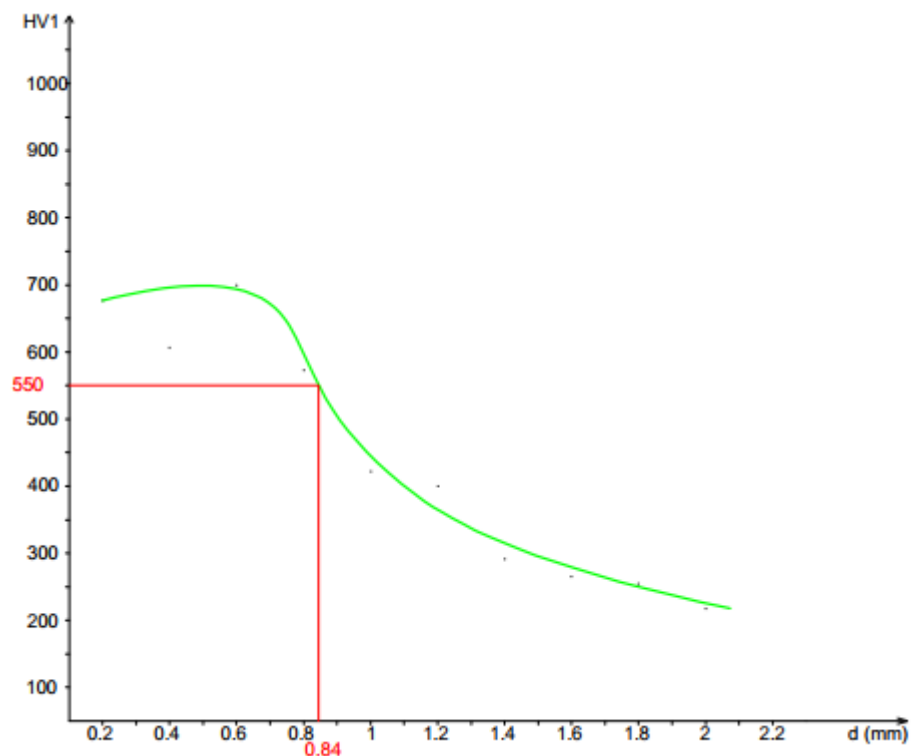
## Proba 2.1:

d ( mm )	HV1
0,20	832
0,40	772
0,60	602
0,80	524
1,00	482
1,20	439
1,40	439
1,60	419
1,80	395
2,00	395
Tvrdoća jezgre HV1	
	384
	401
	368



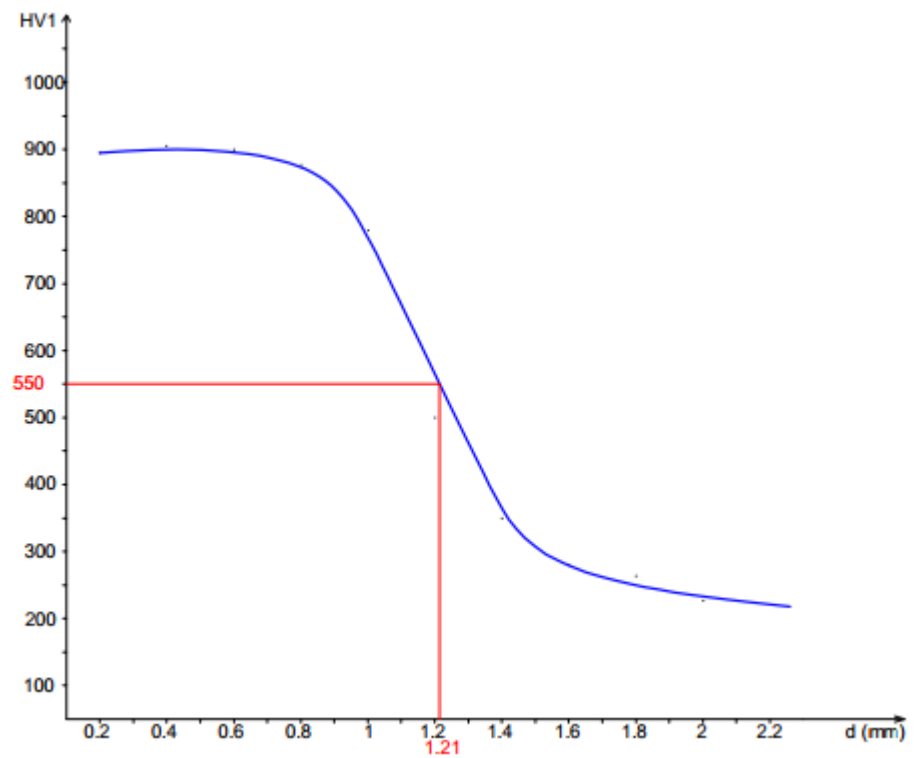
## Proba 3.1:

d ( mm )	HV1
0,20	686
0,40	608
0,60	699
0,80	571
1,00	413
1,20	401
1,40	290
1,60	279
1,80	267
2,00	239
Tvrdoća jezgre HV1	
	237
	234
	267



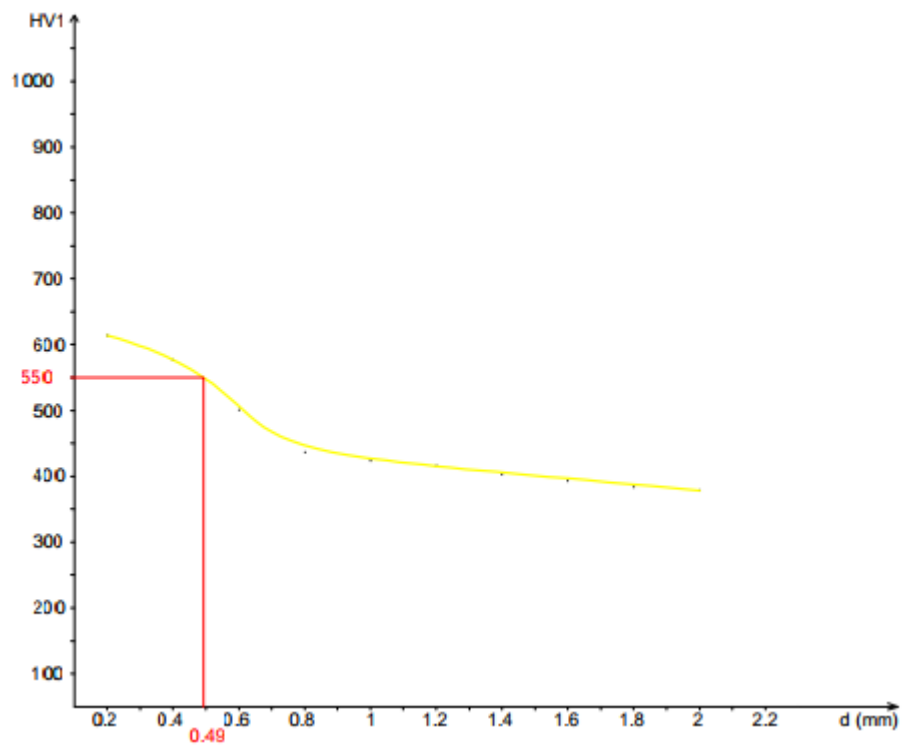
## Proba 4.1:

d ( mm )	HV1
0,20	892
0,40	916
0,60	900
0,80	884
1,00	785
1,20	498
1,40	343
1,60	286
1,80	266
2,00	239
Tvrdoća jezgre HV1	
	234
	234
	231



