

UTJECAJ TEMPERATURE NA DUBINU POUGLJIČENJA

Pinjušić, Katarina

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:128:629487>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



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
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Katarina Pinjušić

UTJECAJ TEMPERATURE NA DUBINU POUGLJIČENJA

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2020.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Katarina Pinjušić

UTJECAJ TEMPERATURE NA DUBINU POUGLJIČENJA

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Tomislav Božić dipl.ing.stroj.

Karlovac, 2020.

	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Trg J.J.Strossmayera 9 HR - 47000, Karlovac, Croatia Tel. +385 - (0)47 - 843-500 Fax. +385 - (0)47 - 843-503 e-mail: dekanat @ vuka.hr	Klasa: 602-11/18-01/ ____ Ur.broj: 2133-61-04-18-01	
	ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA	Datum:	

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Ime i prezime	Katarina Pinjušić		
OIB / JMBG			
Adresa	Križ		
Tel. / Mob./e-mail			
Matični broj studenta	0110614043		
JMBAG			
Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija)	<input checked="" type="checkbox"/> preddiplomski <input type="checkbox"/> specijalistički diplomski		
Naziv studija	Stručni studij strojarstva		
Godina upisa	2014.		
Datum podnošenja molbe			
Vlastoručni potpis studenta/studentice			

Naslov teme na hrvatskom: Utjecaj temperature na dubinu pougljičenja	
Naslov teme na engleskom: The influence of temperature on the depth of carburizing	
Opis zadatka: Završni rad sastoji se od dva dijela, teoretskog i praktičnog (eksperimentalnog). U teoretskom dijelu rada opisati sve vrste čelika koje će se koristiti u eksperimentalnom dijelu, radi se o čelicima za cementaciju različitih osnovnih kemijskih sastava (Č.1221; Č 4320 i Č.5426). U nastavku teoretske razrade zadatka obraditi elementarno iz područja termodifuzije ugljika u krutim sredstvima (granulatu). U eksperimentalnom (praktičnom) dijelu rada sukladno zadanom planu pokusa provođenja eksperimenta, analizirati utjecaj temperatura procesa na dubine difuzija. Temeljem rezultata ispitivanja analizirati utjecaj temperature pougljičenja za svaki čelik kao i svake pojedinačne temperature na sve korištene čelike. Zadatak izvršiti sukladno pravilniku za izradu završnih radova VuKa.	
Mentor:	Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad pod naslovom „Utjecaj temperature na dubinu pougljičenja“ izradila samostalno koristeći se navedenim izvorima podataka i znanjem stečenim tijekom studija Strojарstva na Veleučilištu u Karlovcu pod mentorstvom Tomislava Božićа, dipl.ing.stroj.

Katarina Pinjušić

ZAHVALA

Zahvaljujem se svom mentoru Tomislavu Božiću, dipl.ing.stoj. što mi je omogućio izradu ovog završnog rada, kao i na pruženoj stručnoj pomoći. Zahvaljujem se tvrtki Adriadiesel d.d. na tehničkoj podršci pri izradi eksperimentalnog dijela ovog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na razumijevanju i velikoj podršci koju su mi pružili tijekom studiranja.

Naslov: UTJECAJ TEMPERATURE NA DUBINU POUGLJIČENJA

SAŽETAK

Ovim završnim radom ispitan je utjecaj temperature na dubinu pougljičenja. Korišteni materijali su čelici za cementaciju C-15E, 16MnCr5 i 15CrNi13 kao pokazatelji utjecaja kemijskog sastava i legirnih elemenata na dubinu pougljičenja.

U teorijskom dijelu rada opisani su čelici za cementaciju, termodifuzijski postupci obrade, proces toplinske obrade cementacije s naglaskom na pougljičenje. U eksperimentalnom djelu predstavljen je plan izvođenja pokusa, priprema radnih komada, tijekom proces toplinske obrade pougljičenja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja te izvođenje mehaničkih ispitivanja sa analizom dobivenih rezultata. Postignutom analizom izveden je zaključak kako temperatura utječe na dubinu pougljičenja.

Ključne riječi: pougljičenje, dubina pougljičenja, C-15E, 16MnCr5, 15CrNi13.

Title: THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE DEPTH OF CARBURIZING

SUMMARY

This final paper examined the influence of temperature on the depth of carbonization. The material used is cementing steel C-15E, 16MnCr5, 15CrNi13 as an indicator of the influence of chemical composition and alloying elements on the depth of carbonization.

In the theoretical part is given a overview of cementing steels, thermodiffusion processing procedures, the process of heat treatment of cementation with emphasis on carbonisation. In the experimental part, the plan of the experiment, preparation of the work pieces, the progresss of the process of heat treatment of carbonisation, tempering and low temperature yielding and the performance of mechanical tests with the analysis of the obtained results are presented. The archived analysis concluded that temperature affected on the depth of carbonization.

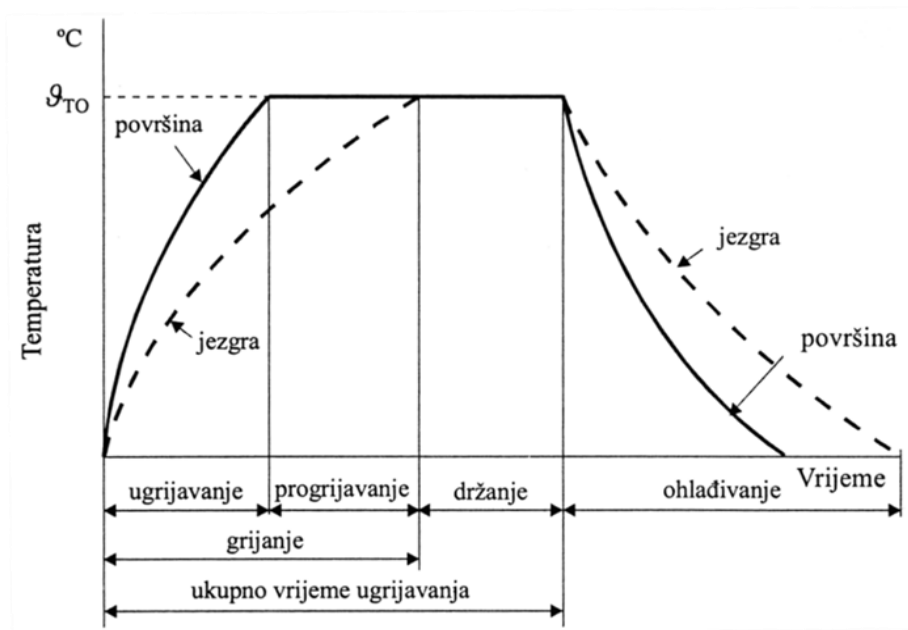
Keywords: carburizing, depth of carburizing, C-15E, 16MnCr5, 15CrNi13.

SADRŽAJ

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA	I
IZJAVA	II
ZAHVALA	III
SAŽETAK	IV
SUMMARY	V
1. UVOD.....	1
2. ČELICI ZA CEMENTACIJU	2
3. TERMODIFUZIJSKA (TERMOKEMIJSKA) TOPLINSKA OBRADA	6
4. CEMENTACIJA	7
5. POUGLJIČENJE	9
5.1. DUBINA POUGLJIČENJA	12
5.2. POUGLJIČENJE U KRUTOM SREDSTVU	14
5.3. POUGLJIČENJE U TEKUĆIM SREDSTVIMA	17
5.4. POUGLJIČENJE U PLINOVITIM SREDSTVIMA	18
5.5. VAKUUMSKO POUGLJIČENJE	20
5.6. PLAZMA POUGLJIČENJE.....	20
6. KALJENJE	21
6.1. DIREKTNO KALJENJE	23
6.2. JEDNOSTRUKO KALJENJE	24
6.3. DVOSTRUKO KALJENJE.....	25
7. NISKOTEMPERATURNO POPUŠTANJE.....	26
8. EKSPERIMENTALNI DIO.....	27
8.1. EKSPERIMENTALNI MATERIJAL	27
8.2. PLAN EKSPERIMENTALNOG DIJELA.....	29
8.3. PROCES TOPLINSKE OBRADE – CEMENTACIJA.....	30
8.4. ISPITIVANJE TVRDOĆE I DUBINE POUGLJIČENJA.....	36
10. ZAKLJUČAK.....	60
LITERATURA	61
POPIS OZNAKA.....	62
POPIS SLIKA	63
POPIS TABLICA.....	65

1. UVOD

Toplinska obrada definira se kao postupak u kojem se neki materijal podvrgava djelovanju temperaturno-vremenskim ciklusima u svrhu promjene postojeće i postignuću željene mikrostrukture, a time i željenih (mehaničkih, kemijskih, fizikalnih...) svojstava. Kod toplinske obrade najvažniji parametri su temperatura i vrijeme pomoću kojih se crta dijagram postupka toplinske obrade. [1]



Slika 1. Opći dijagram procesa toplinske obrade [1]

Cilj termokemijske toplinske obrade je promjena kemijskog sastava površine (cementiranje ili pougljičenje, nitriranje ili dušičenje, boriranje, karbonitriranje i dr.).

U ovom radu kratko će se opisati čelici za cementaciju te termodifuzijski procesi. Detaljnije će se obraditi proces cementacije s naglaskom na pougljičenje. U eksperimentalnom dijelu objasniti će se odnos dubine pougljičenja i temperature kod tri vrste čelika za cementaciju.

2. ČELICI ZA CEMENTACIJU

Čelici za cementaciju predstavljaju konstrukcijske čelike kojima se nakon obrade odvajanjem čestica pougličava rubni sloj. Nakon pougličavanja rubnog sloja provodi se kaljenje kako bi se postigla visoka otpornost na trošenje rubnih slojeva, te povišena žilavost niskouglične jezgre. Čelici za cementaciju uglavnom sadrže 0,1 – 0,2% ugljika prije pougličavanja, a mogu biti ili nelegirani ili niskolegirani. Nakon pougličavanja rubni sloj sadrži 0,8 – 0,9% ugljika, te se postupkom kaljenja postiže tvrdoća 61 – 64 HRC. [1]

Čelici za cementaciju mogu se podijeliti u tri grupe (tablica 1):

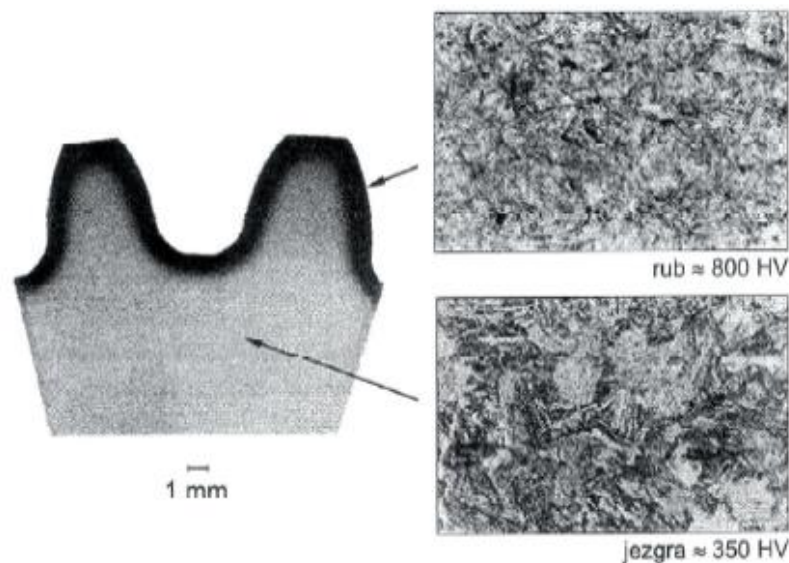
- kvalitetni čelici (npr. C10 i C15),
- nelegirani plemeniti čelici (npr. Ck10 i Ck15),
- legirani plemeniti čelici (npr. 15Cr3, 16MnCr5 itd.)

Tablica 1. Čelici za cementaciju [2]

Oznaka čelika	Sastav „ostalo“ %	Tvrdoća u isporučenom stanju, HB	Slijepo kaljeno 30mm			Kaljenje	
			R _{p 0,2} , N/mm ² min	R _m , N/mm ²	A ₅ , % min	Jezgra, °C	Rub, °C
C10 C15	- -	90-126 103-140	295 355	490-640 590-790	16 14	880-920;voda	-
Ck10 Ck15	- -	90-126 103-140	295 355	490-640 590-790	16 14	880-920;voda	-
15Cr3	-	118-160	440	690-890	11	870-900;voda, ulje	-
16MnCr5	1Cr	140-187	590	780-1080	10	850-880;ulje	810-840;ulje
20MnCr5	1,2Cr	152-201	685	980-1280	7	850-880;ulje	810-840;ulje
20CrMo5	0,25Mo 1,1Mn	152-201	785	1080-1380	7	850-880;ulje	810-840;ulje
20MoCr4	0,4Cr	140-187	590	780-1080	10	890-920;ulje	-
15CrNi6	1,5Ni	152-201	635	880-1180	9	840-870;ulje	800-830;ulje
18CrNi8	2Ni	170-217	785	1180-1430; ulje	7	840-870;ulje	800-830; ulje

Prema masenom udjelu nečistoća čelici za cementaciju spadaju u kvalitetne i plemenite čelike. Razlika među njima je u tome da plemeniti čelici sadrže manji maseni udio sumpora i fosfora ($<0,035\%$) od kvalitetnih ($<0,045\%$), imaju jednolična svojstva na rubu i jezgri, veću kvalitetu površine i manji broj nemetalnih uključaka u mikrostrukturi. Glavne grupe plemenitih čelika su čelici jednostruko legirani kromom, čelici legirani kromom i manganom, čelici legirani kromom i molibdenom, čelici legirani kromom i niklom.

Niskougljični čelici s $0,1-0,2\%$ ugljika nisu skloni povišenju tvrdoće kaljenjem (tek čelici s $0,25\% C$). Radi zakaljivanja i povećanja otpornosti na abrazijsko trošenje, potrebno ih je pougljičiti (npr. granulat, solna kupka, plin), što rezultira povišenjem sadržaja ugljika u rubnim slojevima ($0,8-0,9\%C$). Ugljikom obogaćeni rub postaje zakaljiv, tj. gašenjem s odgovarajuće temperature austenitizacije postaje sklon poprimanju mikrostrukture visokougljičnog martenzita otpornog na trošenje. Pougljičena jezgra postaje feritno-perlitna ako proizvod nije prokaljen tj. nastaje niskougljični martenzit u slučaju prokaljivanja.



Slika 2. Mikrostruktura cementiranog zupčanika izrađenog iz čelika 16MnCr5 [2]

Obje navedene mikrostrukture karakterizira visoka udarna radnja loma pa je konačni proizvod otporan na trošenje s znatnim iznosom žilavosti.

Kod legiranih čelika poželjna je prokaljenost jer se cementirani čelici nisko popuštaju (≤ 220 °C) pa se žilavost jezgre postiže niskougličnim martenzitom. Čelici za cementaciju se rijetko visoko popuštaju, a ako se to i dogodi tada se smatraju niskougličnim čelicima za poboljšanje. Visoko popuštanje ne kombinira se s postupkom pougličanja jer bi pougličeni rub pri popuštanju na temperaturi >220 °C toliko omekšao da ne bi bio dovoljno otporan na trošenje.

Svrha legirajućih elemenata je utjecaj na jače prokaljivanje pri gašenju nakon pougličavanja. Legirajući elementi utječu na brzinu procesa pougličavanja, dubinu pougličanog sloja te sadržaj ugljika u površinskoj zoni. Karbidotvorci poput kroma, molibdena, mangana i vanadija snižavaju koeficijent difuzije ugljika u austenitu, odnosno povećavaju udio ugljika u površinskom sloju, što uzrokuje intenzivno stvaranje karbida i moguću pojavu površinskih pukotina.

Jedan od glavnih problema pri propisivanju postupka pougličanja i kaljenja je određivanje pravilne temperature gašenja. Budući da u isto vrijeme postoje mjesta s visokim sadržajem ugljika (rub s preko 0,8%) i niskim sadržajem ugljika (jezgra s ispod 0,2%) potrebno je izabrati kompromisnu temperaturu gašenja. Temperatura gašenja treba biti niža od one idealne za jezgru (temperatura kod koje se rubni sloj pregrijava što uzrokuje pogrubljenje martenzita i porast krhkosti) i viša od idealne za visokouglični rub (kod koje je nepotpuno zakaljivanje jezgre). U tom pogledu najmanje problema se javlja kod nelegiranih čelika, kod kojih se dopušta tzv. direktno kaljenje, tj. gašenje s temperature pougličanja.

Zbog prisutnosti kroma i molibdena čelici Č.4120 i Č.7420 smiju se direktno kaliti jer nisu skloni rastu zrna pri visokoj temperaturi postupka pougličanja. Sve ostale legirane čelike treba nakon pougličanja sporo ohladiti radi usitnjenja zrna koje je pougličanjem ogrubjelo. Zatim ih je potrebno ponovno austenitizirati do temperature koja je nešto viša od one potrebne za rub, te zakaliti. Nakon pougličavanja u kupki ne provodi se sporo hlađenje zbog opasnosti od pojave kemijskih reakcija između ostataka soli i čelika.

Legirajući elementi utječu na dubinu cementiranog sloja preko koncentracije ugljika u rubnom sloju. Nekarbidotvorci (npr. nikal, mangan) omogućavaju postizanje veće dubine cementacije nego karbidotvorci (npr. krom, molibden, vanadij).

Glavne karakteristike pojedinih vrsta čelika za cementaciju su:

a) Nelegirani kvalitetni i plemeniti čelici: kaljivi samo u vodi, svojstva jezgre su loša, zbog čega se primjenjuju samo za dijelove manjih dimenzija i malih udarnih opterećenja kao što su dijelovi šivaćih i pisaćih strojeva, poluge, svornjaci.

b) Kromom legirani čelici: skloni stvaranju karbida u pougličenom rubnom sloju, direktno su kaljivi u vodi i prokaljivi u ulju. Primjena u automobilskoj industriji za poluosovine, bregaste osovine, manji zupčanci itd.

c) Mn-Cr čelici: zbog mangana manje skloni pojavi karbida u rubnom sloju, osjetljivi na pregrijavanje. Prikladni za izradu proizvoda srednjih dimenzija npr. zupčanci alatnih strojeva, radilice u kliznim ležajevima itd.

d) Cr-Mo i Mo-Cr čelici: sposobnost za direktno gašenje, vrlo otporni na trošenje zbog molibdena koji kao jaki karbidotvorac stvara karbide, ali ipak dovodi do toga da čelik postaje osjetljiviji pa je pougličavanje potrebno provesti u blažem sredstvu i u kraćem vremenu. Primjenjuju se za cijevi, komore i posude pod tlakom.

e) Cr-Ni čelici: vrlo dobro su prokaljivi, no skloni pojavi zaostalog austenita u rubnim slojevima, a primjena im je u izradi proizvoda najvećih dimenzija kao što su zupčanci lokomotiva, te za rad u otežanim uvjetima.

3. TERMODIFUZIJSKA (TERMOKEMIJSKA) TOPLINSKA OBRADA

Termodifuzija je gibanje plinovite ili tekuće tvari izazvano lokalnim zagrijavanjem ili hlađenjem što ima za posljedicu da se čestice veće mase gibaju od područja više temperature prema hladnijem području, dok čestice manje mase difundiraju u područje s višom temperaturom.

Termodifuzijska obrada je toplinska obrada pri kojoj se toplinskim i kemijskim djelovanjem, koji se provode u odgovarajućim medijima (krutim, plinovitim, tekućim) mijenja struktura i kemijski sastav materijala, a time i poboljšavaju neka uporabna svojstva. Za cilj ima povećanje površinske otpornosti na trošenje proizvoda, povećanje tvrdoće u površinskom sloju, povećanje otpornosti na koroziju te povećanje otpornosti prema oksidaciji na povišenoj temperaturi.

Kod ove vrste obrade jezgra ostaje kemijski nepromijenjena, te tako može zadržati visoku žilavost koja se postiže niskim sadržajem ugljika u čeliku i prokaljivanjem niskougljične (legirane) jezgre u cilju dobivanja masivnog i žilavog martenzita.