## Proba 1.2:

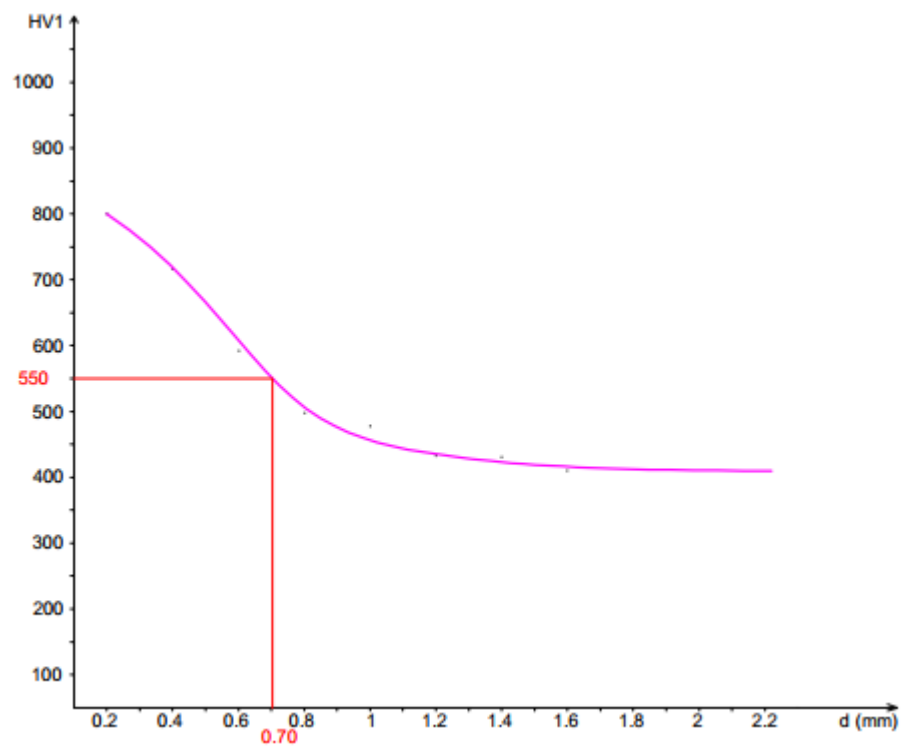
d ( mm )	HV1
0,20	624
0,40	574
0,60	501
0,80	439
1,00	426
1,20	419
1,40	407
1,60	395
1,80	-
2,00	-
Tvrdoća jezgre HV1	
	389
	373
	395





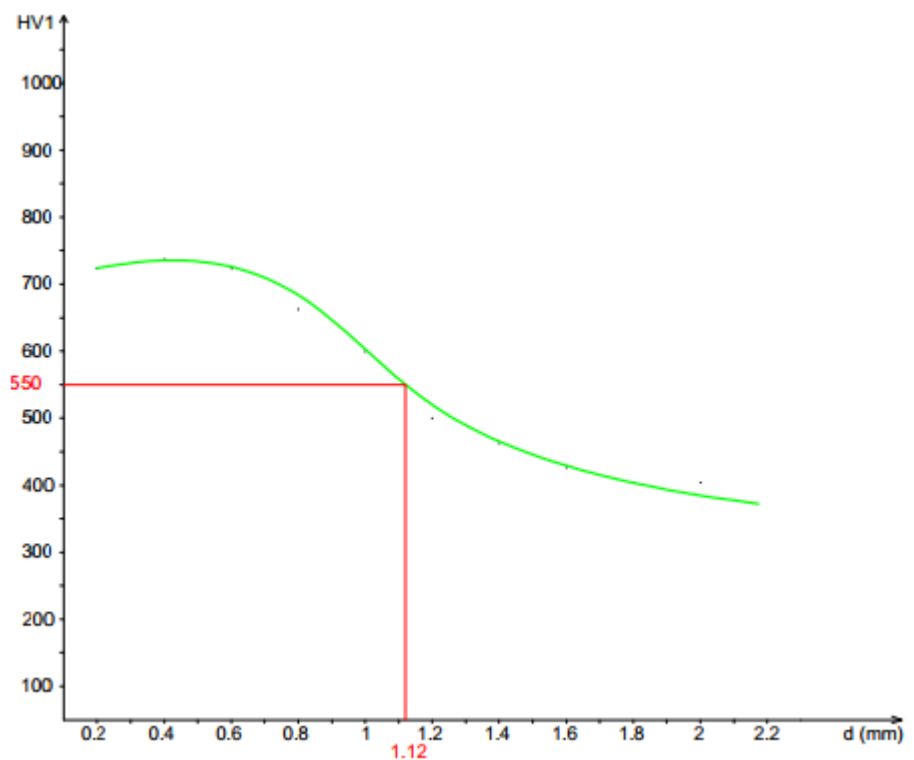
## Proba 2.2:

d ( mm )	HV1
0,20	805
0,40	727
0,60	591
0,80	498
1,00	467
1,20	439
1,40	439
1,60	-
1,80	-
2,00	-
Tvrdoća jezgre HV1	
	460
	439
	467



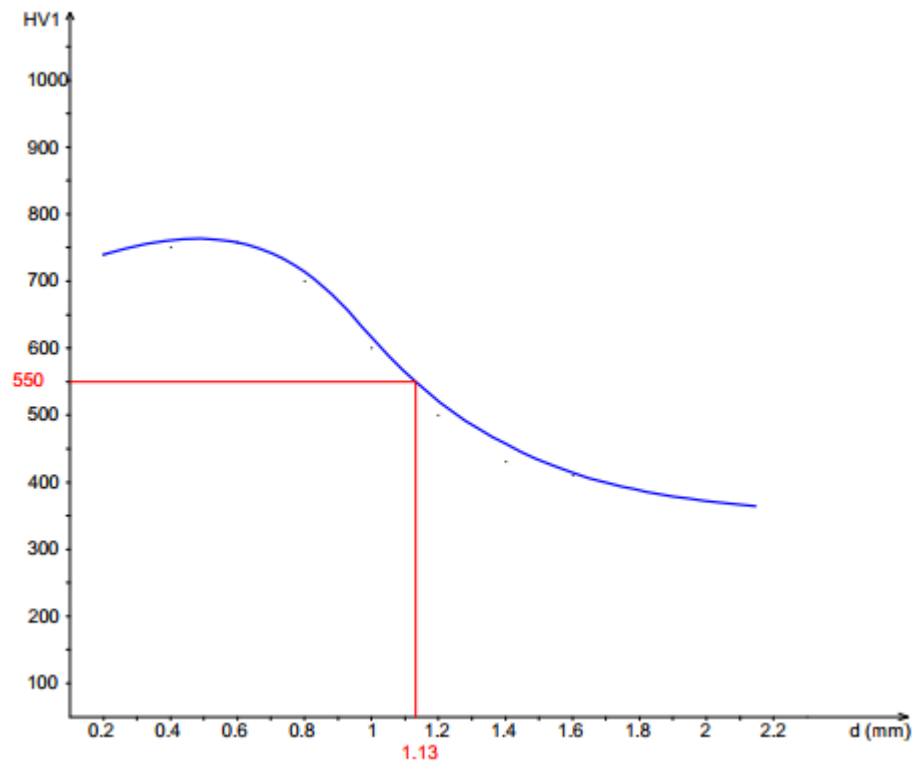
## Proba 3.2:

d ( mm )	HV1
0,20	727
0,40	742
0,60	727
0,80	660
1,00	602
1,20	507
1,40	467
1,60	439
1,80	389
2,00	389
Tvrdoća jezgre HV1	
	389
	353
	231



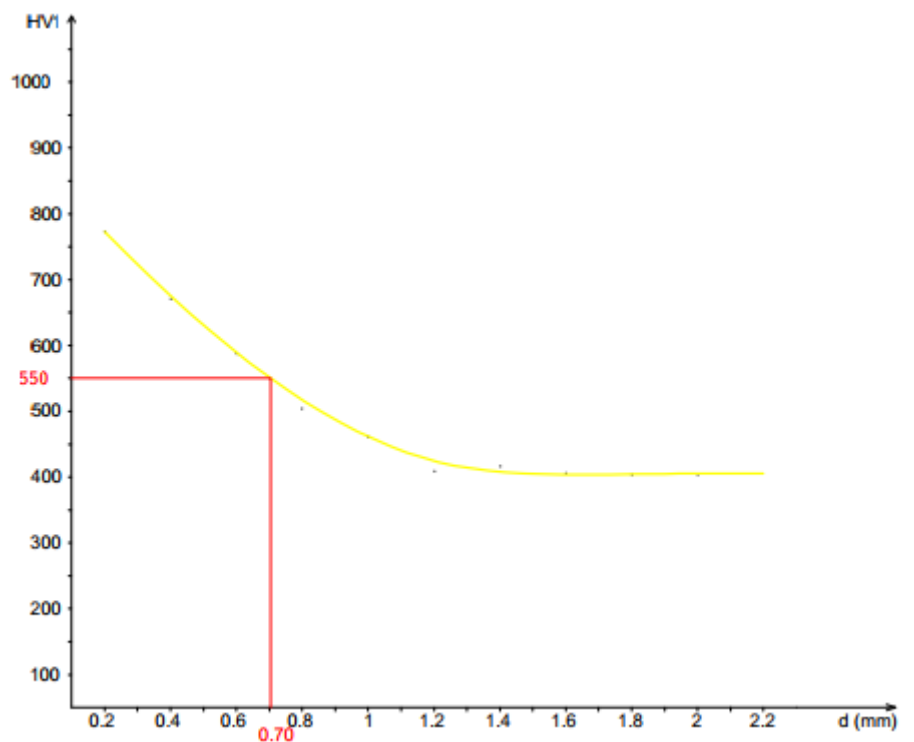
## Proba 4.2:

d ( mm )	HV1
0,20	743
0,40	750
0,60	764
0,80	700
1,00	605
1,20	508
1,40	439
1,60	413
1,80	-
2,00	-
Tvrdoća jezgre HV1	
	420
	419
	413



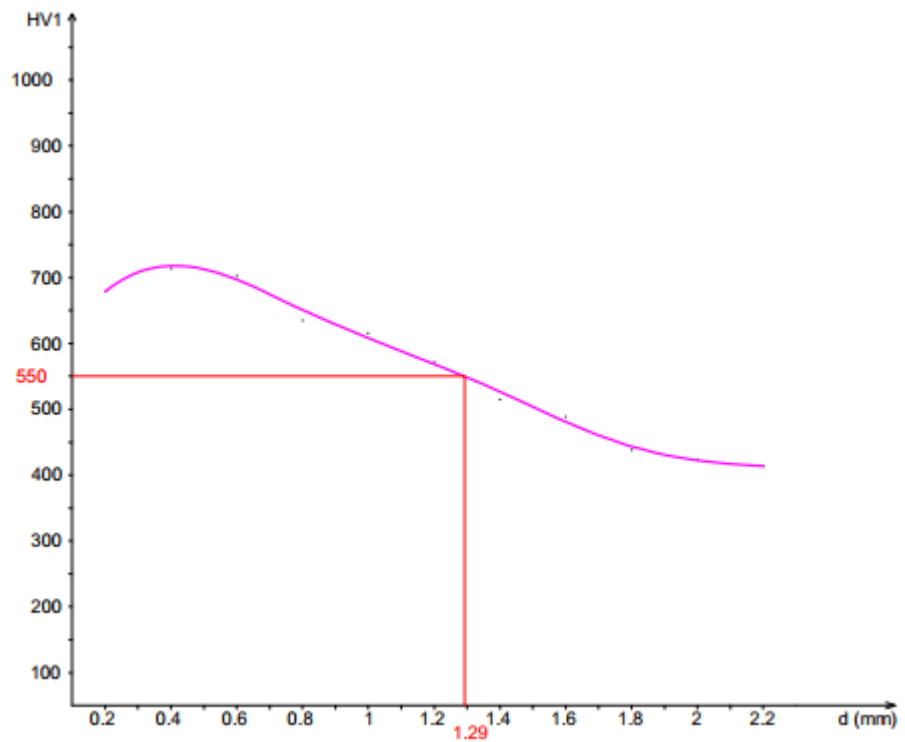
## Proba 1.3:

d ( mm )	HV1
0,20	779
0,40	673
0,60	591
0,80	515
1,00	460
1,20	413
1,40	419
1,60	-
1,80	-
2,00	-
Tvrdoća jezgre HV1	
	407
	413
	419