Termodifuzijske obrade možemo podijeliti na:

- Cementaciju ili pougljičenje – povećanje sadržaja ugljika u površinskom sloju komada
- Nitriranje – povećanje sadržaja dušika (N) u površinskom sloju komada
- Karbonitriranje – povećanje sadržaja dušika i ugljika u površinskom sloju komada
- Nitrokarburiranje – nitriranje s dodatkom atoma ugljika i u manjoj mjeri kisika
- Boriranje – povećanje sadržaja bora (B) u površinskom sloju komada
- Termodifuzija metala

4. CEMENTACIJA

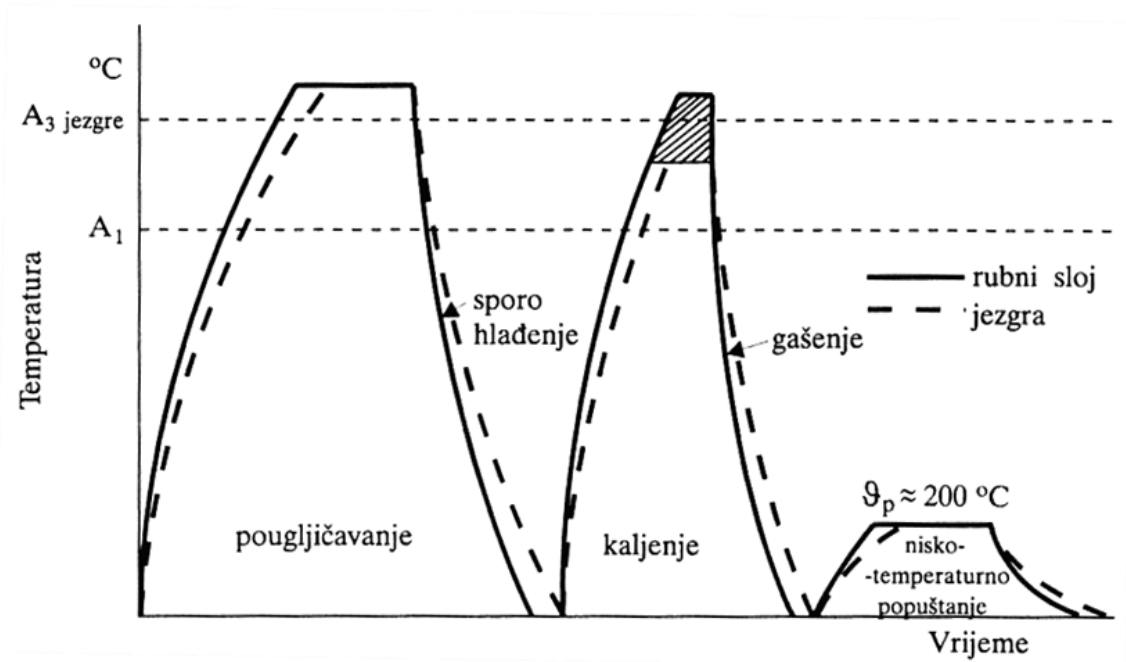
Cementacija čelika je postupak obrade koji se sastoji od:

- Termokemijske obrade pougljičenja (obogaćivanjem površinskog sloja proizvoda ugljikom)
- Kaljenja (pougljičeni sloj se dovodi u martenzitnu strukturu) proizvoda i niskotemperaturnog popuštanja

Pojednostavljeno, možemo reći da je

Cementacija = pougljičenje + kaljenje + niskotemperaturno popuštanje.

Osnovni cilj cementacije je postizanje tvrdih površinskih slojeva nekog strojnog dijela otpornih na trošenje (visoka tvrdoća), tako da jezgra tog strojnog dijela postigne što višu otpornost na udarna opterećenja tj. da se postigne što veća žilavost jezgre.

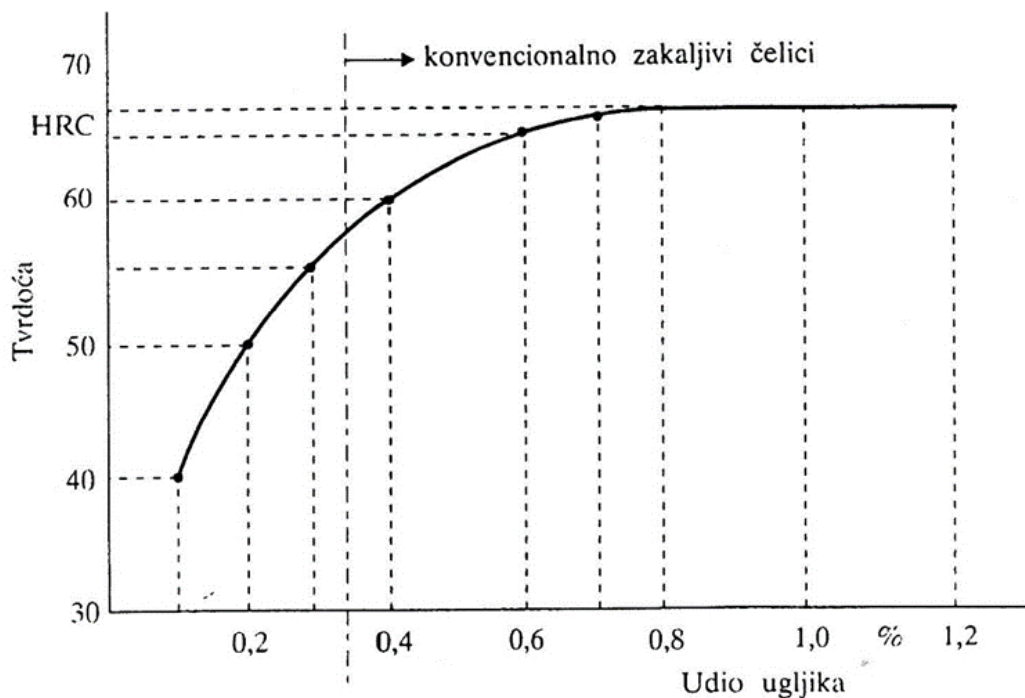


Slika 3. Dijagram postupka cementacije [3]

Slika 2 prikazuje dijagram jednog od mogućih postupaka cementiranja. Temperatura austenitizacije pri kaljenju nakon pougljičenja ne može istovremeno biti optimalna za rubni sloj koji je visokougličan i za jezgru koja je niskouglična jer se koncentracije ugljika znatno razlikuju.

Cementacija ima najbolji učinak kod ugljičnih i niskolegiranih čelika za cementiranje, s udjelom ugljika od 0,1 do 0,25%, te na čelike koji sadrže jedan ili više legiranih elemenata: mangan, krom, molibden i nikal. Površine čelika se obogaćuju ugljikom približno od 0,6 do 1,0%, najčešće od 0,7% do 0,8%. Dubina pougljičenog površinskog sloja obično iznosi od 0,2 do 3 mm, najčešće oko 1,0 mm. O svim navedenim svojstvima ovise uporabna svojstva površinskog sloja.

Za cementiranje se uzimaju niskougljični čelici, jer bi samim kaljenjem ili postizali visoku žilavost ili je barem zadržavali onakvom kakva je bila prije kaljenja. No kako ti čelici samim kaljenjem ne postižu visoku površinsku tvrdoću, treba im prikladnim toplinskim postupkom povisiti sadržaj ugljika u površinskim slojevima, kako bi postali bolje zakaljivi (Slika 3). Prema tome, nositelj otpornosti na udarna opterećenja cementiranog strojnog dijela bit će njegova jezgra, a nositelj otpornosti na trošenje njegovi površinski slojevi.



Slika 4. Burns-ov dijagram [4]

5. POUGLJIČENJE

Pougljičenje je najčešće korišten postupak kemijsko-toplinske obrade. Proces pougljičenja provodi se na visokim temperaturama, obično od 880 do 950 °C, no može se provoditi i od 800 do 1050°C. Pougljičenje se ponekad koristi na 1010°C kada je potrebno smanjiti vrijeme procesa, dobiti veću dubinu površinskog sloja od 1,5 mm i povećati proizvodnost.

Proces pougljičenja sastoji se iz tri fizikalno-kemijske etape:

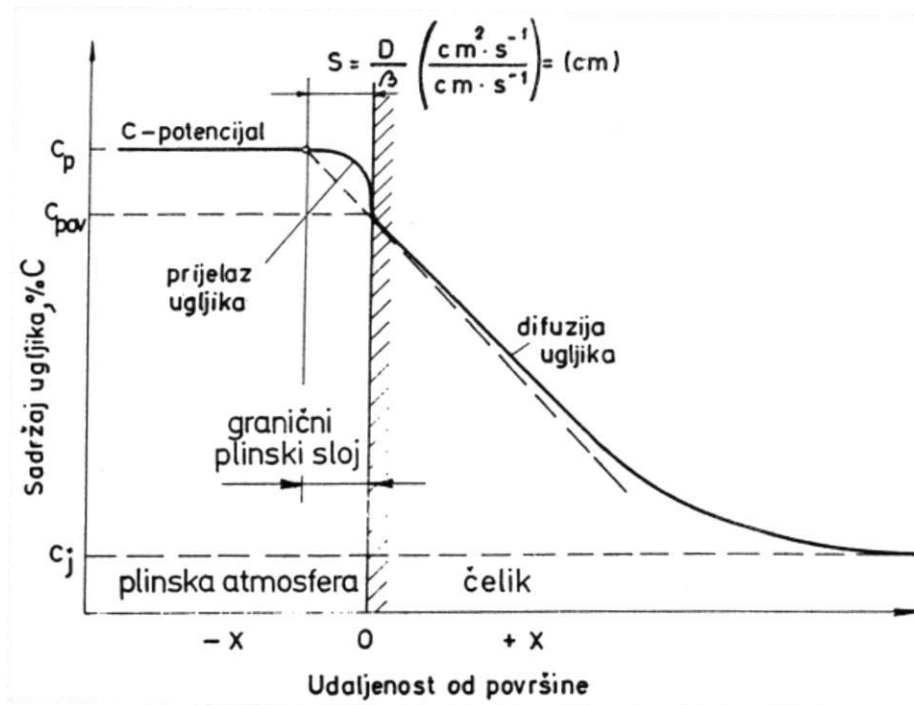
- disocijacija sredstva za pougljičenje,
- adsorpcija ugljika na površini,
- difuzija ugljika od površine prema unutrašnjosti materijala.

Postupak pougljičenja provodi se u sredstvu koje omogućava da na temperaturi austenitizacije čelika (900 do 950 °C) predaje čeliku ugljik tj. njenu dinamičku izdržljivost. Previše bi ugljika rezultiralo nastajanjem slobodnog cementita i krhkosti, a premalo ugljika ne bi dalo zadovoljavajuću tvrdoću. Sadržaj apsorbiranog ugljika, tj. površinska koncentracija i efektivna dubina pougljičenja ovise o:

- kvaliteti čelika,
- potencijalu ugljika,
- sredstvu za pougljičenje,
- temperaturi pougljičenja,
- vremenu pougljičenja.

Sredstvo za pougljičenje karakterizirano je ravnotežnim sadržajem ugljika, odnosno 'potencijalom ugljika' (C-potencijal).

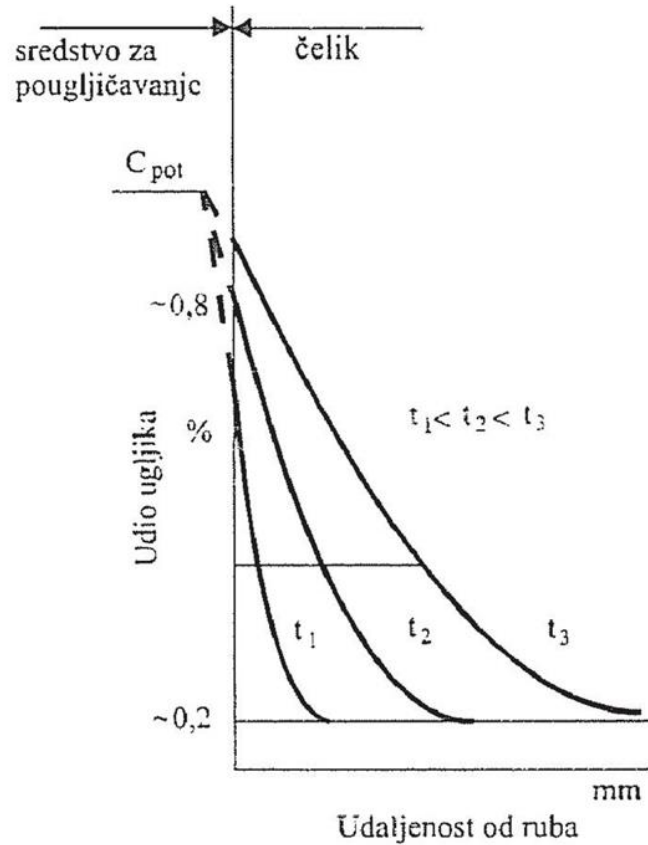
Zagrijavanjem na potrebnu temperaturu i držanjem na istoj dolazi do reakcije u graničnom sloju i difuzije ugljika u površinu materijala.



Slika 5. Prikaz procesa pougljičenja čelika [3]

Na graničnoj ravnini odvija se pougljičenje, tj. obogaćivanje površine predmeta ugljikom (prijelaz ugljika). Kako se sadržaj ugljika na površini pougljičenog predmeta povisuje u odnosu na njegovu jezgru, ugljik dalje difundira u unutrašnjost prema jezgri.

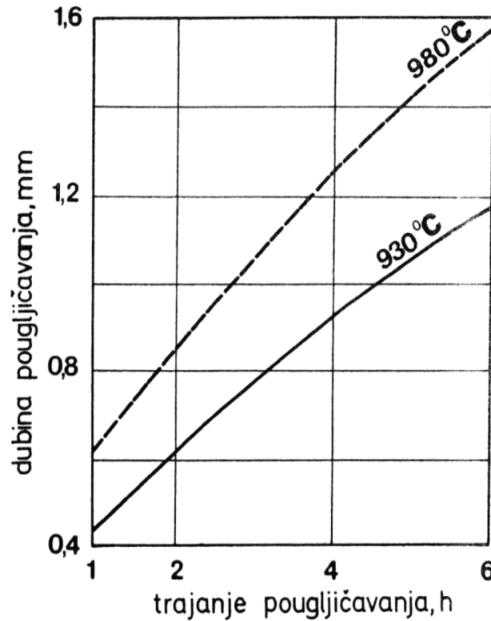
Vrijeme pougljičenja se u plinskim atmosferama za nelegirane čelike može praktično odrediti očitavanjem odnosa efektivne dubine i vremena pougljičenja iz dijagrama. Za legirane se čelike vrijeme pougljičenja u odnosu na zahtijevanu dubinu cementacije određuje eksperimentalno jer legirni elementi utječu na tijek difundiranja ugljika u materijal.



Slika 6. Utjecaj trajanja pougljičenja na dubinu pougljičenja [3]

Pri temperaturi pougljičenja sredstva daju odgovarajući tzv. potencijal ugljika (C - potencijal) koji je viši od sadržaja ugljika u čeliku. Zbog toga se ugljik putem odgovarajućih kemijskih reakcija apsorbira u površinski sloj čelika te dalje difundira u unutrašnjost strojnog dijela. Povećanje temperature osjetno povećava dubinu pougljičavanja.

Brzina pougljičenja je u početku veća i ravnomjerno opada s trajanjem pougljičavanja. Ovisno o trajanju pougljičavanja dobit će se odgovarajuća dubina pougljičenja i ona će biti tim dublja što je trajanje pougljičavanja dulje.

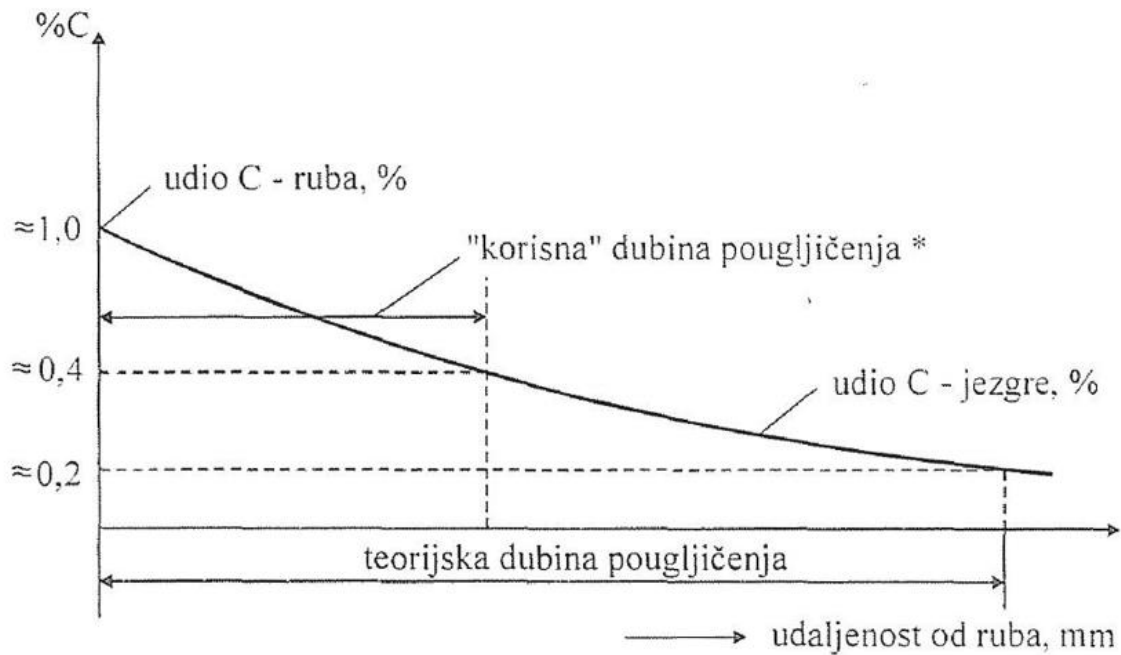


Slika 7. Utjecaj temperature na dubinu pougljičenja za Č.1220 [3]

5.1.DUBINA POUGLJIČENJA

Pri postupku pougljičenja čelika teži se udjelu C pri samoj površini 0,8...0,9%C (rjeđe do 1 %C) tj. nadeutektoidnosti samog idealnog ruba. Ovako zadani zahtjevi rijetko se mogu postići, osobito kada se teži što većoj dubini cementacije tj. uz dulja vremena pougljičenja. Takvi slučajevi dovode do preugljičenja (udio ugljika na samoj površini raste čak do ~1,2%).

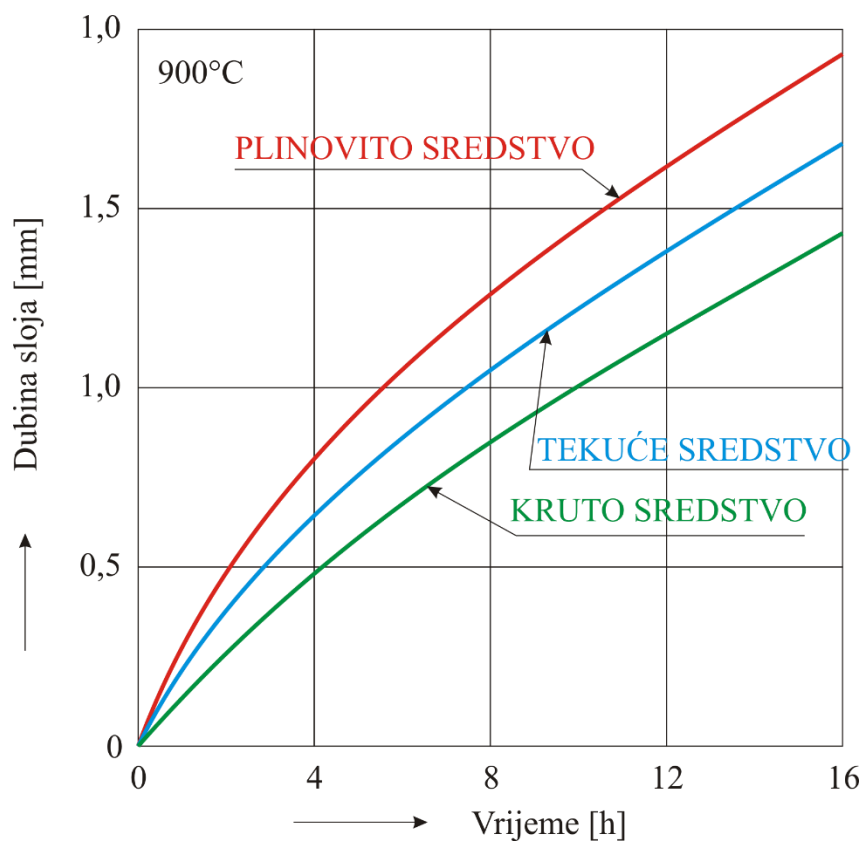
Kada bi s cementiranog predmeta postepeno skidali tanke slojeve (npr. tokarenjem), te kada bi izvršili kemijsku analizu svakog skinutog sloja, mogli bi uočiti da se (u normalnom slučaju) udio ugljika postupno mijenja od ~1%C na oko 0,2%C, idući od ruba prema jezgri. Prema tome sam pougljičeni sloj ne smije se smatrati jednim jedinstvenim materijalom s određenim udjelom C, nego teorijski beskonačnim nizom materijala (ili vrlo velikim brojem slojeva), kod kojih udio C kontinuirano pada od ruba prema jezgri.



Slika 8. Prikaz tijeka promjene udjela ugljika u pougljičenom sloju [3]

Metode pougljičenja obzirom na izvor ugljika:

1. Pougljičenje u krutim sredstvima – kao sredstvo za pougljičenje koristi se granulati koji se sastoje od smjese drvenog ugljena kao nositelja ugljika, aktivatora BaCO_3 i veziva.
2. Pougljičenje u tekućim sredstvima – provodi se u rastaljenim solima kalijeva i natrijeva cijanida i odgovarajućim aktivatorima.
3. Pougljičenje u plinovitim sredstvima – sredstvo za pougljičenje su plinske atmosfere koje sadrže spojeve ugljika (CO , CH_4 , itd.), te čine ovu metodu pougljičenja znatno bržom nego u granulatu, a moguća je i kvalitetnija regulacija C - potencijala atmosfere, kao i rad s više C - potencijala, odnosno promjenljivim C - potencijalom.
4. Vakuumsko pougljičenje – obrađivanje čelika u vakuumu u plinovitoj atmosferi koja može biti sastavljena od ugljika, ugljikovodika, smjese ugljikovodika te smjese ugljikovodika i dušika.
5. Plazma pougljičenje (ionizirani plinovi) – konstantan C - potencijal se regulira putem gustoće struje; dolazi do bombardiranja površine čelika koncentracijom ugljikovih iona.

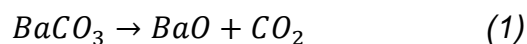


Slika 9. Utjecaj vremena držanja izratka (na temperaturi pougljičenja) na dubini pougljičenog sloja za različita sredstva pougljičenja [5]

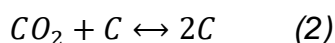
5.2. POUGLJIČENJE U KRUTOM SREDSTVU

Najstariji postupak pougljičenja koji se koristi i danas zbog svoje jednostavnosti i niskih ulaganja u opremu i postupak pougljičenja. Smjesa koja se koristi za pougljičenje je mješavina drvenog uglja, aktivatora i veziva u obliku zrnatog granulata od 3 do 5 mm.

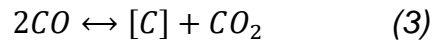
Za aktivator se može koristiti natrijev karbonat Na_2CO_3 , no najčešće se koristi barijev karbonat (BaCO_3) koji se pri visokim temperaturama raspada na ugljični dioksid i barijev oksid.



Dobiveni ugljični dioksid reagira s ugljikom iz granulata tvoreći ugljikov monoksid:



Nadalje, nastaje ravnotežna plinska atmosfera koja u kontaktu s površinom čelika uzrokuje pougljičenje.



Ugljik se ugrađuje u austenitno zrno koje difuzijom prodire u unutrašnjost jezgre. Ugljikov dioksid sada ponovo reagira uz prisustvo ugljena što dovodi do obnove ugljičnog monoksida tj. plinske atmosfere, čime se omogućava obnova cijeloga procesa.

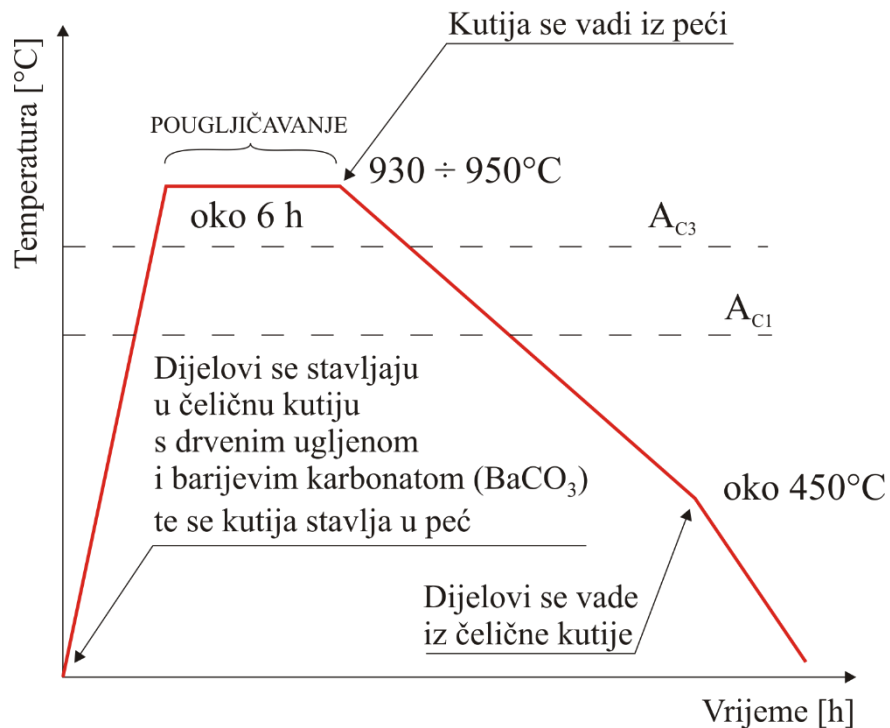


Cijeli proces odvija se u plinskoj fazi, iako je sredstvo za pougljičenje u krutom stanju. Sredstvo je u obliku granulata jer je za pougljičenje nužna cirkulacija plinova koja je omogućena jer je granulat kompaktan tijekom cijelog procesa. Stoga, za primjer, prašak kao oblik krutog sredstva za pougljičenje ne možemo upotrijebiti zbog nedostatka šupljina između čestica praška.

Ovisno o kvaliteti te vrsti i sadržaju aktivatora, razlikujemo više vrsta granulata. Prema djelovanju sredstva se dijele na „oštra“ i „blaža“, što se može uočiti kod postizanja određenog sadržaja ugljika i opasnosti nastajanja karbida u površinskom sloju.

Postupak pougljičenja u krutim sredstvima započinje tako da najprije napunimo čeličnu kutiju s granulatom do određene visine (13 – 50 mm). Ovisno o učestalosti uporabe, kalupi mogu biti od ugljičnog čelika ili čeličnog lijeva kod povremenog pougljičenja, i toplinski otporni krom-nikal čelici kod redovnog pougljičenja. Nakon tako pripremljenog kalupa, na taj sloj rasporede se željeni dijelovi koji se zatim prekrivaju s ostatkom smjese granulata. Kako bi spriječili ulazak zraka u kutiju, poklopac se zabrtvi glinom ili šamotnim mortom. Kutija se potom stavlja u zagrijanu peć na 700°C, te se postepeno zagrijava na temperaturu pougljičenja (850°C - 950°C). Vrijeme držanja na temperaturi pougljičenja ovisi o materijalu, sposobnosti granulata da materijal pougljiči i zahtijevanim dubinama cementiranja. Još uvijek ne postoji pouzdana metoda kontinuiranog kontroliranja C-potencijala u krutim sredstvima, stoga najznačajnije korekcije postupka moguće je izvršiti odabirom najprikladnije temperature pougljičenja. Nakon

obrade, kutija se vadi iz peći, dijelovi odvajaju od granulata, a kutija s ostatkom granulata nadopunjava svježim granulatom u određenom omjeru.



Slika 10. Pougličenje u krutom sredstvu [5]

Prednosti procesa pougličjenja u krutom sredstvu:

- jednostavnost,
- minimalna ulaganja u opremu,
- dovoljno zadovoljavajuća kvaliteta procesa.

Nedostaci procesa pougličjenja u krutom sredstvu:

- nepogodan za serijsku proizvodnju,
- nemogućnost kontrole i regulacije C-potencijala,
- opasnost od nastajanja karbida,
- opasnost od lokalnog razugličavanja u fazi ohlađivanja.

5.3. POUGLJIČENJE U TEKUĆIM SREDSTVIMA

Izvodi se uranjanjem obratka u solne kupke dobivene taljenjem natrijeva ili barijeva klorida. Ugljik za pougljičenje dolazi iz cijanida koji su prvenstveno natrijev cijanid (NaCN) ili kalijev cijanid (KCN). Cijanidi, obzirom da uz ugljik sadrže i dušik, obogaćuju površinu i dušikom. Iz tog razloga ove su soli specifične jer se (pri različitim temperaturama) mogu koristiti za cementiranje, nitriranje i karbonitriranje.

Solne kupke svrstavamo u dvije osnovne skupine:

1. Aktivne solne kupke – uz cijanide sadrže i aktivatore (barijev ili stroncijev klorid) koji podržavaju i oslobađaju ugljik potreban za pougljičenje, snižavaju temperaturu taljenja i viskoznost kupke. Proces se provodi na temperaturama od 900 do 1000°C pri čemu se postiže udio ugljika od 0,5% do 1,2%. Tijekom procesa kontrolira se sadržaj cijanida, te C-potencijal. U slučaju potrebe kupka se nadopunjava najčešće gotovim smjesama soli cijanida i aktivatora. Pošto su cijanidi vrlo otrovni, obratke je nakon procesa kaljenja potrebno neutralizirati držeći ih 5-10 min u spremnicima s otopinom željezovog sulfata. Zatim se detaljno ispiru 5 min toplom vodom.
2. Neaktivne solne kupke – primjenjuju se za karbonitriranje pri temperaturi do 850°C i dubine do 0,5 mm, što postiže rezultat od 0,4% do 0,6% ugljika na površini obratka. Sam proces je otvoren i u doticaju sa zrakom. Kontrolira se samo sadržaj cijanida, te ako je sadržaj mali, kupka se nadopunjuje svježom soli.

Dubine pougljičenja zavise o C-potencijalu, vremenu pougljičenja i temperaturi pri kojoj se odvija proces te o vrsti čelika.

Prednosti pougljičenja u tekućim sredstvima:

- jednostavnost postupka,
- mala ulaganja u opremu,
- jednolično postignute dubine pougljičenja,
- prikladan za serijsku i masovnu proizvodnju.

Nedostaci pougljičenja u tekućim sredstvima:

- nemogućnost konstantnog kontroliranja i reguliranja sastava kupke i C-potencijala,
- zbrinjavanje cijanida,
- neutralizacija otpadnih soli i voda.

5.4. POUGLJIČENJE U PLINOVITIM SREDSTVIMA

Pougljičenje u plinovitim sredstvima je moderan način pougljičenja, vrlo sličan već spomenutim postupcima, ali bez kontrole nad nastalim plinom u površini izratka. Ovdje se međutim potrebni plinovi razvijaju u generatorima kontroliranim procesom smjese plina (uglični monoksid CO, vodika H₂, vodene pare). Jednostavno se regulira C - potencijal i ima veliku primjenu u velikoserijskim proizvodnjama (automobilska industrija).

Za pougljičenje se koriste i razni gorivi plinovi, koji u kontaktu s užarenom površinom čeličnog izratka disociraju i stvore već poznate uvjete pougljičenja. Razvijen je postupak uvođenja kapljevito metanola (metilnog alkohola CH₃ · OH) u komoru s čeličnim izradcima za pougljičenje, gdje isparava na temperaturi pougljičenja i oslobađa potrebne plinske komponente za proces pougljičenja.

Peći za pougljičenje mogu biti jamaste, prolazne i specijalne komore, ovisno o zahtjevima. Zbog svoje prikladnosti za cementiranje kod velikoserijske i masovne proizvodnje postupak se izvodi u višekomornim pećima u kojima je komora za ugrijavanje odvojena od komore za ohlađivanje, što daje bolju iskoristivost.

Prilikom pougljičenja u plinu nužno je imati pod kontrolom temperaturu, vrijeme i sastav atmosfere pougljičenja. Temperaturu je poželjno držati oko 925 °C kako bi se ostvarilo razumno brzo pougljičenje bez negativnih posljedica i kako bi se ostvarila preciznija kontrola dubine pougljičenja. Kako bi postigli što bolje rezultati pougljičenja u plinu obratci se ugrijavaju na temperaturu pougljičenja u gotovo neutralnoj atmosferi poput endo-plina. Kada temperatura u presjeku obratka bude

jednaka, u peć se uvodi plin za obogaćivanje. Kontrola temperature bi trebala biti preciznosti ± 3 °C pomoću pravilno postavljenih termoparova.

Ovisno o vrsti plinske atmosfere moguće su tri reakcije pomoću kojih se kontroliraju atmosfere, a one mogu biti:

1. Uz prisustvo ugljičnog monoksida kod kojega se sadržaj CO₂ kontrolira kontinuirano mjerenjem apsorpcije infracrvenog zračenja.
2. Uz prisustvo ugljičnog monoksida i vodika kod kojega C-potencijal mjerimo na temelju kontroliranja sadržaja vodene pare (H₂O) određivanjem točke kondenzacije.
3. Uz prisustvo metana, C-potencijal atmosfere je moguće kontrolirati i preko odnosa parcijalnih pritisaka vodika i metana u zavisnosti o temperaturi.

U nastojanju postizanja potpune kontrole C-potencijala u procesu pougljičenja, poznajemo još dvije metode pomoću kojih ugljikovodicima određujemo koncentraciju nekih od sastojaka (CO₂, O₂, vodena para), a to su metoda upotrebom tzv. kisikove sonde s kojom se mjeri parcijalni pritisak kisika, te metoda mjerenjem infracrvenim plinskim analizatorom koji radi tako da emitirano zračenje dijeli u dvije zrake gdje jedna prolazi kroz uzorak plinske atmosfere iz peći, a druga kroz referentni plin. Na izlazu detektor mjeri razliku apsorbiranih zraka.

Prednosti pougljičenja u plinu:

- velikoserijska i masovna proizvodnja,
- kontrola nastalog plina uz površinu izratka,
- veći izbor različitih metoda.

Nedostaci pougljičenja u plinu:

- opasnost od zapaljivosti, požara i eksplozije,
- otrovnost plinova.

5.5. VAKUUMSKO POUGLJIČENJE

Za razliku od plinskog pougljičenja, kod vakuumskog se C-potencijal određuje zasićenjem ugljika na površini čelika i vremenom pougljičenja kod određenih temperatura. Postupak se odvija na temperaturi od 900°C do 1040°C i u plinskoj atmosferi koja može biti sastavljena od vodika, ugljikovodika, smjese ugljikovodika i smjesa ugljikovodika i dušika.

Vakuumsko pougljičenje vrši se u vakuumskoj peći koja se izgrađuje od grafita ili keramike kako bi se izdržali visoki tlakovi. Radi sprečavanja prekomjernog taloženja ugljika u peći, tlakovi ne smiju prijeći zadanu vrijednost od 0,4%.

Prednosti vakuumskog pougljičenja:

- čistoća obrađivanih predmeta,
- nema potrebe za endotermnim generatorom,
- više radne temperature, kraće vrijeme, veće debljine sloja pougljičenja,
- bolja mehanička svojstva.

Nedostaci vakuumskog pougljičenja:

- skupa oprema,
- nužan kompromis i balans između procesnih uvjeta radi zadovoljenja potrebnih zahtjeva (dubine pougljičenja, brzine i smanjenja rizika od čađe).

5.6. PLAZMA POUGLJIČENJE

Kod plazma pougljičenja konstantan C - potencijal se ne održava pomoću kisikove sonde već se regulira putem gustoće struje. Glavna karakteristika plazma pougljičenja je bombardiranje površine čelika koncentracijom ugljikovih iona. Da bi to postigli najprije moramo postaviti čelične predmete u visokotemperaturnu peć, s razmakom među predmetima od 6 mm i oni služe kao katode. Unutrašnja konstrukcija peći služi kao anoda te se između katode i anode 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. Atom ugljika u reakciji s površinom obratka difundira u površinu materijala, što čini ovaj postupak bržim od drugih postupaka.

Proces se sastoji od faze uspostave plazme i faze zaustavljanje toka plazme tj. difuzijske faze.

Prednosti plazma pougljičenja:

- skraćeno vrijeme postupka u odnosu na druge,
- povećanje difuzije ugljika i bolja topivost u austenitu,
- niža potrošnja plina i niža cijena,
- nije opasno za okoliš.

Nedostaci plazma pougljičenja:

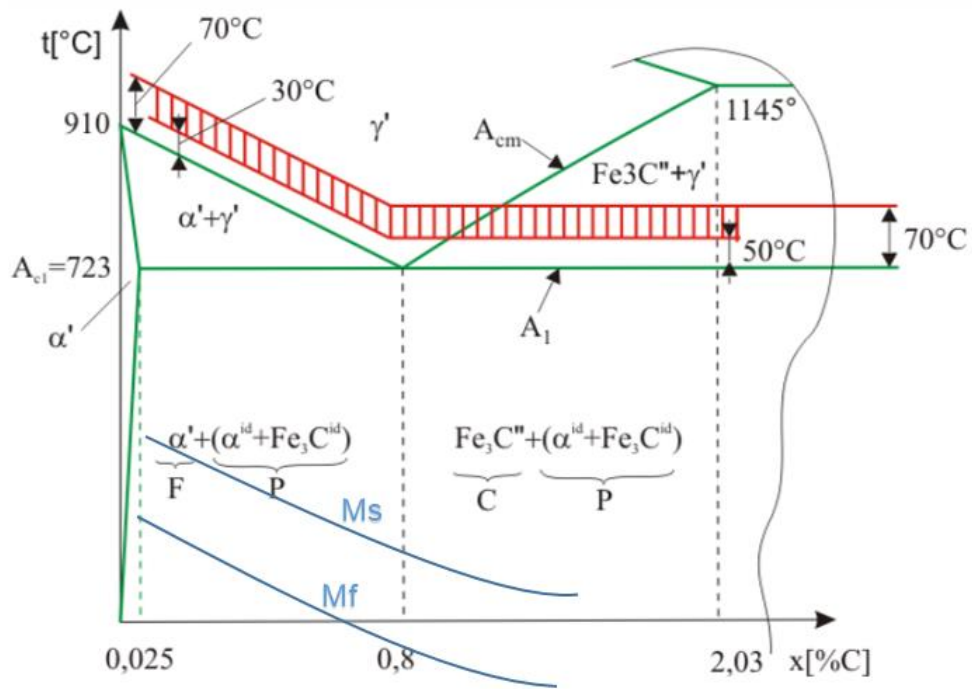
- visoka cijena opreme,
- nepogodan za velike predmete.

6. KALJENJE

Bez obzira na način prethodnog pougljičenja postupak cementacije bit će potpun tek nakon kaljenja čiji je cilj postizanje martenzitne strukture i visoke tvrdoće površinskog sloja.

Izbor provođenja postupka toplinske obrade nakon pougljičenja ovise o specifičnim zahtjevima i uvjetima kao što su osnovni zahtjevi na strukturalna i mehanička svojstva (čvrstoća, žilavost, dinamička izdržljivost, otpornost prema trošenju) i svojstva primijenjenog čelika (nelegirani ili legirani čelik, fino-zrnati ili grubozrnati čelik, osjetljivost na nastajanje zaostalog austenita).

Toplinska obrada nakon pougljičenja nije jednostavna zbog ravnomjernog mijenjanja sadržaja ugljika u pougljičenom sloju od površine prema jezgri što uzrokuje različiti tok strukturalnih promjena u pojedinim dijelovima pougljičenog sloja.