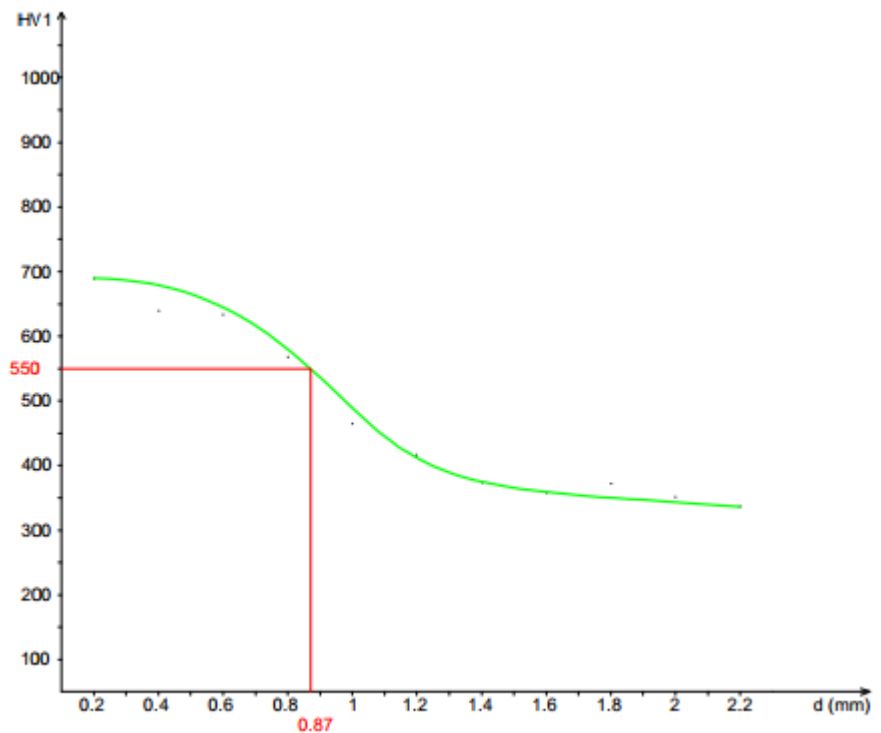
## Proba 2.3:

d ( mm )	HV1
0,20	686
0,40	727
0,60	713
0,80	648
1,00	624
1,20	581
1,40	524
1,60	482
1,80	439
2,00	426
2,20	419
Tvrdoća jezgre HV1	
419	
413	
413	



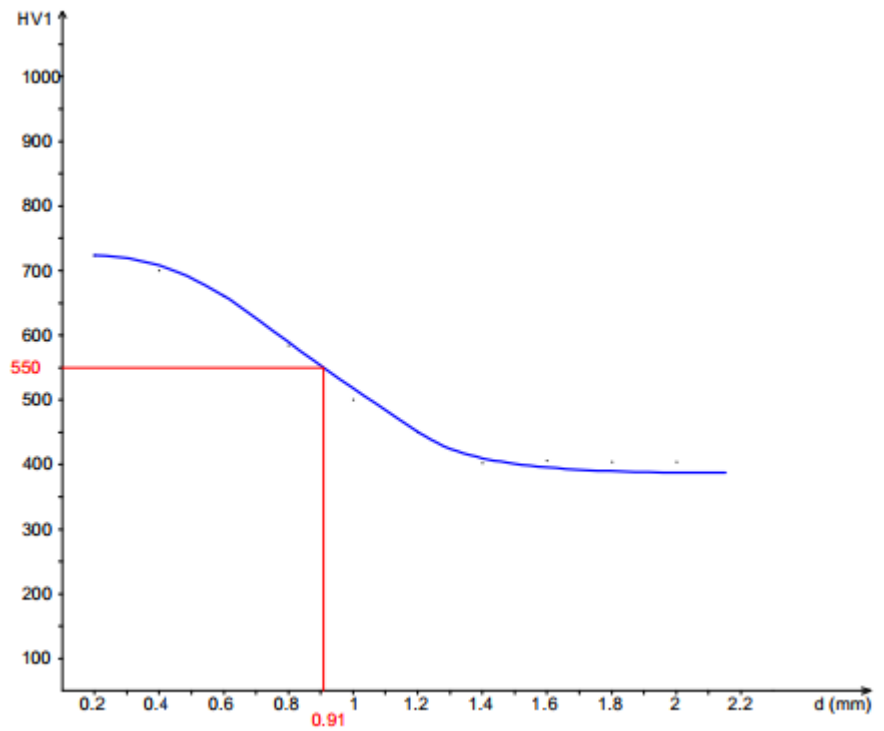
## Proba 3.3:

d ( mm )	HV1
0,20	686
0,40	648
0,60	636
0,80	571
1,00	467
1,20	432
1,40	378
1,60	368
1,80	373
2,00	363
2,20	348
Tvrdoća jezgre HV1	
343	
353	
353	



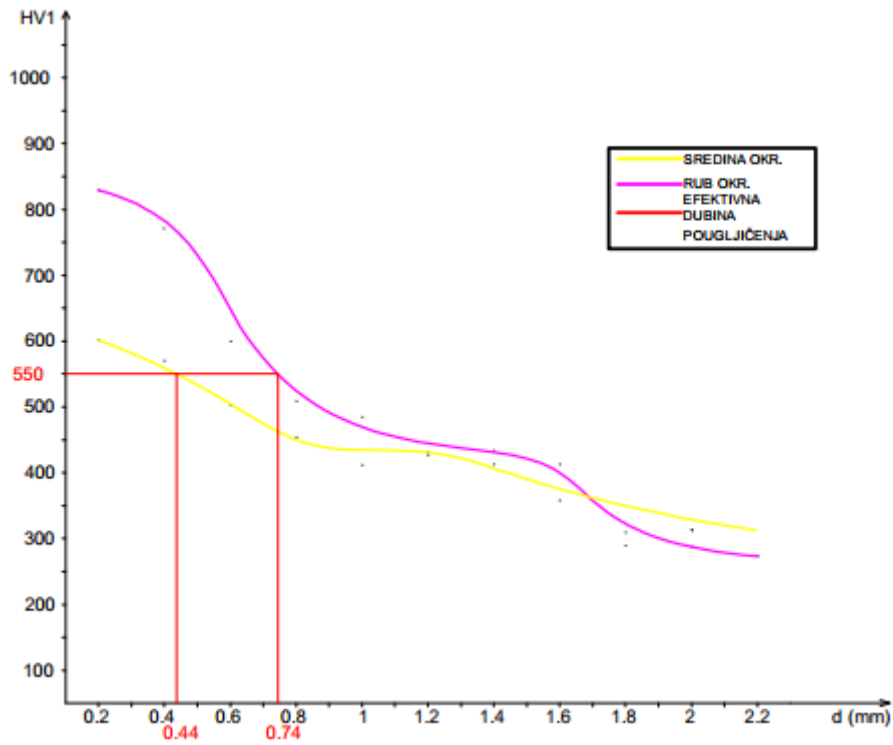
## Proba 4.3:

d ( mm )	HV1
0,20	727
0,40	699
0,60	660
0,80	591
1,00	498
1,20	453
1,40	413
1,60	-
1,80	-
2,00	-
Tvrdoća jezgre HV1	
	439
	426
	419

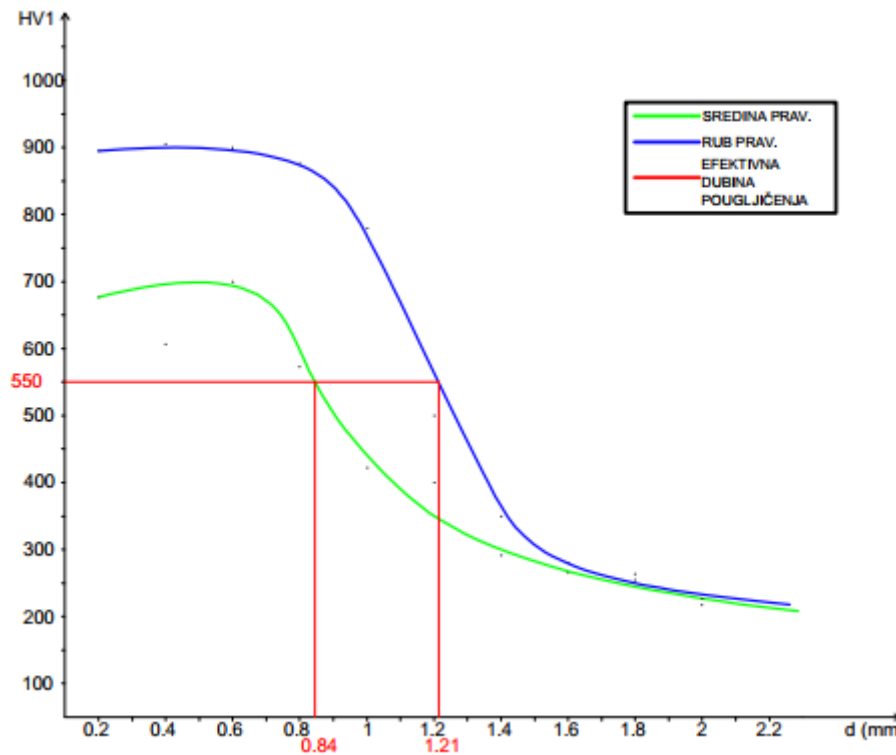


### 7.3 Analiza rezultata

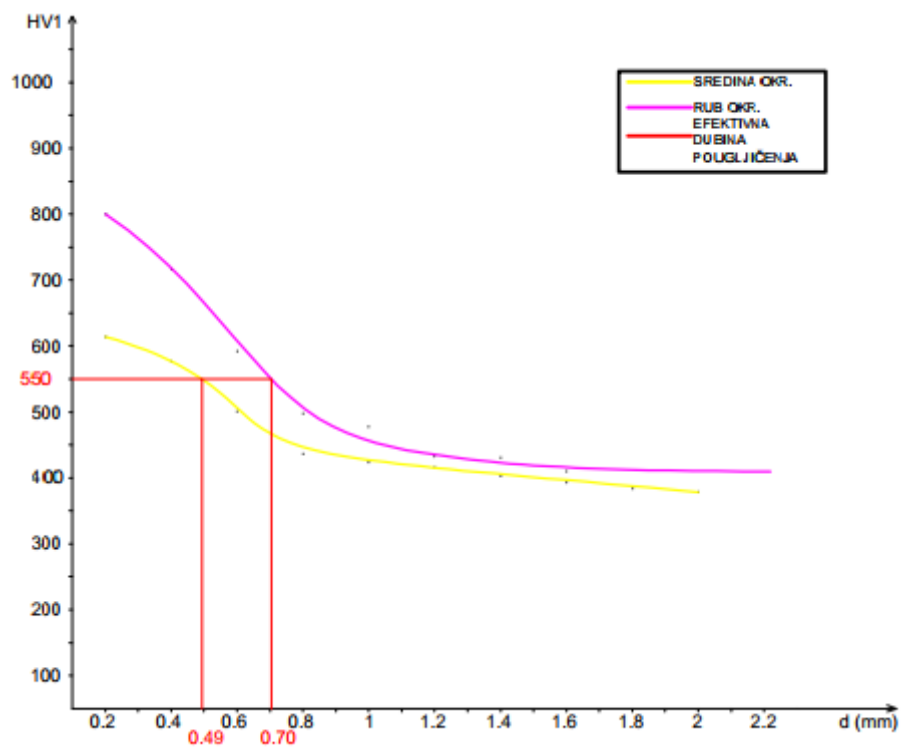
Uzorci 1.1 i 2.1:



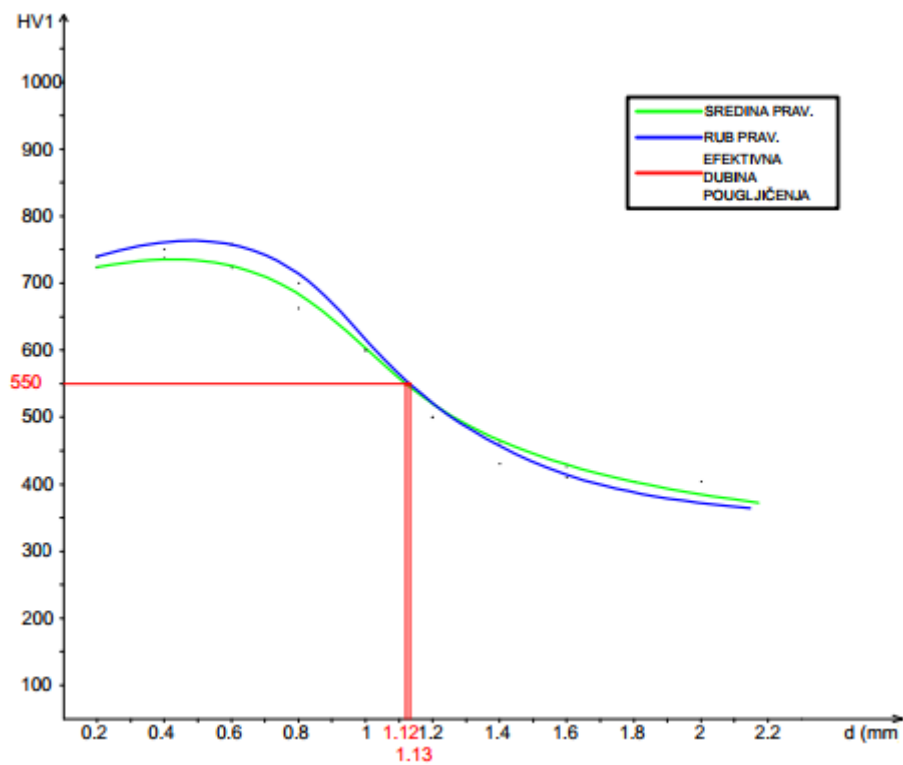
Uzorci 3.1 i 4.1:



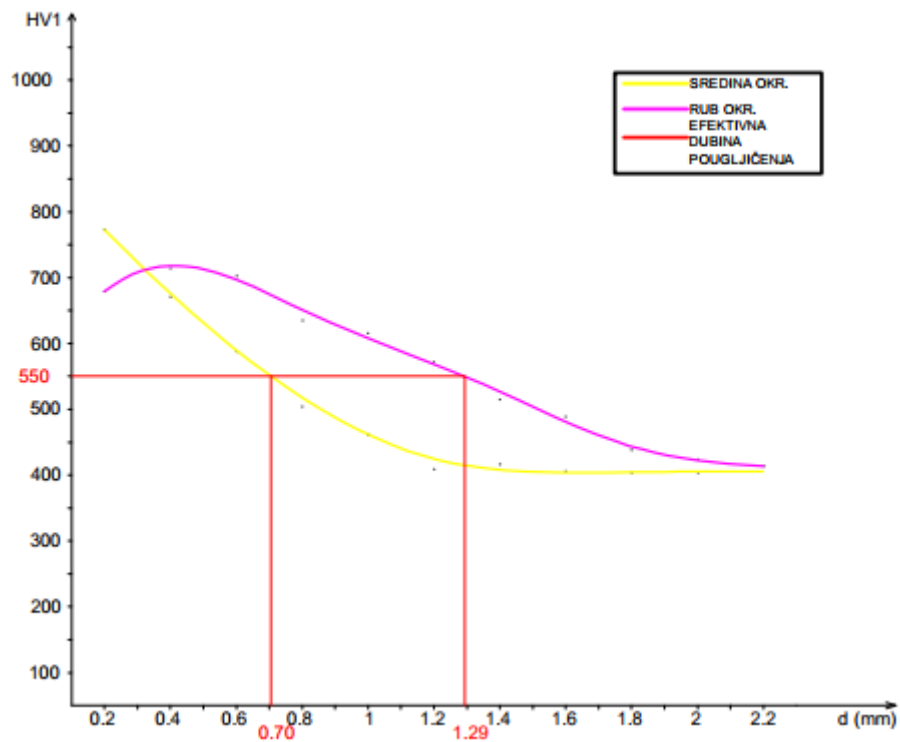
Uzorci 1.2 i 2.2:



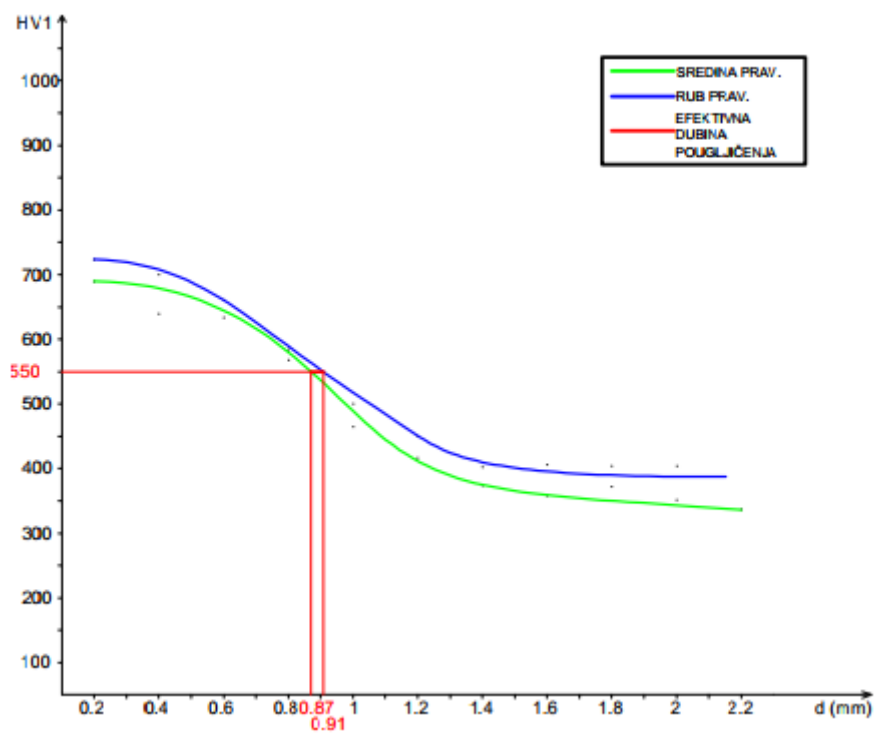
Uzorci 3.2 i 4.2:



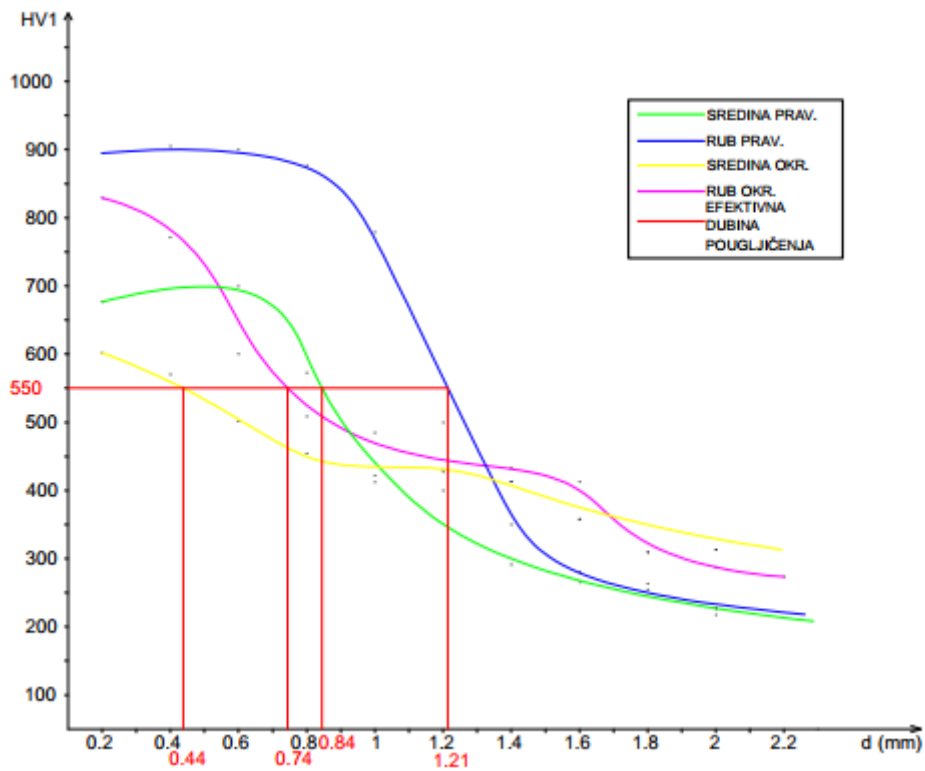
Uzorci 1.3 i 2.3:



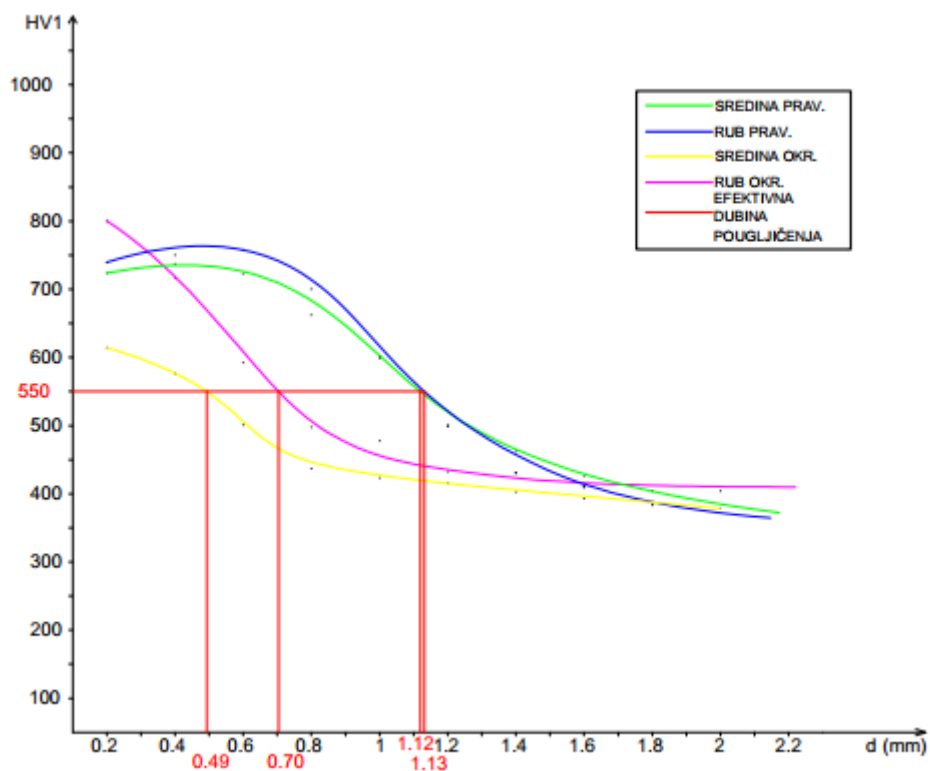
Uzorci 3.3 i 4.3:



Zajednički dijagrami za materijal Č.1221 – slika 7.3.1., Č.4320 – slika 7.3.2., Č.5426 – slika 7.3.3.

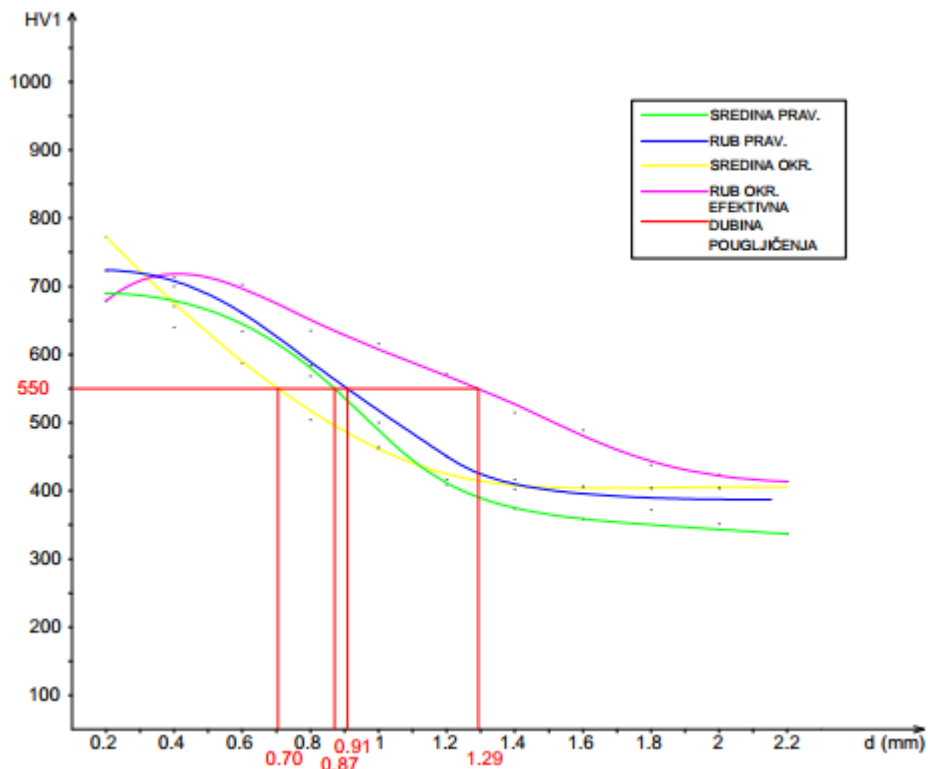


Slika 7.3.1. Dijagram epruveta od čelika Č.1221.



Slika 7.3.2. Dijagram epruveta od čelika Č.4320.





Slika 7.3.3. Dijagram epruveta od čelika Č.5426.

Za 1. dijagram vidljive su razlike u dubini pougljičavanja i to se ističe čak 1,21 mm efektivna dubina pougljičavanja uz rub naspram 0,84 mm za smještaj u sredini pravokutne pripreme. Za okruglu pripremu su nešto manje vrijednosti i to 0,74 mm za rub prema 0,44 mm sredina.

Za 2. dijagram je vidljivo kako postoji mala razlika između epruvete uz rub i epruvete iz sredine pravokutne pripreme i to 1,13 mm prema 1,12 mm. Kod okrugle pripreme postoje nešto veće razlike između epruvete uz rub i epruvete iz sredine pripreme i to 0,70 mm prema 0,49 mm.

Treći dijagram nam pokazuje razliku od čak 0,59 mm efektivne dubine pougljičenja za okruglu pripremu, rub ima 1,29 mm a sredina 0,70 mm. Pravokutna priprema uz rubni dio ima 0,91 mm a u sredini 0,87 mm efektivnu dubinu pougljičavanja.

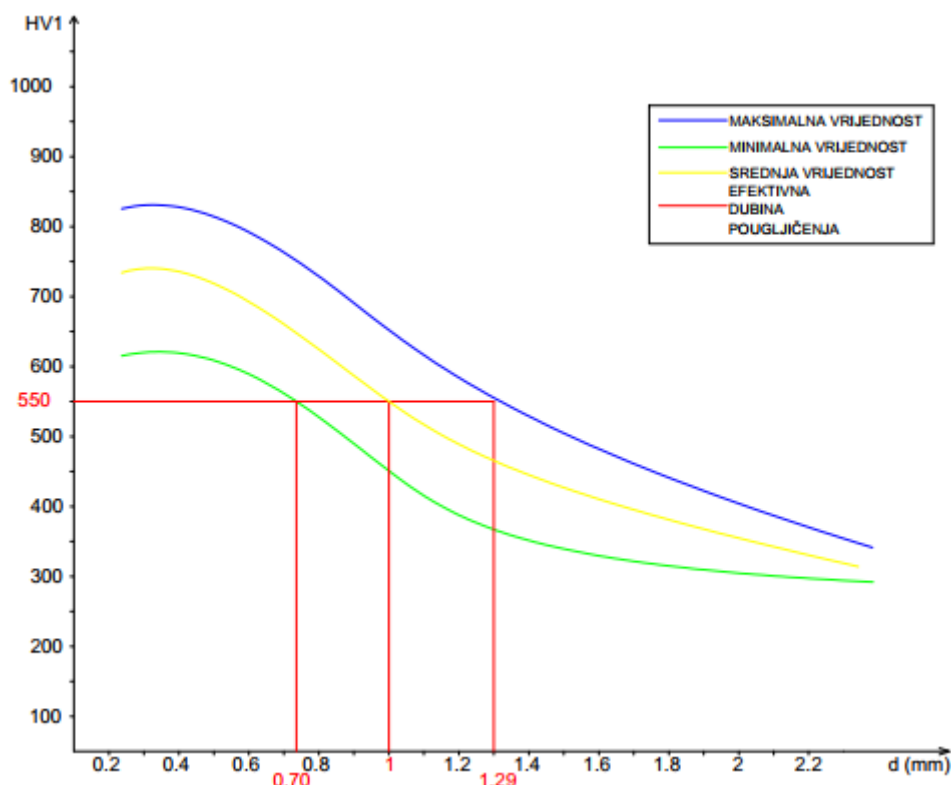
Najveća mikrotvrdoća na površini materijala je postignuta kod čelika Č.1221 od 892, odnosno 916 jedinica Vikersa i drugu po veličini efektivnu dubinu pougljičenja od 1,21 mm. Najveća efektivna dubina pougljičavanja je postignuta za čelik Č.5426 od 1,29 mm te se kod ovog materijala pokazuje najmanje rasipanje rezultata mjerenja. Kod ovog materijala, vrijednosti mikrotvrdoće su između 680 i 780 HV. Za čelik Č.4320 vidimo kako ima najmanju efektivnu vrijednost od ova tri čelika od 1,12 mm, odnosno 1,13 mm. Vrijednosti mikrotvrdoće su između 620 i 800 HV.