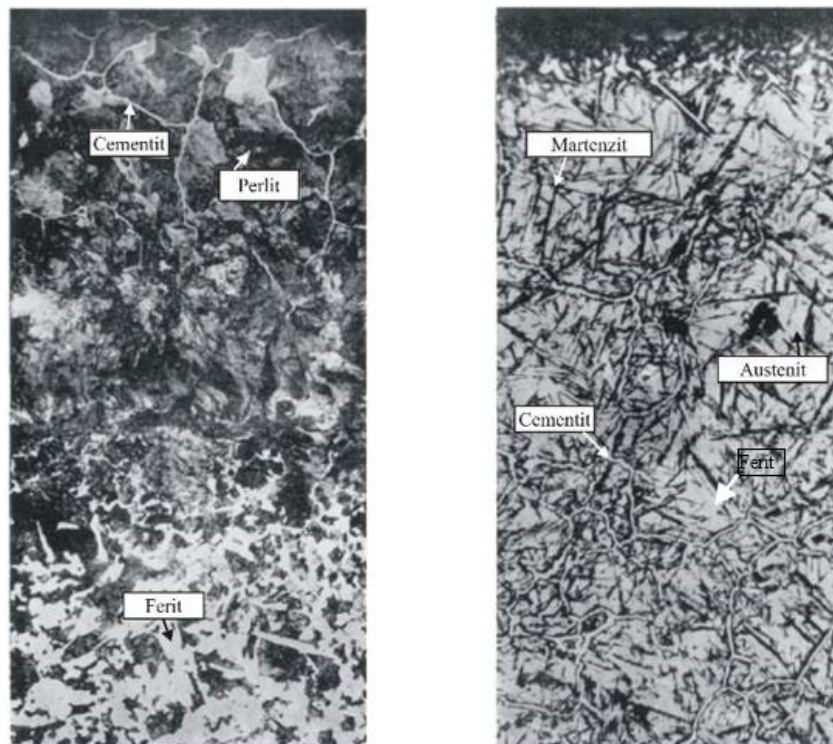


Slika 11. Stanje u Fe-C dijagramu nakon pougljičenja [5]

Nakon pougljičenja jezgra je u području podeutektoidnih čelika, a površinski sloj je u području nadeutektoidnog sastava. Polazni sadržaj ugljika u čeliku je prijelazna zona koja pokazuje sadržaj ugljika te njegovo ravnomjerno opadanje prema vrijednostima sadržaja jezgre. Nemoguće je odabrati jednu temperaturu kaljenja koja bi bila optimalna za površinski sloj i za jezgru, jer optimalna temperatura zavisi o sadržaju ugljika, a iznosi $30-70^\circ\text{C}$ iznad linije A3, a za nadeutektoidne čelike $50-70^\circ\text{C}$ iznad linije A1. Kada bi se pougljičeni čelik kalio s temperaturom koja je optimalna za kaljenje jezgre tada bi došlo do „pregrijanja“ površinskog sloja. Isto tako, ukoliko bi se kalio s temperaturom za kaljenje površinskog sloja ne bi se dobila potpuna austenitizacija čelika. Dakle, prilikom izbora temperature kaljenja mora se ocijeniti da li su prioritetni zahtjevi na svojstva površinskog sloja ili jezgre.

Linije Ms i Mf tj. početak i kraj transformacije martenzita ovise o sadržaju ugljika. Kod kaljenja (gašenja) prvo će se izvršiti pretvorba strukture u području jezgre (kod viših temperatura), a tek kod nižih temperatura pretvorba austenita u martenzit u površinskom sloju. Ohlađivanjem do sobne temperature u površinskom sloju neće doći do potpune transformacije, pa će u strukturi biti prisutan zaostali

austenit. Stoga se potpuna transformacija može postići dubokim ohlađivanjem na temperaturu ispod M_f .



Slika 12. Izgled cementiranog sloja prije (lijevo) i nakon (desno) toplinske obrade kaljenja [5]

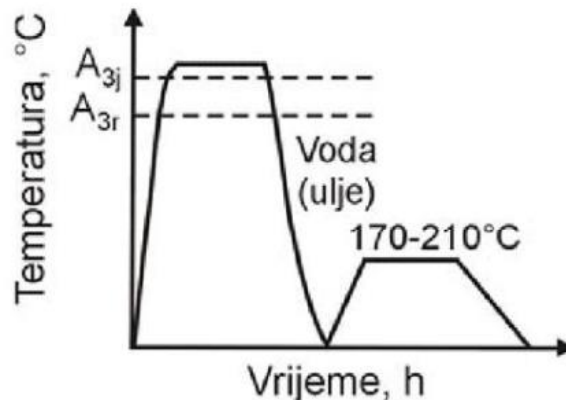
Do danas se razvilo više različitih postupaka toplinske obrade nakon pougljičenja, a neki od njih su direktno kaljenje, jednostruko i dvostruko kaljenje.

6.1. DIREKTNO KALJENJE

Najjednostavniji i najjeftiniji postupak, čiji su nedostaci pogrublivanje austenitnog zrna i smanjenje žilavosti. Ostvaruje se hlađenjem u jednom rashladnom sredstvu. Primjenjuje se kod jednostavnijih oblika i legiranih čelika (koristi se blaže rashladno sredstvo) jer nema velike opasnosti od zaostalih naprezanja. Koriste se kod standardnih kvaliteta čelika kada se ne postavljaju visoki zahtjevi u pogledu strukture i mehaničkih svojstava. Ako ipak postoji potreba za visokim zahtjevima

koriste se „sitnozrnati čelici“ kod kojih ne dolazi do bitnog pogrubljenja zrna, te je sklonost zaostalom austenitu manja.

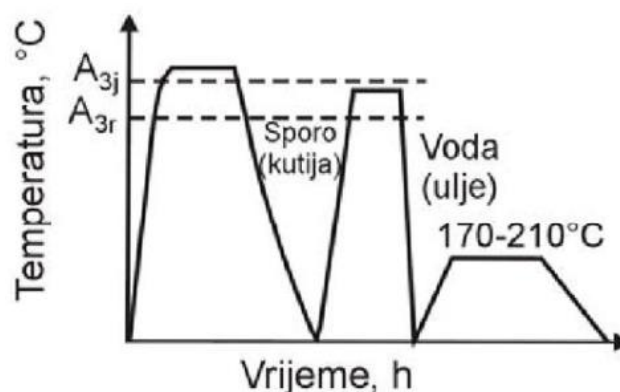
U praksi se često primjenjuje direktno kaljenje „sa snižene temperature“. Nakon pougljičenja, čelik se ohladi na nižu temperaturu, obično na temperaturu kaljenja jezgre s koje se provodi kaljenje, čime se smanjuju deformacije koje nastaju kod kaljenja, jer je temperaturna razlika kod kaljenja manja.



Slika 13. Direktno kaljenje [6]

6.2. JEDNOSTRUKO KALJENJE

Postupak se provodi sa temperatura koje odgovaraju temperaturama kaljenja za površinski sloj ili sa temperatura koje odgovaraju za kaljenje jezgre.



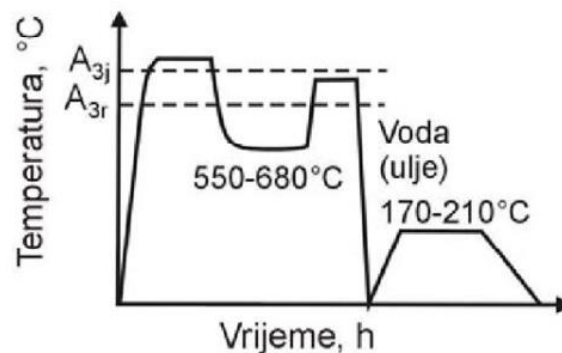
Slika 14. Jednostruko kaljenje nakon ohlađivanja u kutiji s granulatom [6]

Postoji više varijanti postupka. Svima je zajedničko da se između pougljičenja i kaljenja provede postupak kod kojega dolazi do pretvorbe austenita pa se kod

naknadne austenitizacije na temperature iznad A_1 postiže bar djelomična prekristalizacija koja ima za posljedicu usitnjenje zrna. Tijekom sporog ohlađivanja koje slijedi nakon pougljičenja, postoji opasnost od stvaranja karbidne mreže po granicama zrna u slučaju da je sadržaj ugljika u površinskom sloju iznad eutektoidne koncentracije. Tada se preporučuje brzo ohlađivanje.

Jednostruko kaljenje nakon međuzarenja ima za cilj smanjenje napetosti i deformacija, no postupak ne donosi očekivano poboljšanje svojstava jer daljnje kaljenje utječe na deformacije strojnih dijelova, a temperatura žarenja je preniska za uklanjanje karbida.

Nakon pougljičenja u solnim kupkama, kao i u plinskim atmosferama provodi se međuoхлаđivanje, tako da temperature pougljičenja čelika relativno brzo hladimo do temperature oko 600°C . Zatim držimo odgovarajuće vrijeme na toj temperaturi pri čemu se izvrši pretvorba austenita u perlitnom stupnju. Koliko će trajati vrijeme držanja ovisi 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.



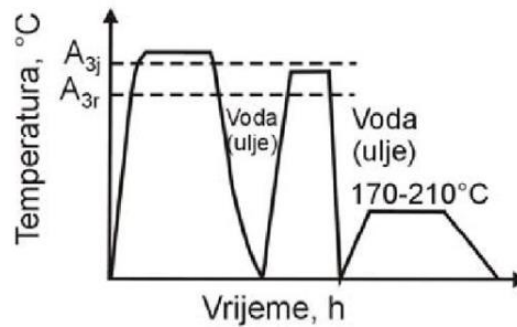
Slika 15. Jednostruko kaljenje ruba nakon izotermičke pretvorbe jezgre [6]

6.3. DVOSTRUKO KALJENJE

Postupak koji se ranije koristio za postizanje najviše površinske tvrdoće i najbolje žilavosti jezgre, no u praksi ovi zahtjevi nisu bili ostvarivi. Najme, najbolja žilavost dobivena prvotnim kaljenjem se kasnije bitno smanji drugim kaljenjem s niže temperature. Na tim nižim temperaturama provede se samo djelomična

prekristalizacija jezgre, pa osim austenita imamo i ferit zbog kojih imamo smanjenu žilavost.

Poseban je slučaj dvostrukog kaljenja kada se prvo kaljenje provede direktno sa temperature pougličjenja, a drugo kaljenje s temperature koja odgovara za površinski sloj.



Slika 16. Dvostruko kaljenje [6]

Za sve postupke kaljenja može se primjenjivati gašenje u vodi, ulju ili toploj kupki ovisno o vrsti čelika i dimenzijama dijelova.

7. NISKOTEMPERATURNI POPUŠTANJE

Nakon kaljenja vrši se toplinska obrada popuštanja čelika čime se teži ravnoteži faza (npr. struktura s feritom i perlitom) i mehaničkoj ravnoteži (uklanjanje zaostalih naprezanja nastalih kaljenjem). Popuštanje je toplinska obrada koja se izvodi samo poslije kaljenja zbog smanjenja napetosti i povećanja žilavost. Struktura zakaljenih čelika je izbačena iz metalografske ravnoteže u pougličjenom dijelu zbog naglog hlađenja. Zbog toga, postupkom popuštanja teži se postizanju kubičnog martenzita. Neke od posljedica ove toplinske obrade su eliminacija zaostalih naprezanja, povećanje žilavosti i rastezljivosti, smanjenje tvrdoće i čvrstoće te smanjenje granica elastičnosti.

Proces popuštanja se odvija obično na temperaturama od 150 do 200°C (za ugljične čelike 220°C) pri čemu je površinska tvrdoća od 58 do 62 HRC. Primjenjuje se kod cementiranih, ugljičnih, alatnih i drugih čelika kod kojih se traži velika tvrdoća, a ne toliko žilavost.

8. EKSPERIMENTALNI DIO

8.1. EKSPERIMENTALNI MATERIJAL

Kako bi ispitali utjecaj temperature na dubinu pougljičenje, za eksperimentalni dio rada upotrebljavat će se tri različite vrste čelika za cementaciju. Devet epruveta nelegiranog čelika Č.1221 (Ck 15), devet od legiranog čelika Č.4320 (16MnCr5) i devet epruveta od Č.5426 (15CrNi13). U nastavku su opisani kemijski sastav i mehanička svojstva korištenih čelika za ovaj rad.

Tablica 2. Kemijski sastav čelika [8]

Vrsta čelika	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Č.1221	0,12-0,18	≤0,40	0,30-0,60	≤0,035	≤0,035	-	-
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 3. Mehanička svojstva čelika [8]

Oznaka čelika		Sastav „ostalo“ %	Tvrdća u isporučeno m stanju, HB	Slijepo kaljeno Ø 30 mm			Kaljenje	
DIN 17006	HRN			R _{p0,2} , N/mm ² min.	R _m , N/mm ²	A ₅ , % min.	Jezgra, °C	Rub, °C
Ck15	Č1221	-	103-140	355	590-790	14	880-920; voda	-
16MnCr5	Č4320	1Cr	140-187	590	780-1080	10	850-880; ulje	810-840; ulje
15CrNi13	Č5426	1,5Ni	152-201	635	880-1180	9	840-870; ulje	800-830; ulje

Epruvete koje su korištene za eksperimentalni dio rada su izrezane na uzorke određenih dimenzija nakon čega su numerirane prema zadanom planu pokusa. U nastavku su tablično prikazana numeracija uzoraka za pojedini čelik, te tretmanu kojemu su isti povrgnuti.

Tablica 4. Oznake uzoraka [10]

Materijal	N $\hat{=}$ uzoraka		
Č.1221	1, 2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9
Č.4320	10, 11, 12	13, 14, 15	16, 17, 18
Č.5426	19, 20, 21	22, 23, 24	25, 26, 27

Tablica 5. Tretmani uzoraka [10]

Temperatura	Uzorci N $\hat{=}$		
880°C	1, 2, 3	10, 22, 12	19, 20, 21
920°C	4, 5, 6	13, 14, 15	22, 23, 24
950°C	7, 8, 9	16, 17, 18	25, 26, 27

Uzorci se razlikuju po obliku, tako su uzorci čelika Č.1221 i Č.4320 okruglog oblika, a uzorci čelika Č.5426 pravokutnog oblika.

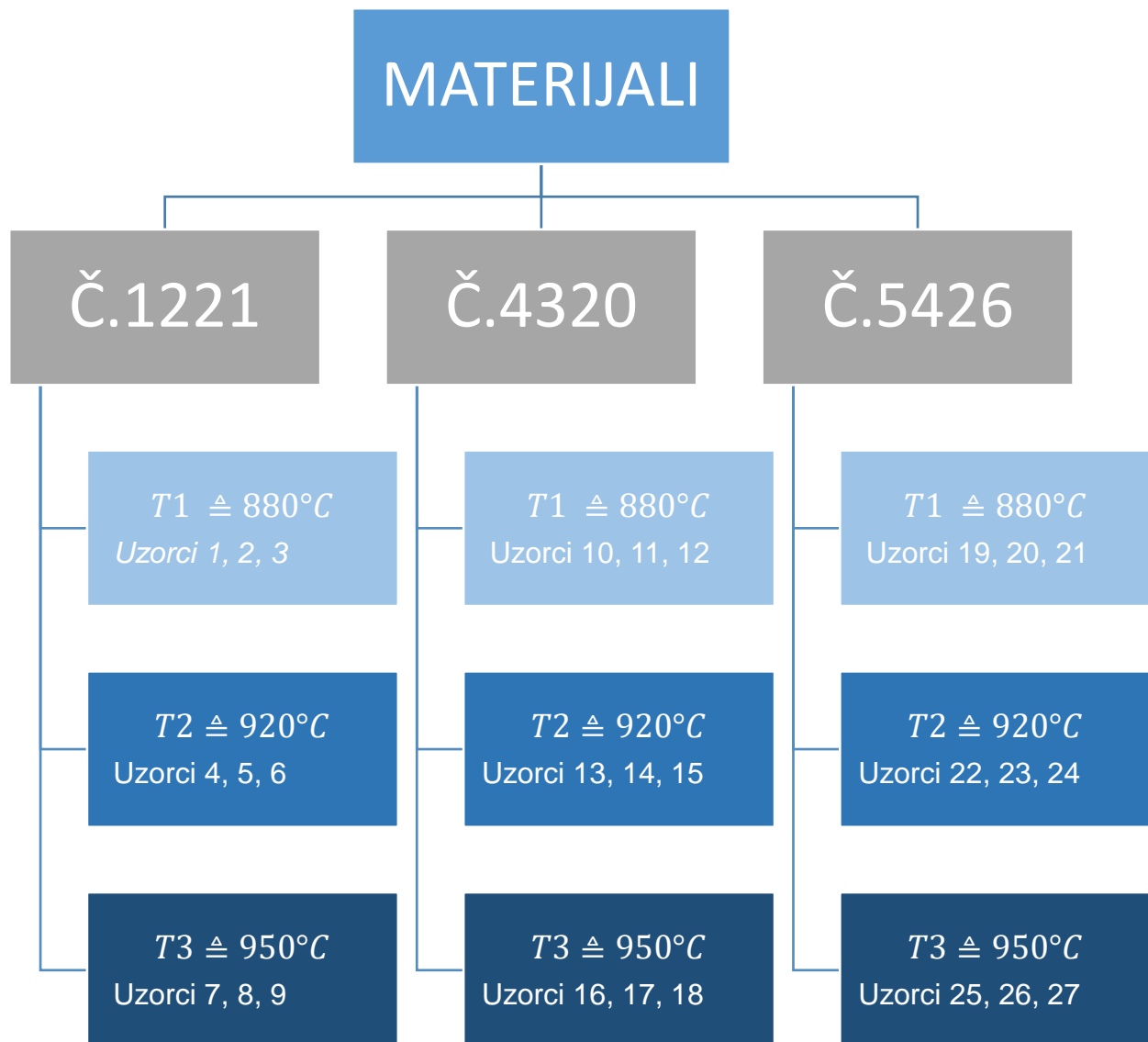
Dimenzije izrezanih uzoraka su sljedeće:

- Č.1221 – \varnothing 35 x 10 mm
- Č.4320 – \varnothing 35 x 13 mm
- Č.5426 – 10 x 16 x 35 mm



Slika 17. Uzorci prije pougljičenja [10]

8.2. PLAN EKSPERIMENTALNOG DIJELA



Slika 18. Plan eksperimentalnog dijela

Analiza rezultata po temperaturama

$T1 \triangleq 880^{\circ}C$

$T2 \triangleq 920^{\circ}C$

$T3 \triangleq 950^{\circ}C$

Uzorci:

Č.1221 1, 2, 3
Č.4320 10, 11, 12
Č.5426 19, 20, 21

Uzorci:

Č.1221 4, 5, 6
Č.4320 13, 14, 15
Č.5426 22, 23, 24

Uzorci:

Č.1221 7, 8, 9
Č.4320 16, 17, 18
Č.5426 25, 26, 27

Dijagram 1

Dijagram 2

Dijagram 3

Slika 19. Plan analize rezultata

8.3. PROCES TOPLINSKE OBRADJE – CEMENTACIJA

Toplinska obrada cementacije provedena je u pogonu tvrtke Adriadiesel d.d. Proces pripreme sastoji se od slaganja i pozicioniranja uzoraka u čelične kutije ispunjene mješavinom drvenog ugljena, veziva i aktivatora u obliku zrnatog granulata veličine od 3 do 5 mm. Najprije se dno čelične kutije ispuni granulatom. Zatim se ravnomjerno raspoređuju uzorci pazeći na razmak i položaj. Takva se priprema ponavlja nekoliko puta, završivši slojem granulata, tj. konačnim prekrivanjem uzoraka. Nakon što su uzorci prekriveni granulatom, čelična kutija zatvara se poklopcem radi sprječavanja doticaja s okolinom.



Slika 20. Priprema i pozicioniranje uzoraka u čeličnu kutiju [10]

Nakon što su svi uzorci prekriveni granulatom, čelična se kutija ne puni do vrha, nego se ostavlja mali dio na vrhu cca. 40 mm koji se ispunjava zemljom da se spriječi doticaj sa okolinom. Postupak pripreme završava se zatvaranjem čelične kutije poklopcem.



Slika 21. Prikaz pripremljene čelične kutije za proces pougljičenja [10]

Sljedeći korak je proces pougljičenja koji se proveo u komornoj elektro peći na tri temperature; 880°C, 920°C i 950°C.



Slika 22. Komorna elektro peć [10]

Pripremljena posuda s uzorcima stavlja se u komornu peć. Pougljičavanje se vrši prema planu pokusa. Po tri uzoraka od svake vrste čelika, postepeno se zagrijava te drži na zadanoj temperaturi (880°C, 920°C i 950°C). Nakon nekoliko sati držanja na određenoj temperaturi, posuda s uzorcima se vadi iz peći te ostavlja da se postepeno ohladi. Kada se materijal ohladi, uzorci se vade iz posude i odvajaju od granulata.

Po završetku odvajanja uzoraka od granulata, slijedi proces kaljenja s ciljem postignuća poboljšanja svojstva tvrdoće. Postupak se provodio tako da su uzorci Č.1221 kaljeni u vodi (iz soli u vodu), pri temperaturi od 820°C, dok su uzorci Č.4320 i Č.5426 su termalno kaljeni (iz soli u sol) bez popuštanja.

Završenim kaljenjem proveden je i posljednji postupak niskotemperaturnog popuštanja na temperaturi od 180°C. Ovim postupkom završen je proces cementacije uzoraka.



Slika 23. Uzorci Č.1221 i Č.4320 nakon postupka cementacije [10]



Slika 24. Uzorci Č.5426 nakon postupka cementacije [10]

Postojeće uzorke nakon postupka cementacije potrebno je poprečno prerezati po presjeku kako bi mogli pristupiti ispitivanju tvrdoće i dubine pougljičenja od površine materijala do jezgre. Visokobrzinsko rezanje uzoraka izvedeno je pomoću pile marke Buehler. Kako uslijed rezanja dolazi do trenja između pile i površine materijala, a time i povećanjem temperature, nakon rezanja uzorci moraju proći intenzivno hlađenje, čime se sprječava zagrijavanje i promjena strukture materijala.



Slika 25. Pila marke Buehler [10]

Odrezani dio uzorka prije ispitivanja potrebno je ispolirati. Postupak poliranja izveden je pomoću polirke marke Buehler Ecomet 3. Iz već spomenutih razloga porasta temperature, uzorci se nakon poliranja moraju ohladiti.



Slika 26. Polirka Buehler Ecomet 3 [10]

8.4. ISPITIVANJE TVRDOĆE I DUBINE POUGLJIČENJA

Nakon odrađene toplinske obrade i potrebne pripreme materijala za ispitivanje, slijedi ispitivanje površinske tvrdoće. Ispitivanja tvrdoće su izvedena na THR 6101 stolnom uređaju za mjerenje tvrdoće materijala prema Rockwell metodi.



Slika 27. Mjerni uređaj za ispitivanje tvrdoće [10]

Po završetku ispitivanja tvrdoće, provedeno je mjerenje dubine pougljičavanja od površine materijala do dubine od 1,4 mm, s pomakom od 0,2 mm. Dubina pougljičavanja je utvrđena mjernim uređajem LEITZ Durimet 2 mikroskopom.



Slika 28. LEITZ Durimet 2 mikroskop [10]

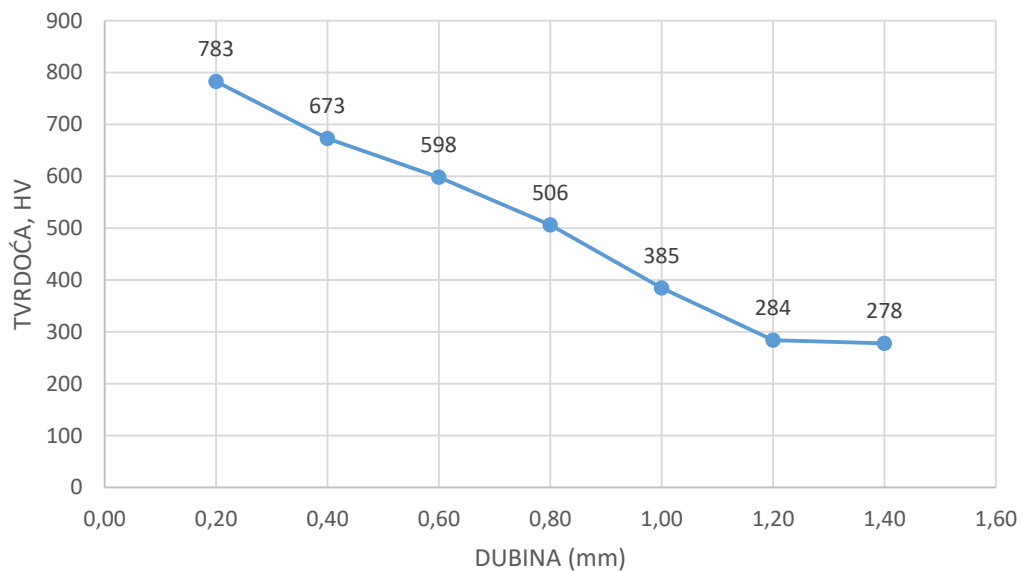
U nastavku slijede rezultati ispitivanja dubina pougličavanja za svaki ispitani materijal (Č.1221, Č.4320, Č.5426) na tri temperature (880°C, 920°C i 950°C). Dijagramom su iskazani rezultati za svaki ispitani uzorak. Nakon svaka tri dijagrama uzorka, slijedi jedan zajednički s izmjerenom efektivnom dubinom cementacije.

8.4.1. REZULTATI ISPITIVANJA MIKROTVRDOĆE ZA ČELIK Č.1221

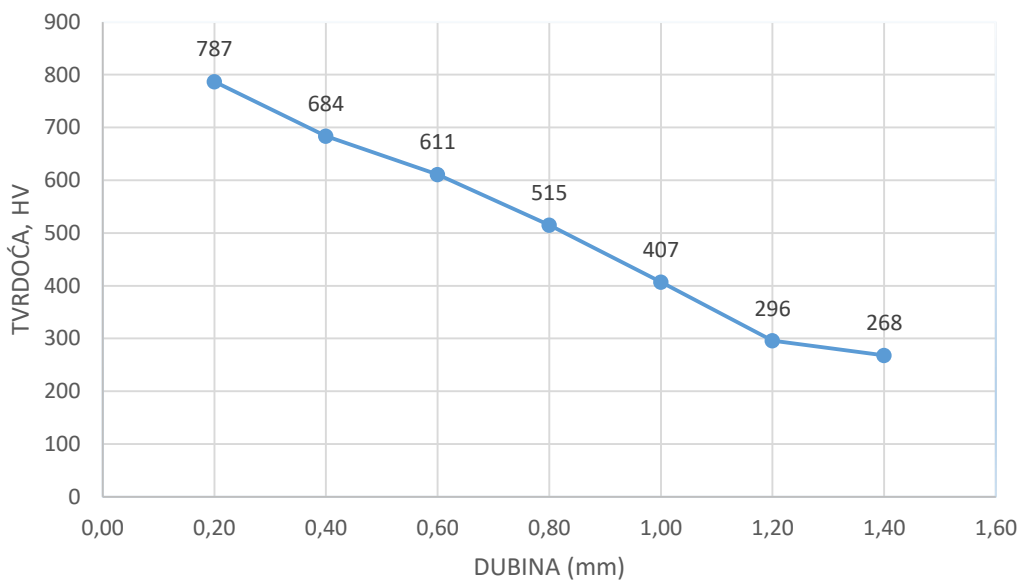
Č.1221 - 880°C (Uzorci 1,2,3)

550HV;0,72 mm - efektivna dubina cementacije

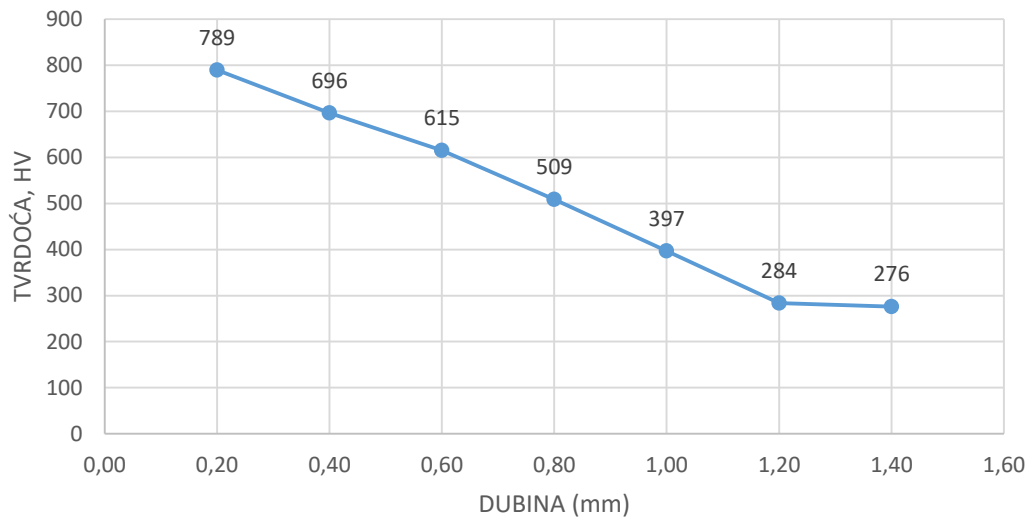
HV₁ - Uzorak 1



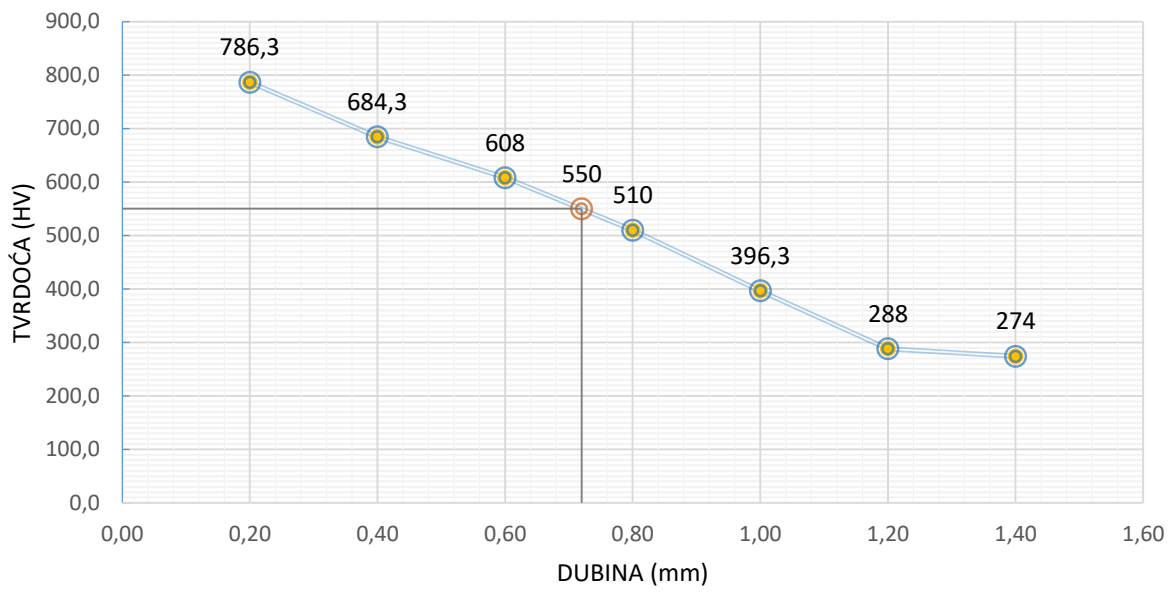
HV₁ - Uzorak 2



HV₁ - Uzorak 3



HV₁ - Dijagram 1.1.

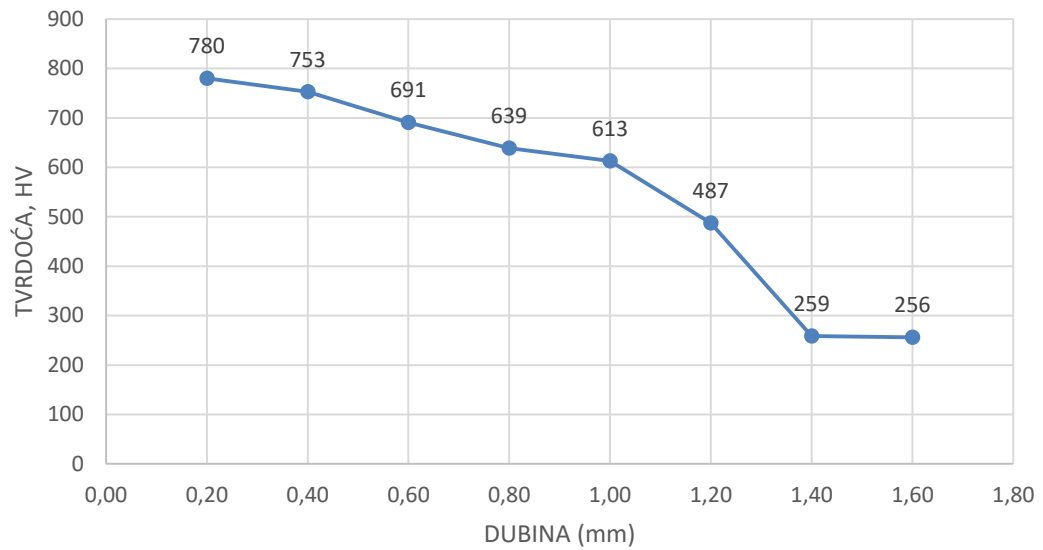


Slika 29. Dijagram uzoraka za Č.1221 na temperaturi 880°C

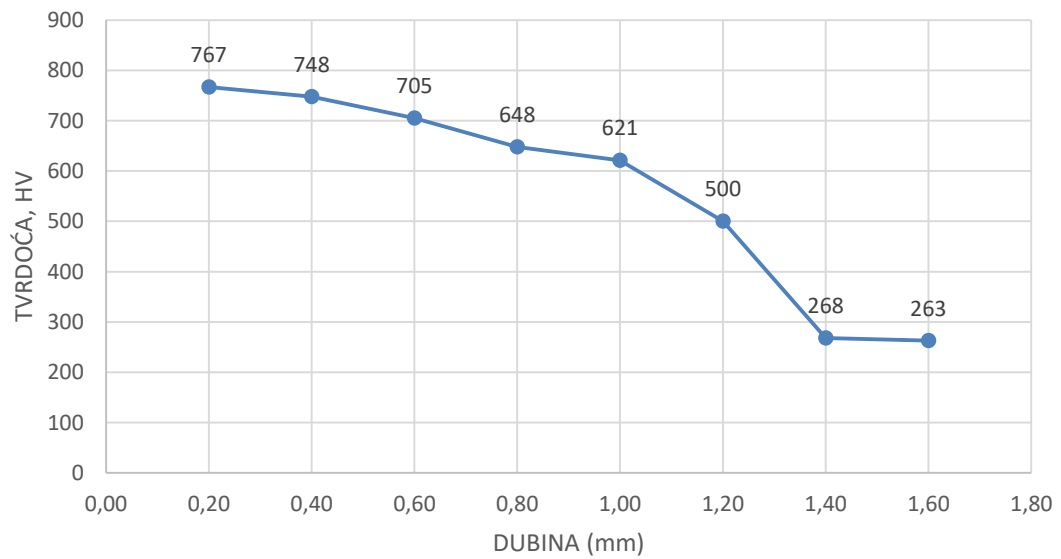
Č.1221 - 920°C (Uzorci 4,5,6)