## 8. ZAKLJUČAK

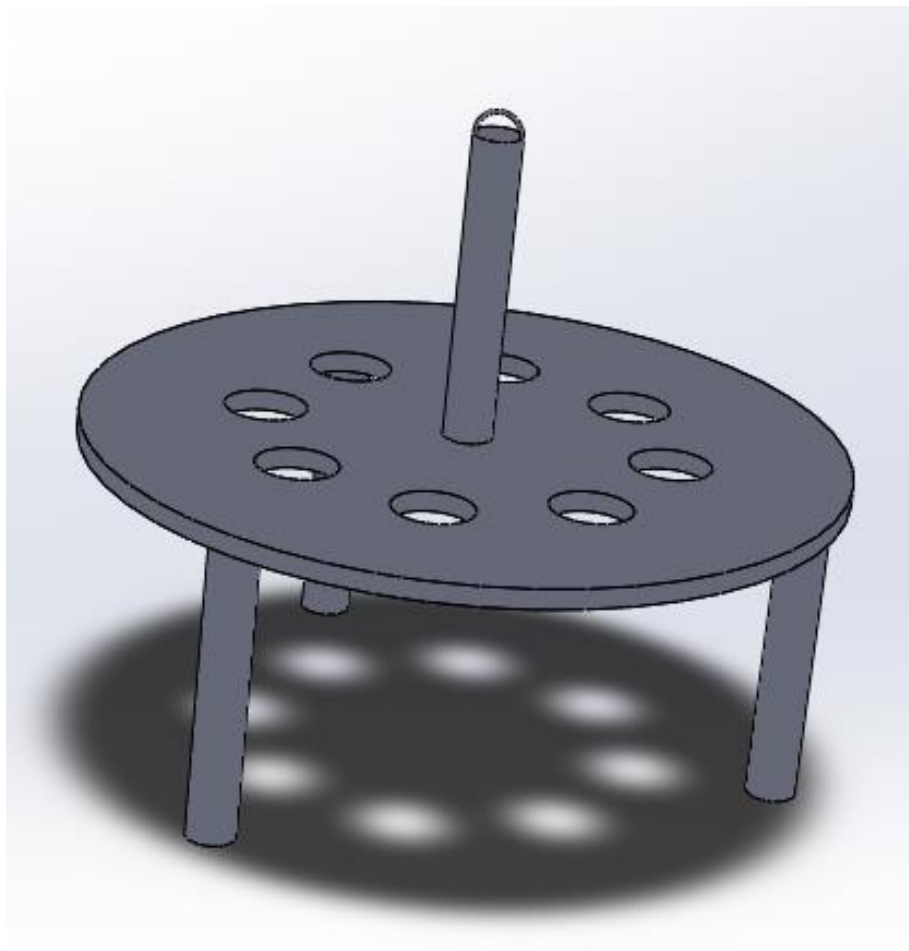
Analizom dobivenih rezultata mjerenja vidimo razliku u dobivenim vrijednostima efektivne dubine pougljičavanja koja je u prvom redu ovisna o temperaturi, trajanju pougljičavanja i sredstvu za pougljičavanje. Kako je vrijeme pougljičavanja i korišteno sredstvo jednako za sve procese, jedino temperatura je ta koja utječe u najvećoj mjeri na dubinu. Povodom toga se može opravdano sumnjati na homogenost peći koja zbog korištenosti i starosti opreme trebala bi proći određen remont. Jednako tako je vidljivo kako različiti oblici pripreme utječu na temperaturu a ujedno i na dubinu pougljičavanja. Naime, ne zagrijavaju se svi dijelovi jednakom brzinom i s jednakom količinom dovedene topline jer okrugla priprema omogućava jednak pristup topline sa svih strana dok kod pravokutne pripreme to nije slučaj jer kutevi, za razliku od stranica, daju drugačiji pristup toplini. Jednako tako, kemijski sastav i legiranost materijala utječu na postizanje različitih vrijednosti mikrotvrdoća i efektivnih dubina pougljičavanja.

Usporedbom minimalnih i maksimalnih vrijednosti mikrotvrdoće postoji mogućnost korigiranja dobivenih vrijednosti i eliminacija razlike u udaljenosti materijala od ruba prema središtu pripreme te optimalnijim razmještajem utječemo na povoljnije i jednoličnije dubine pougljičavanja.

Prijedlog konstrukcije držača materijala na temelju minimalnih i maksimalnih vrijednosti mikrotvrdoće – slika 8.1. Temeljem tog dijagram se izradi konstrukcija držača koja omogućava takav razmještaj dijelova kod kojeg će se dobiti optimalnije vrijednosti – slika 8.2.



Slika 8.1. Dijagram srednje vrijednosti mikrotvrdoće okrugle probe.



Slika 8.2. Skica prijedloga konstrukcije držača strojnih dijelova.

## 9. LITERATURA

- [1] Liščić, B.: Termokemijski postupci, Metalbiro Zagreb, 1981.
- [2] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tisak "Kratis" Zagreb, 1997.
- [3] Stupnišek, M., Cajner, F.: Osnove toplinske obrade metala, FSB Zagreb, 2001.
- [4] Kožuh, S.: Specijalni čelici – skripta, Sisak, 2010.
- [5] Filetin, T., Kovačićek, F.: Svojstva i primjena materijala, FSB Zagreb, 2002.
- [6] Matković, T., Matković, P.: Fizikalna metalurgija 1 – skripta, Sisak, 2009.
- [7] Stupnišek, M., Matijević, B.: Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja, FSB Zagreb, 2000.