550HV;1,12 mm – efektivna dubina cementacije

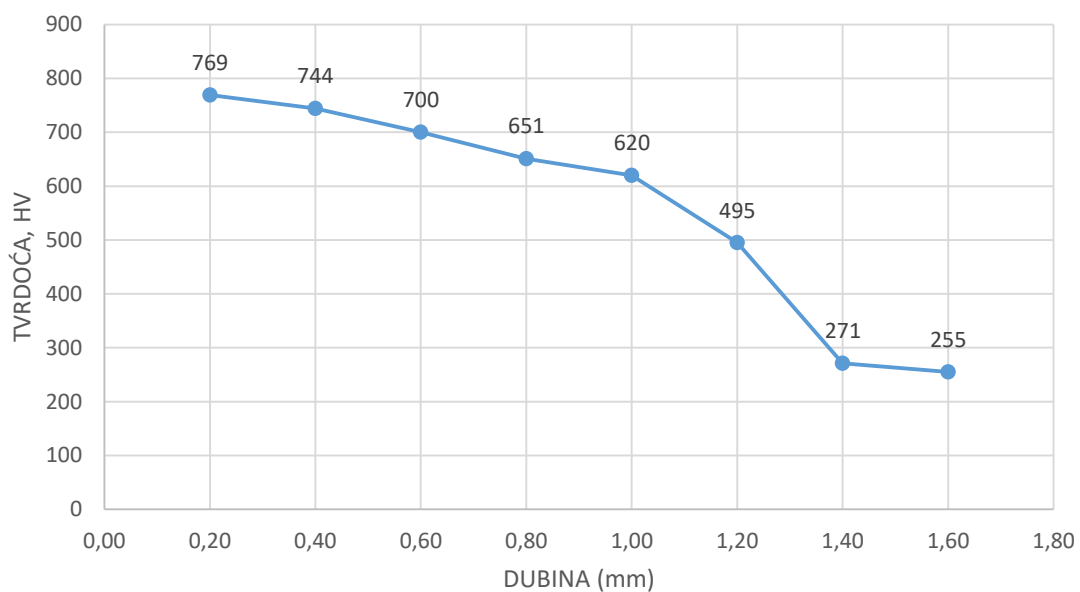
HV₁ - Uzorak 4



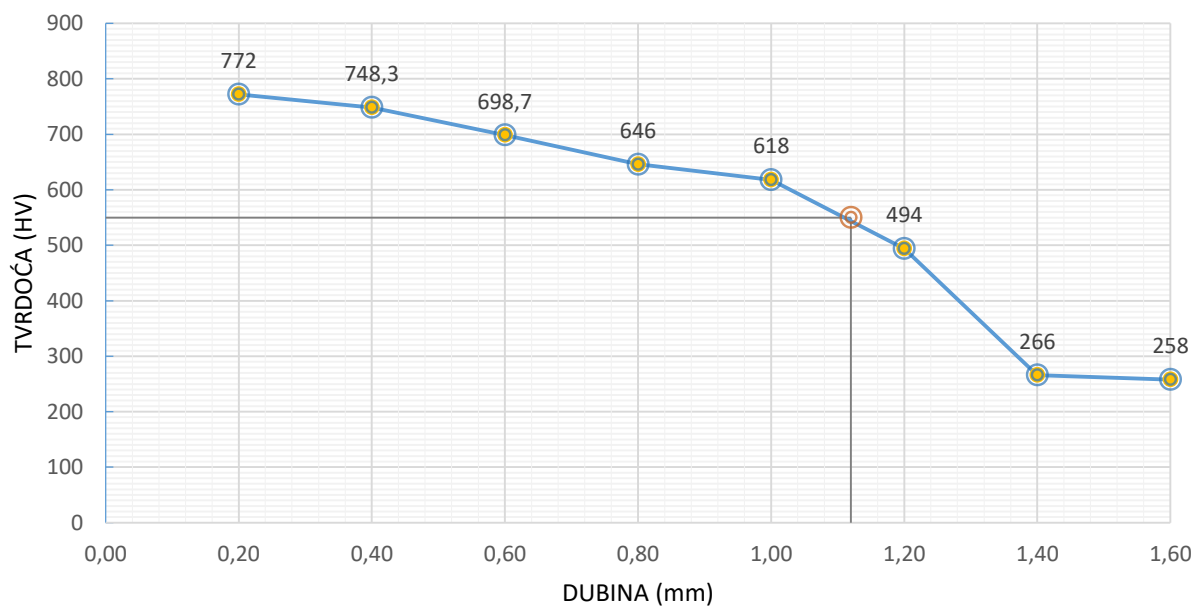
HV₁ - Uzorak 5



HV₁ - Uzorak 6



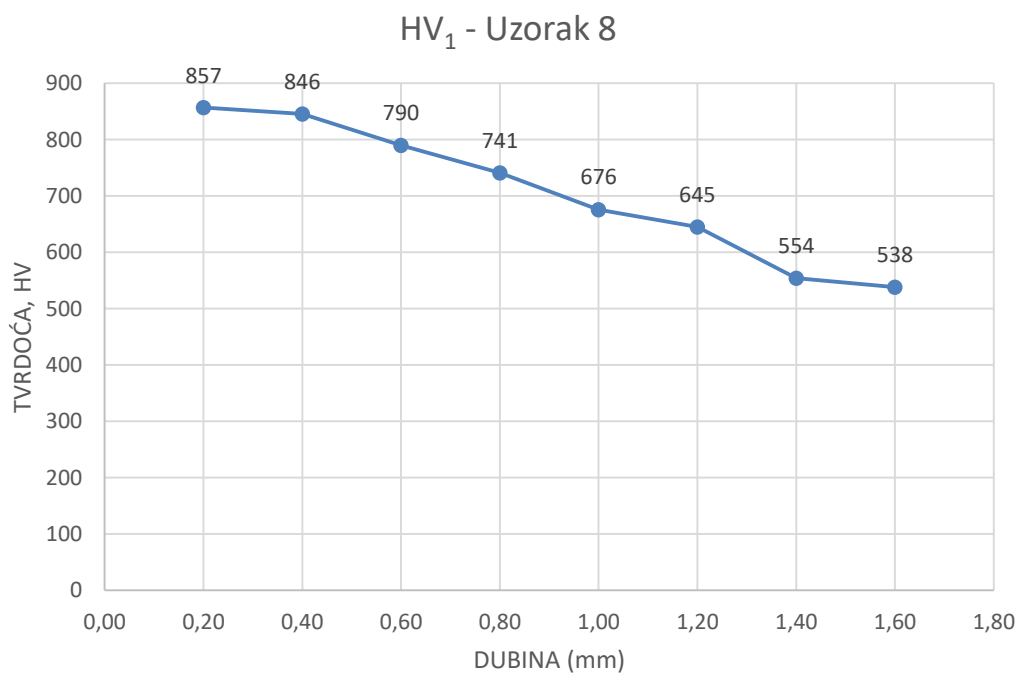
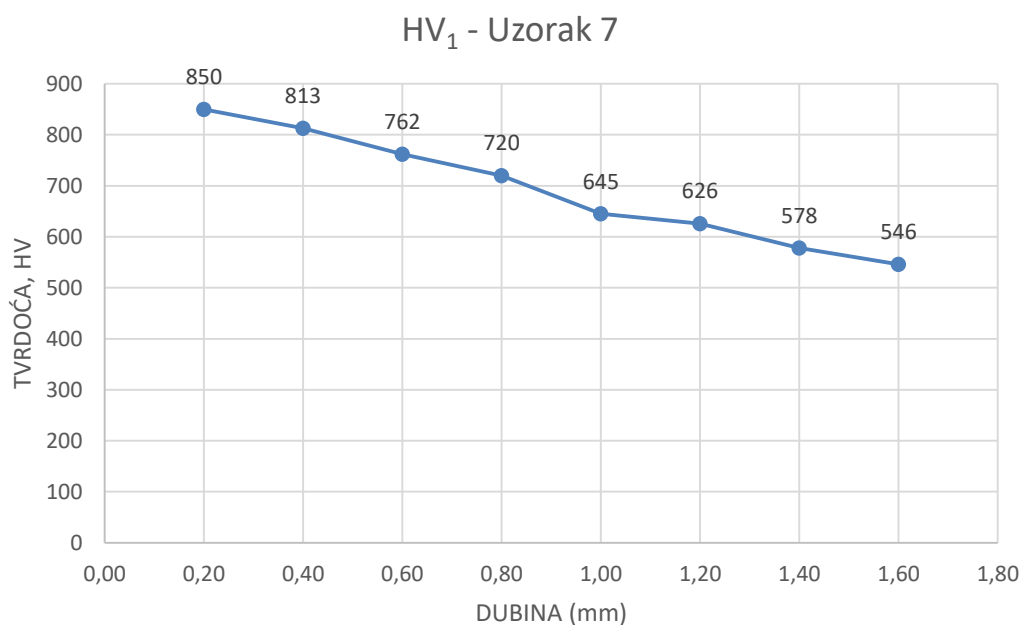
HV₁ - Dijagram 2.1.

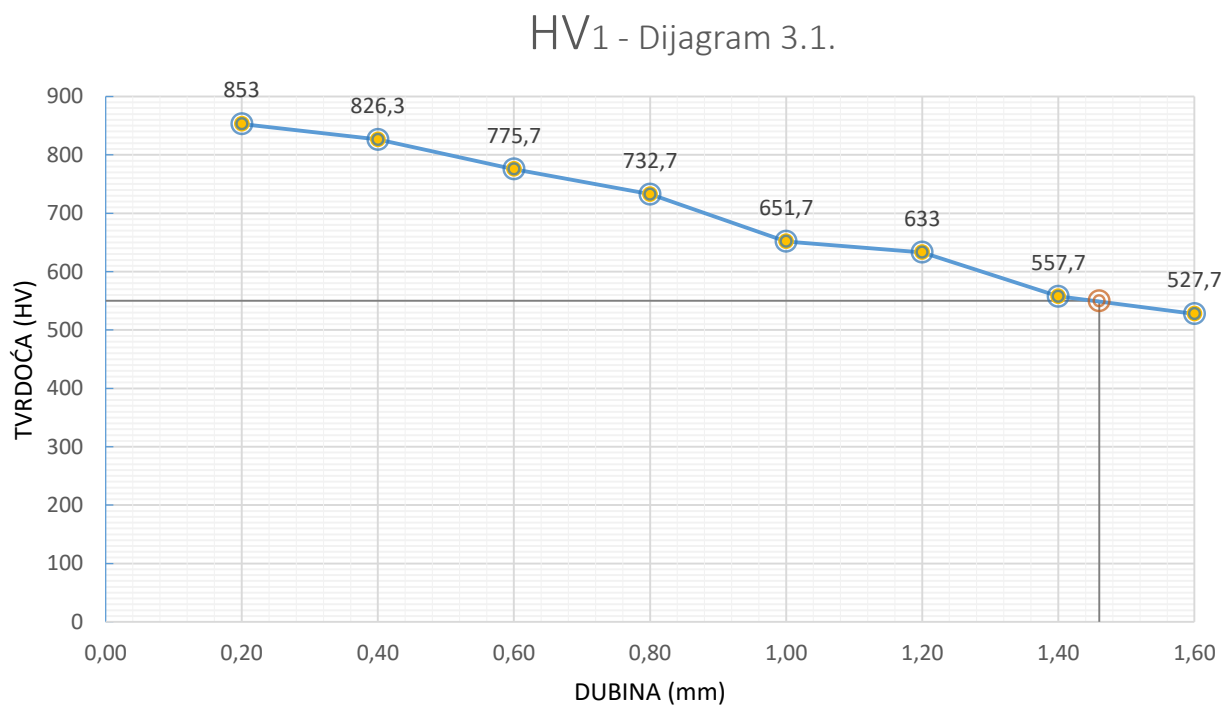
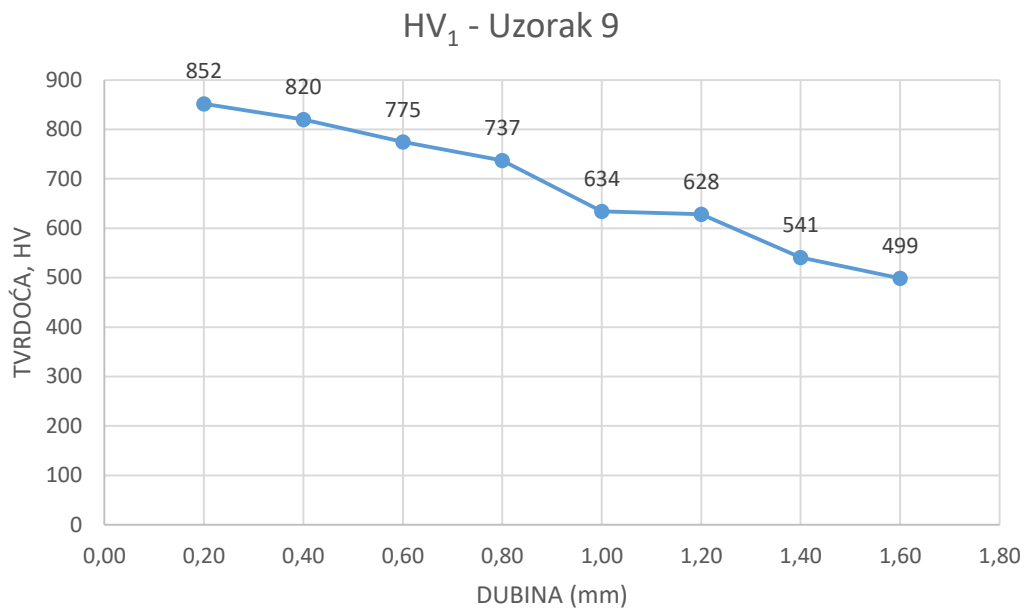


Slika 30. Dijagram uzoraka za Č.1221 na temperaturi 920°C

Č.1221 - 950°C (Uzorci 7,8,9)

550HV;1,46 mm – efektivna dubina cementacije





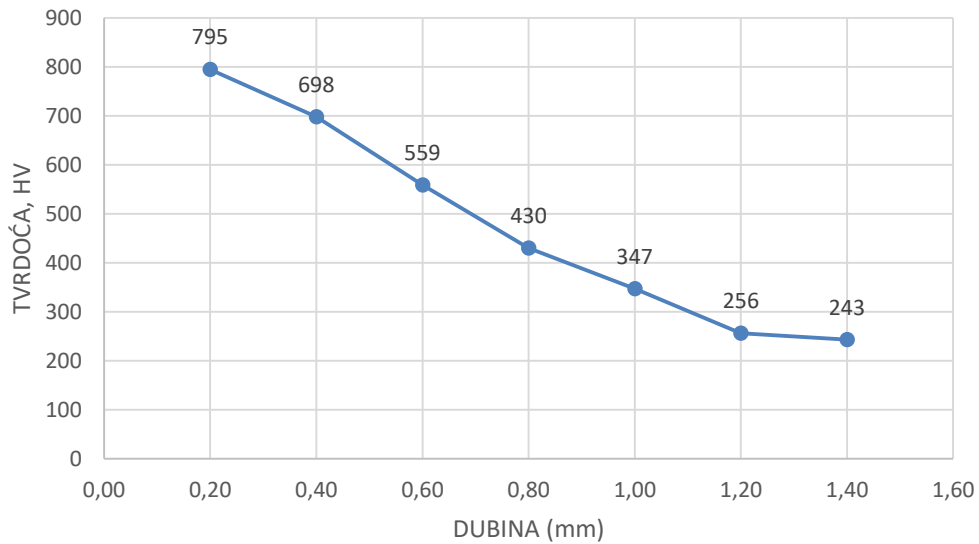
Slika 31. Dijagram uzoraka za Č.1221 na temperaturi 950°C

8.4.2. REZULTATI ISPITIVANJA MIKROTVRDOĆE ZA ČELIK Č.4320

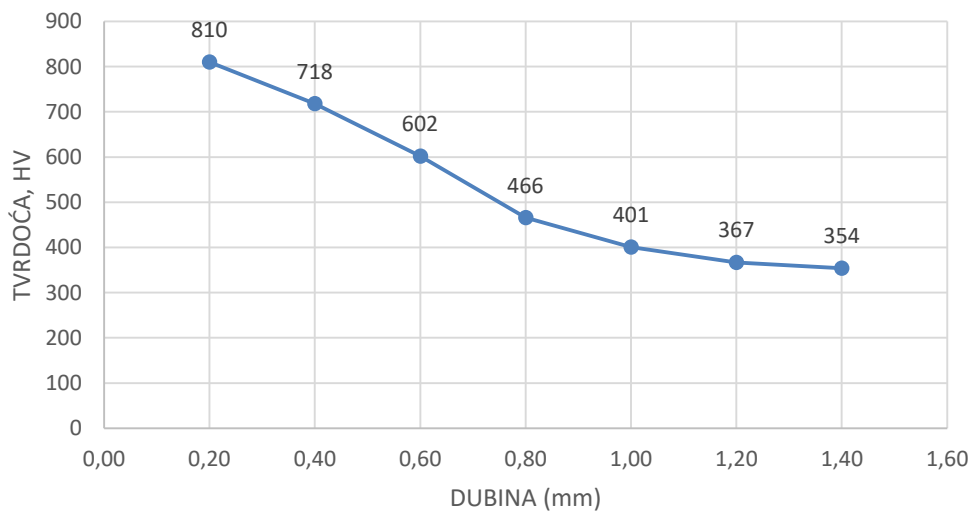
Č.4320 - 880°C (Uzorci 10,11,12)

550HV;0,63 mm – efektivna dubina cementacije

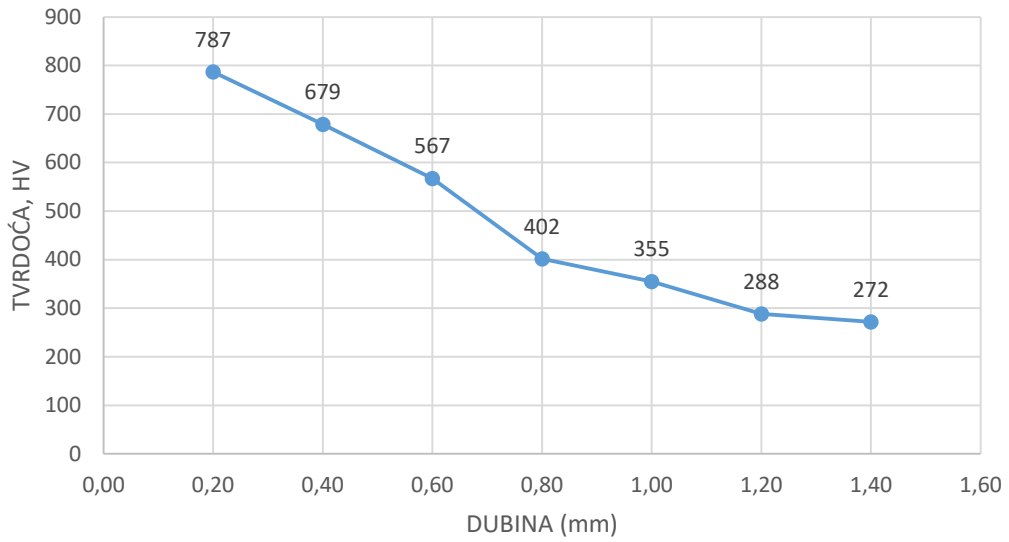
HV₁ - Uzorak 10



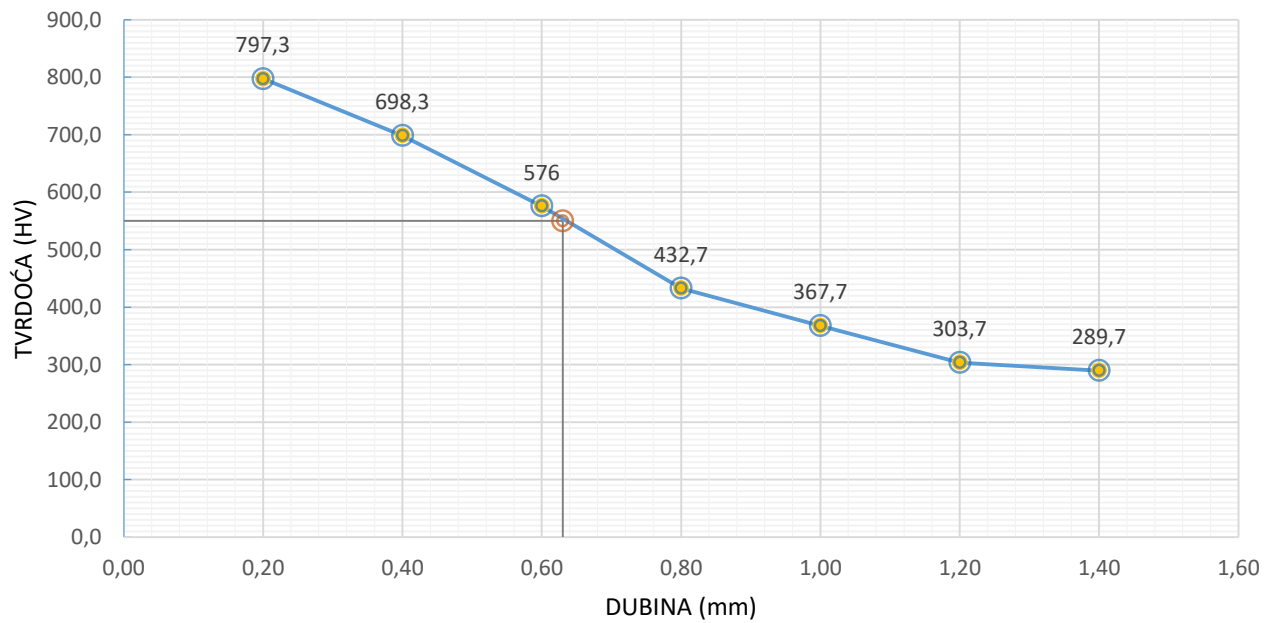
HV₁ - Uzorak 11



HV₁ - Uzorak 12



HV₁ - Dijagram 2.1.

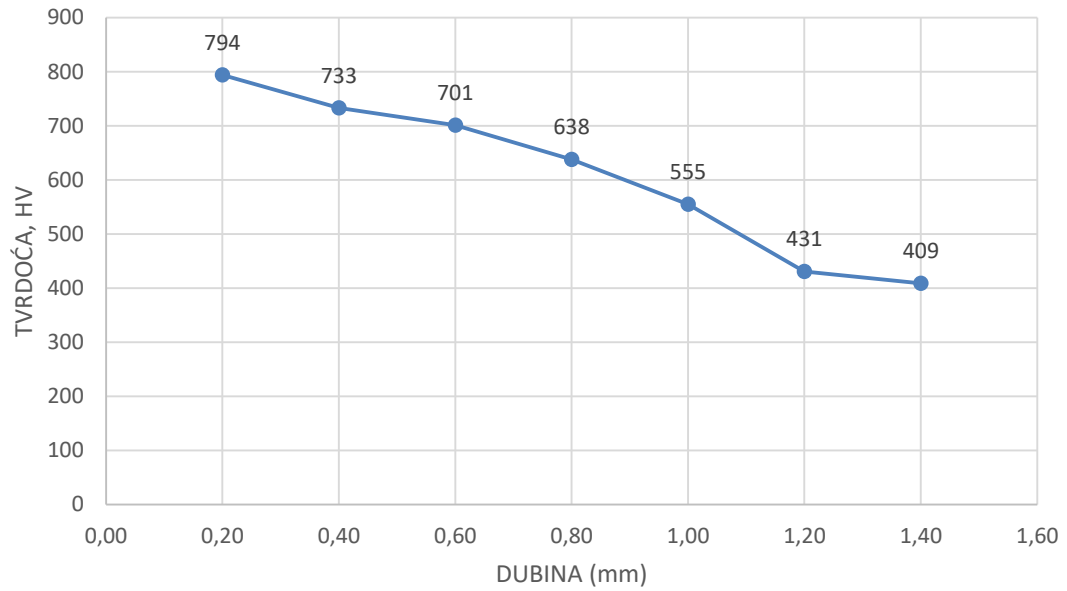


Slika 32. Dijagram uzoraka za Č.4320 na temperaturi 880°C

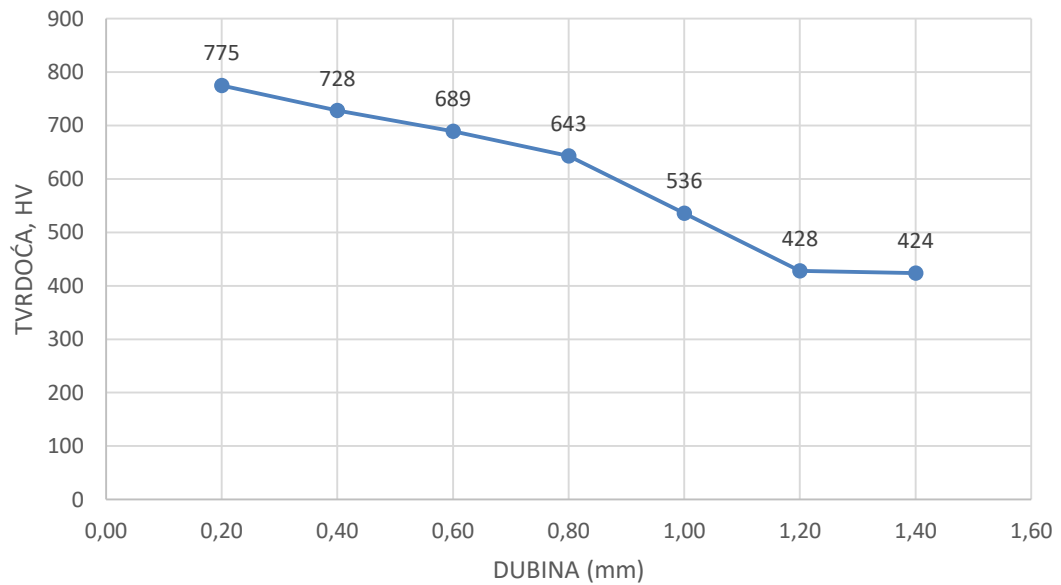
Č.4320 - 920°C (Uzorci 13,14,15)

550HV;1,02 mm – efektivna dubina cementacije

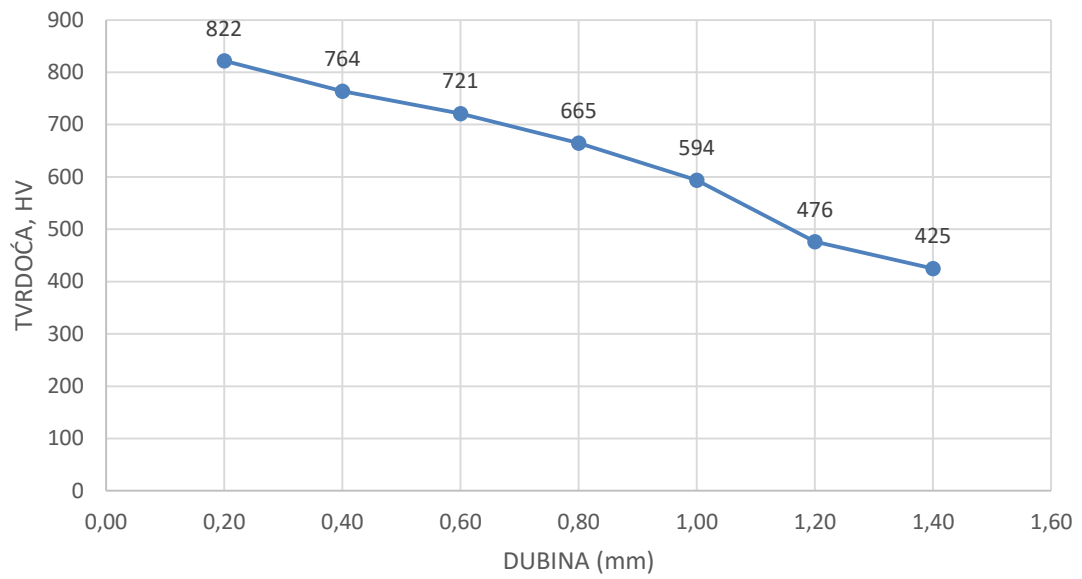
HV₁ - Uzorak 13



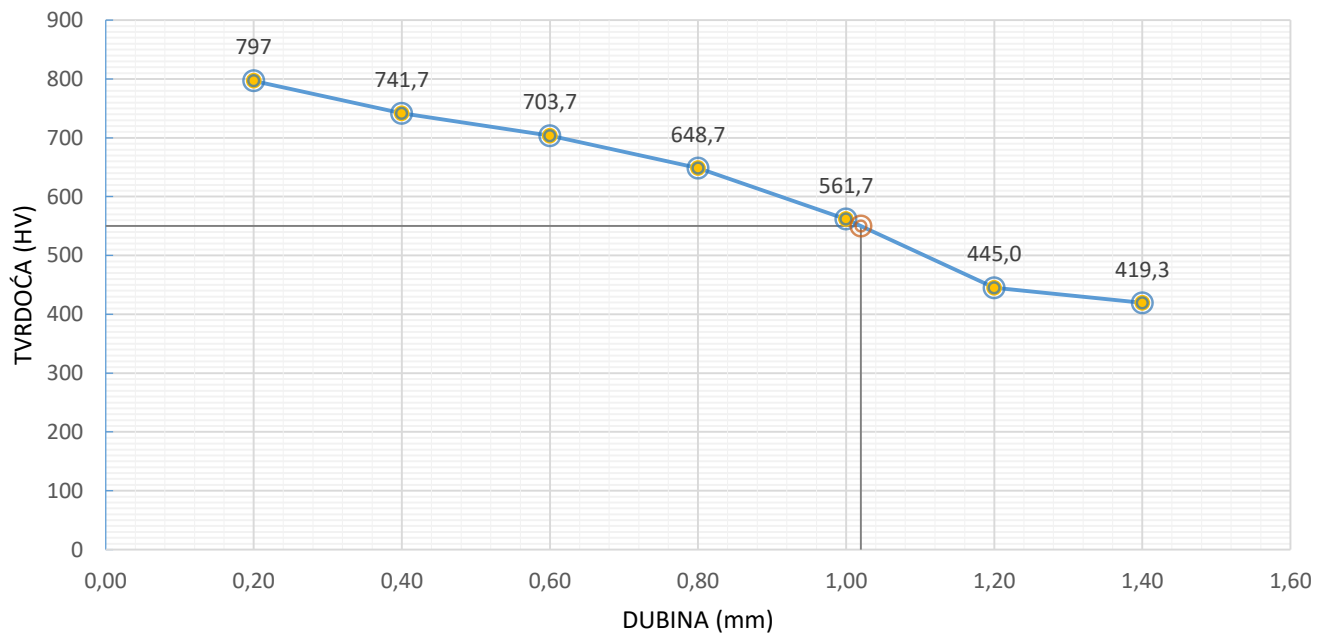
HV₁ - Uzorak 14



HV₁ - Uzorak 15



HV₁ - Dijagram 2.2.

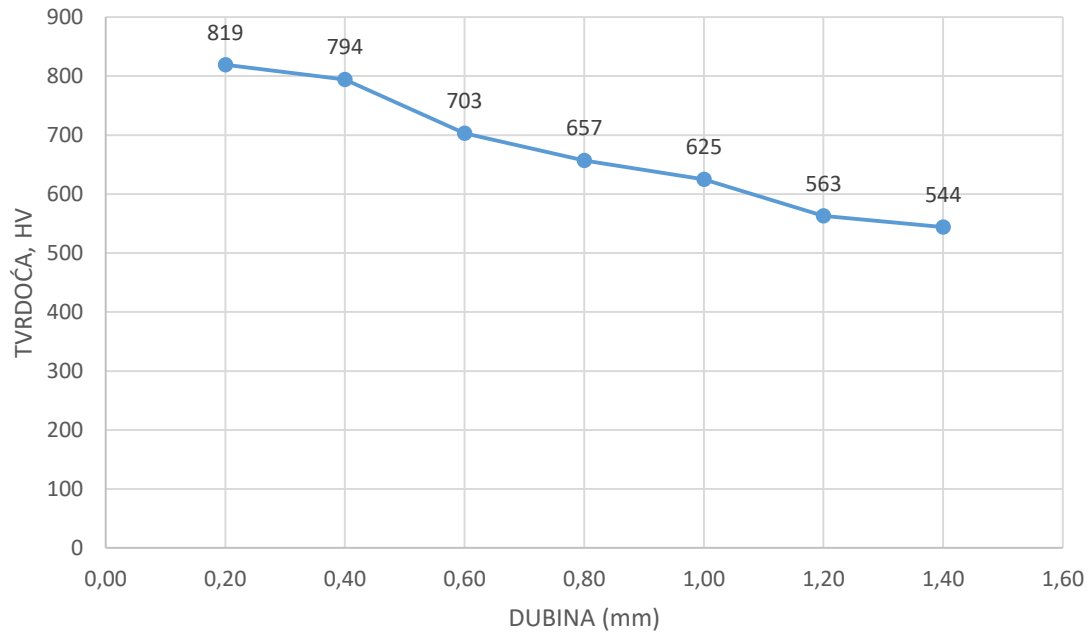


Slika 33. Dijagram uzoraka za Č.4320 na temperaturi 920°C

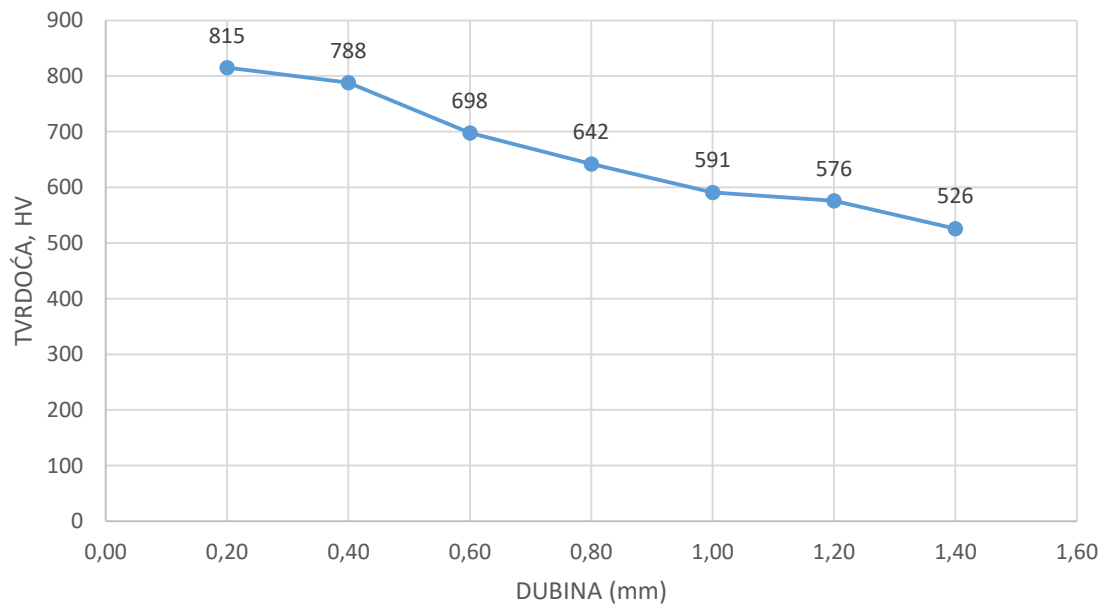
Č.4320 - 950°C (Uzorci 16,17,18)

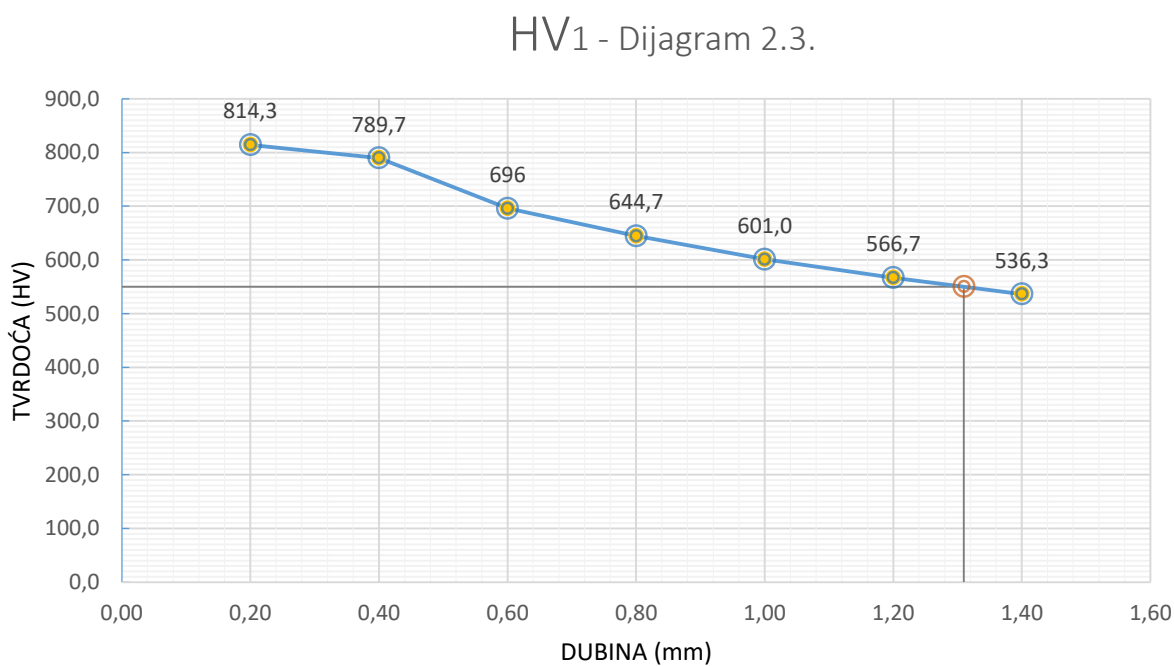
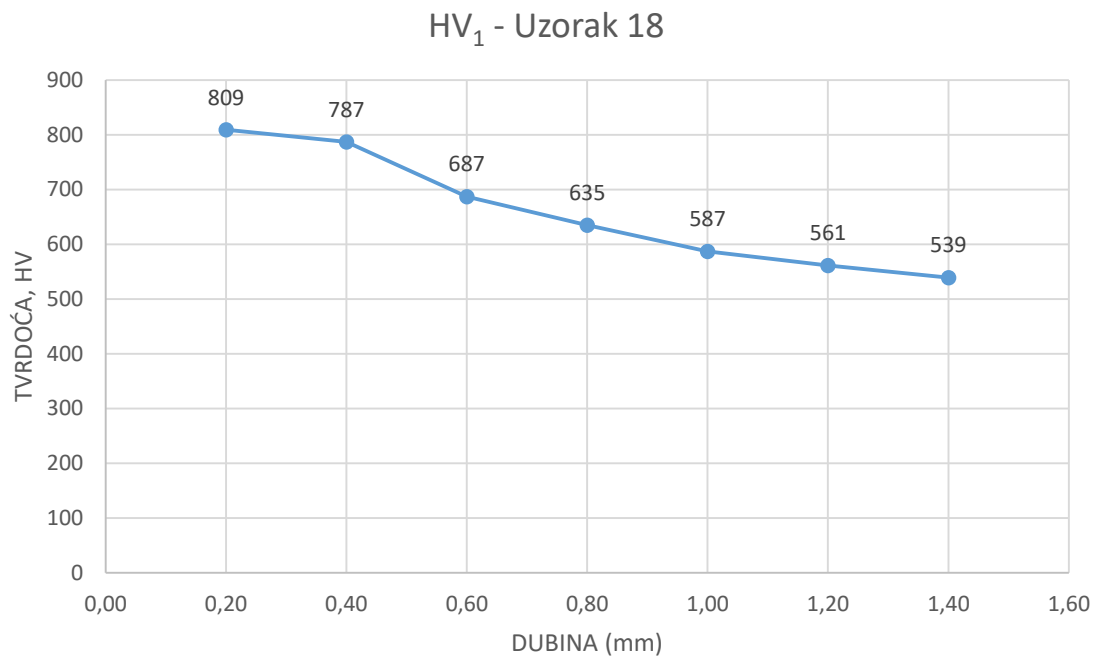
550HV;1,31 mm – efektivna dubina cementacije

HV₁ - Uzorak 16



HV₁ - Uzorak 17



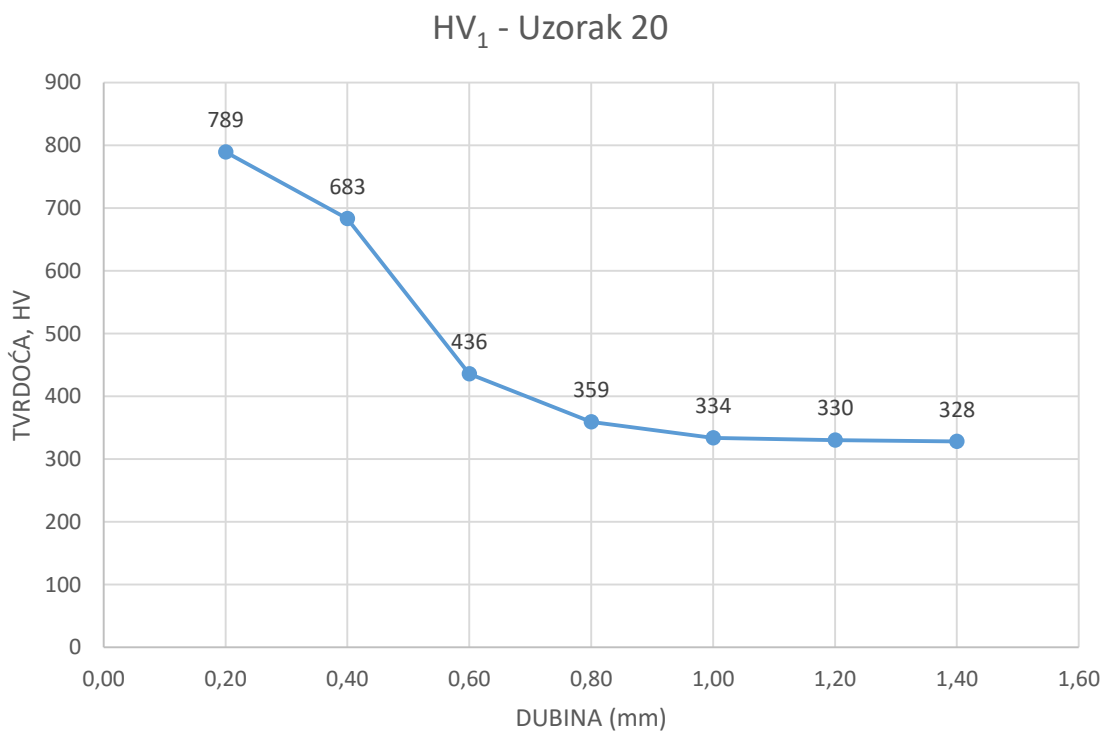
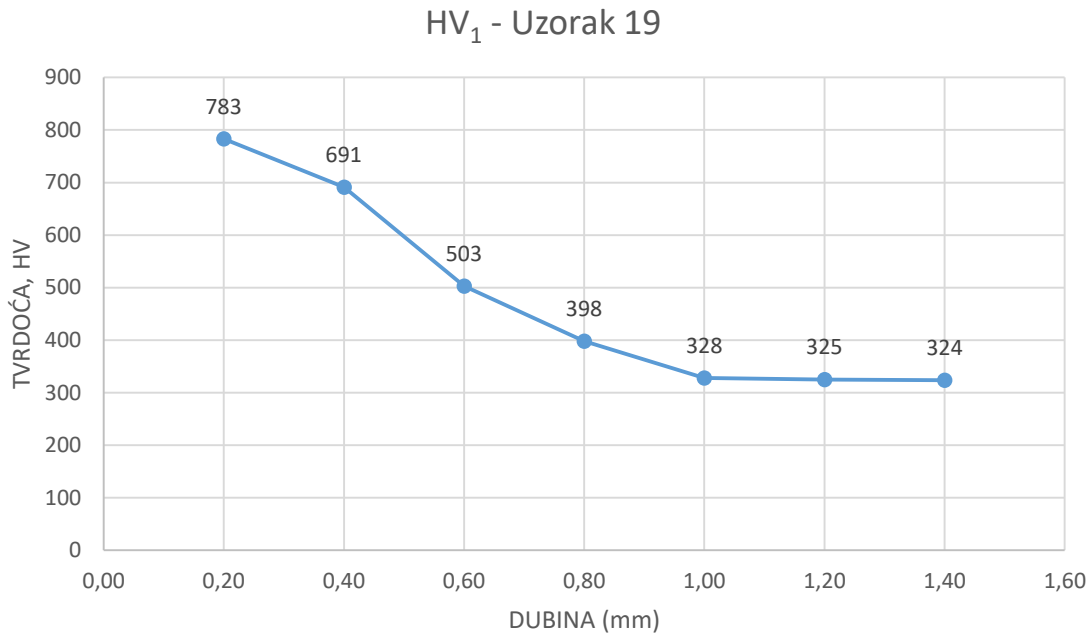


Slika 34. Dijagram uzoraka za Č.4320 na temperaturi 950°C

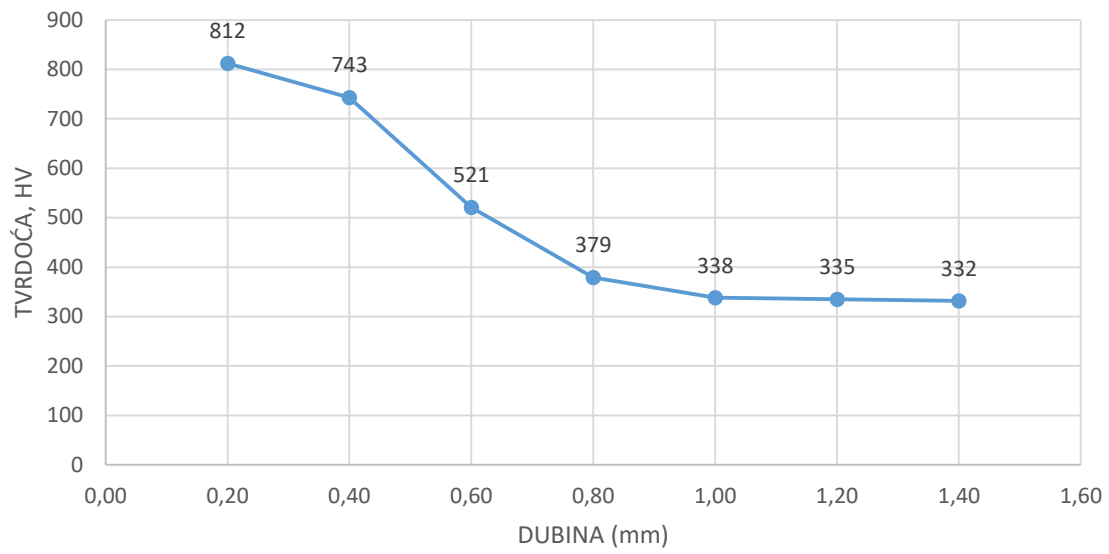
8.4.3. REZULTATI ISPITIVANJA MIKROTVRDOĆE ZA ČELIK Č.5426

Č.5426 - 880°C (Uzorci 19,20,21)

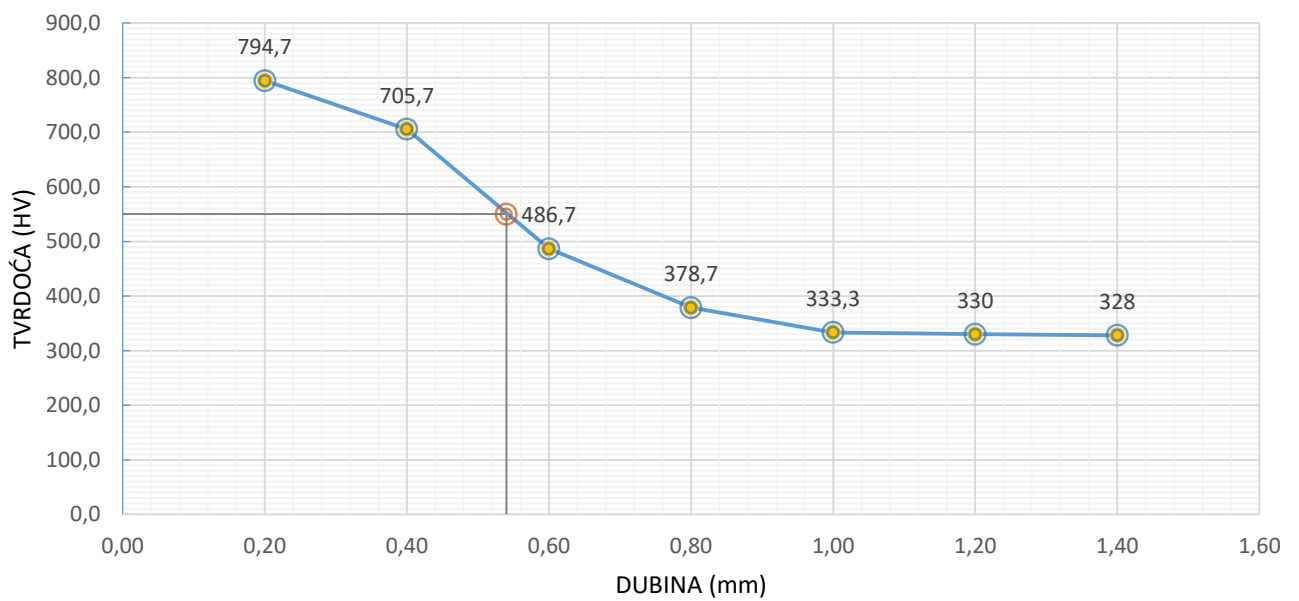
550HV;0,54 mm – efektivna dubina cementacije



HV₁ - Uzorak 21



HV₁ - Dijagram 3.1.

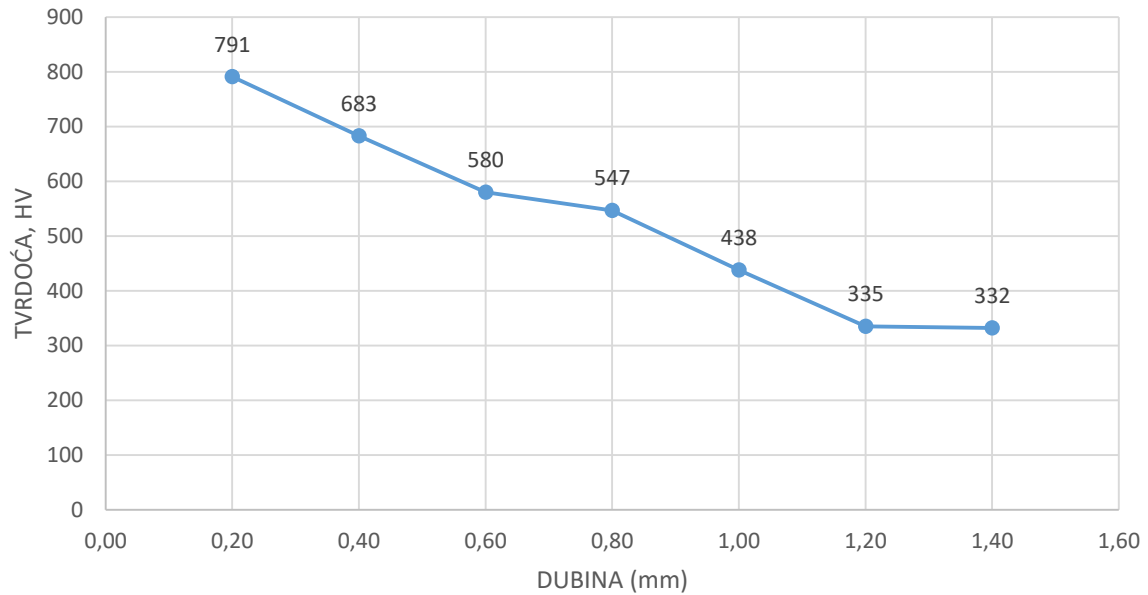


Slika 35. Dijagram uzoraka za Č.5426 na temperaturi 880°C

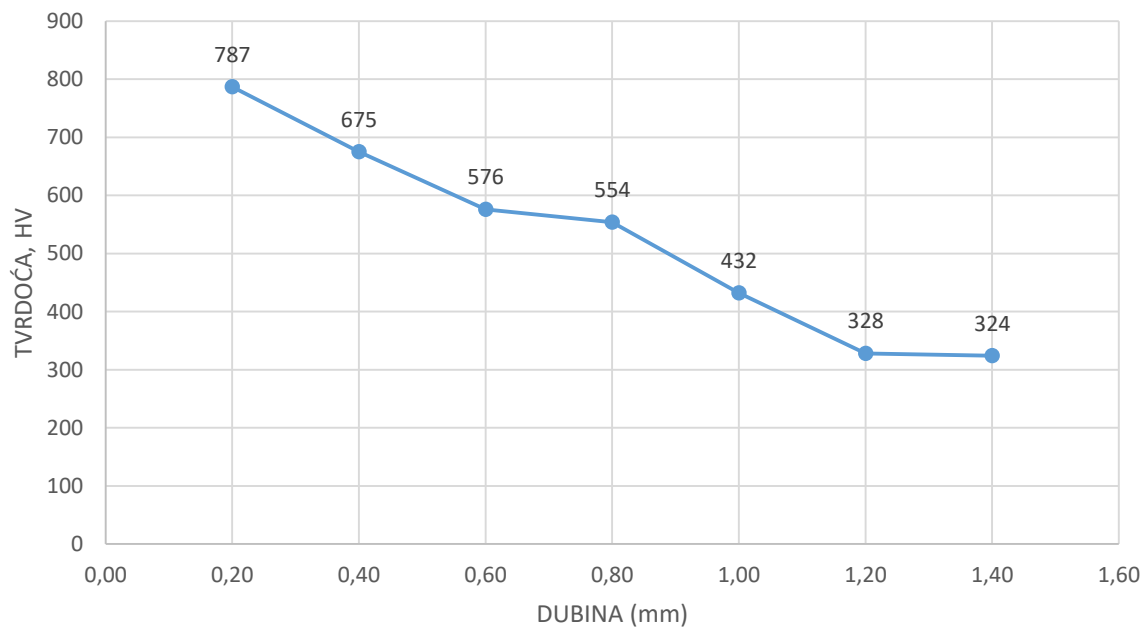
Č.5426 - 920°C (Uzorci 22, 23, 24)

550HV;0,76 mm – efektivna dubina cementacije

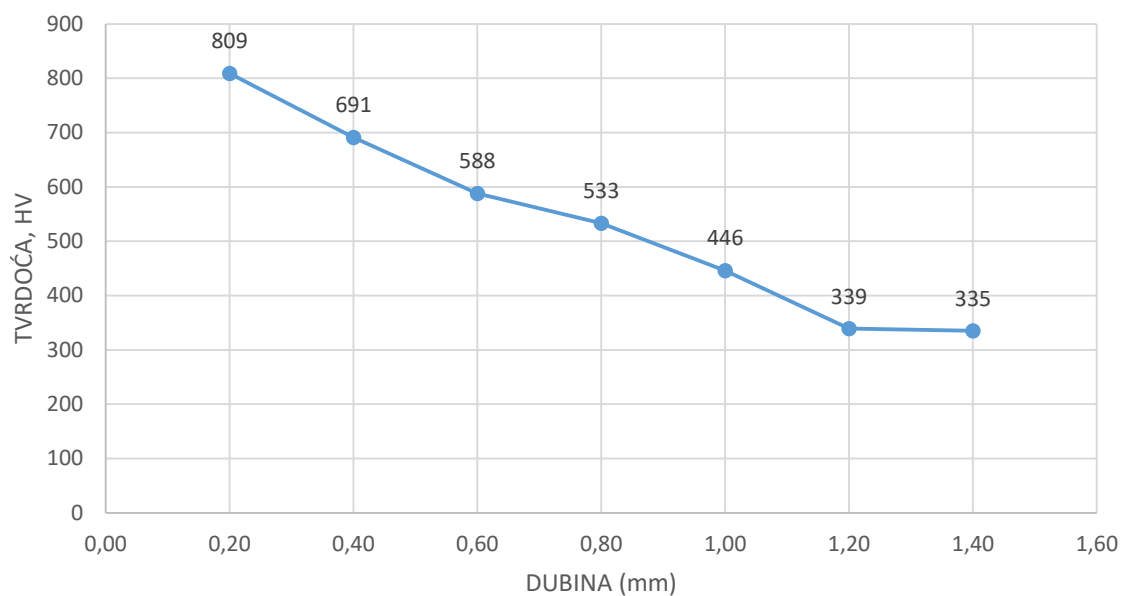
HV₁ - Uzorak 22



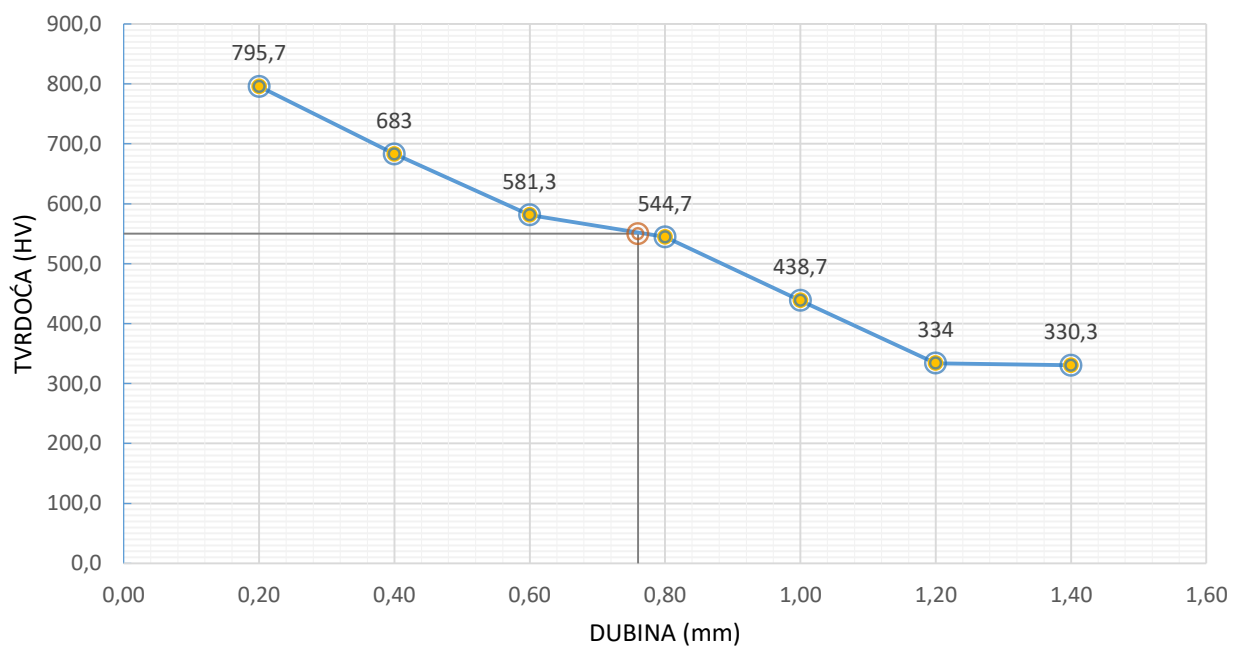
HV₁ - Uzorak 23



HV₁ - Uzorak 24



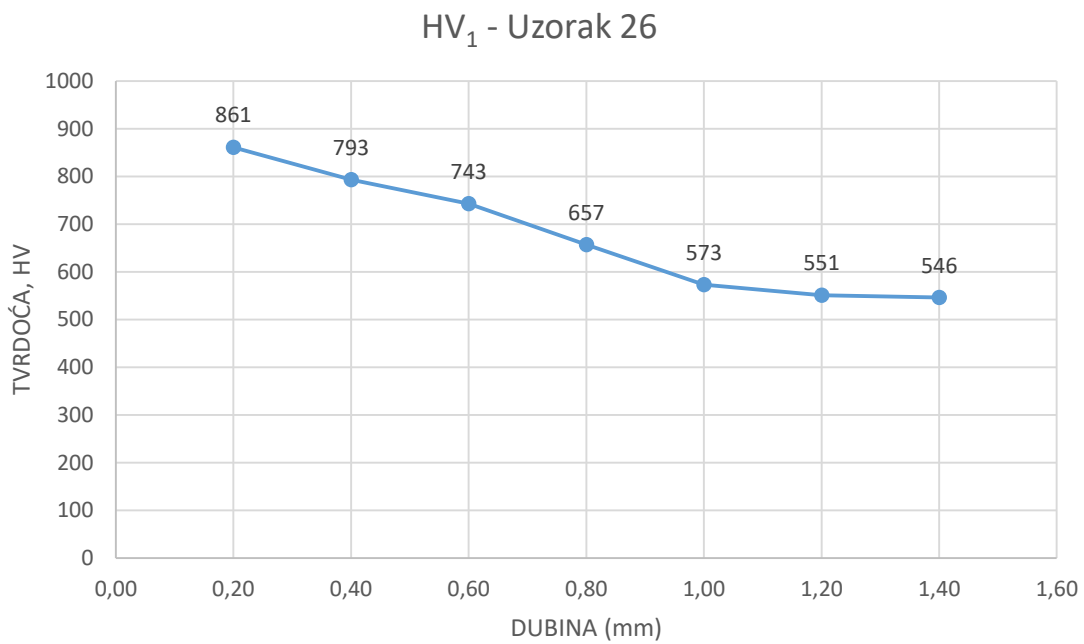
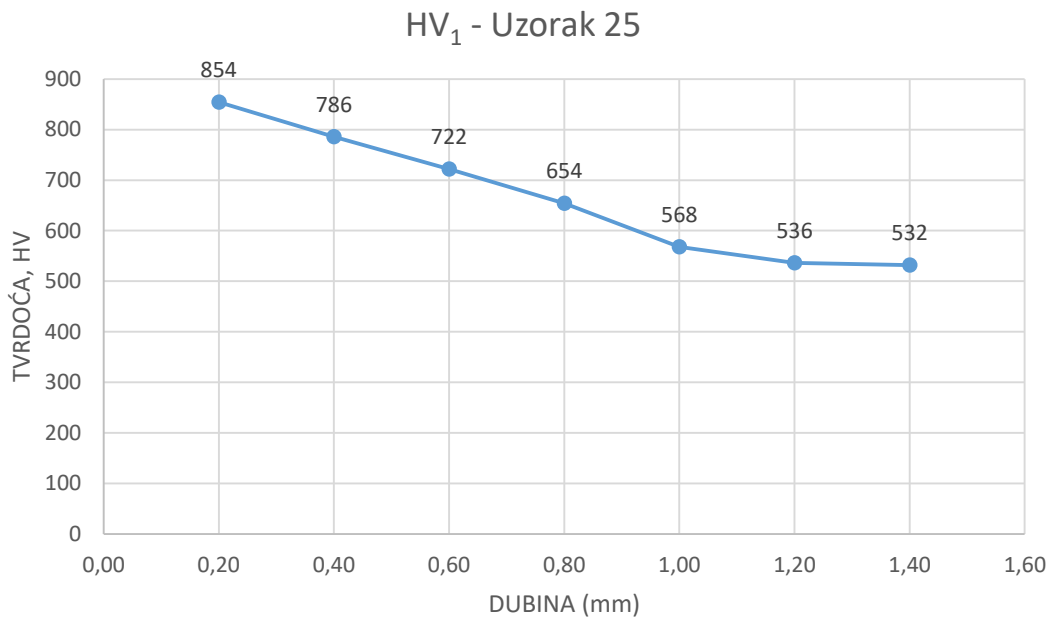
HV₁ - Dijagram 3.2.



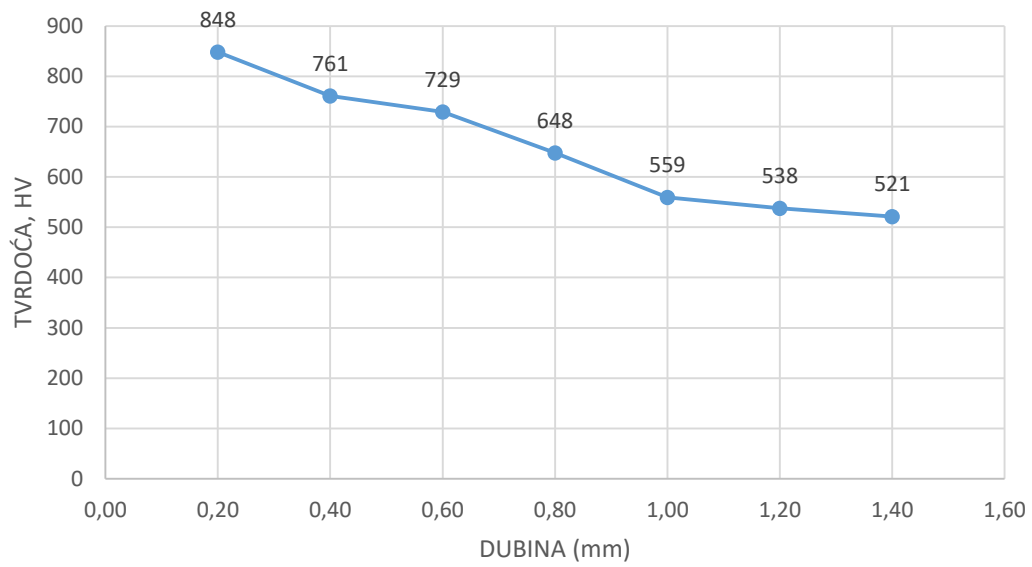
Slika 36. Dijagram uzoraka za Č.5426 na temperaturi 920°C

Č.5426 - 950°C (Uzorci 25, 26, 27)

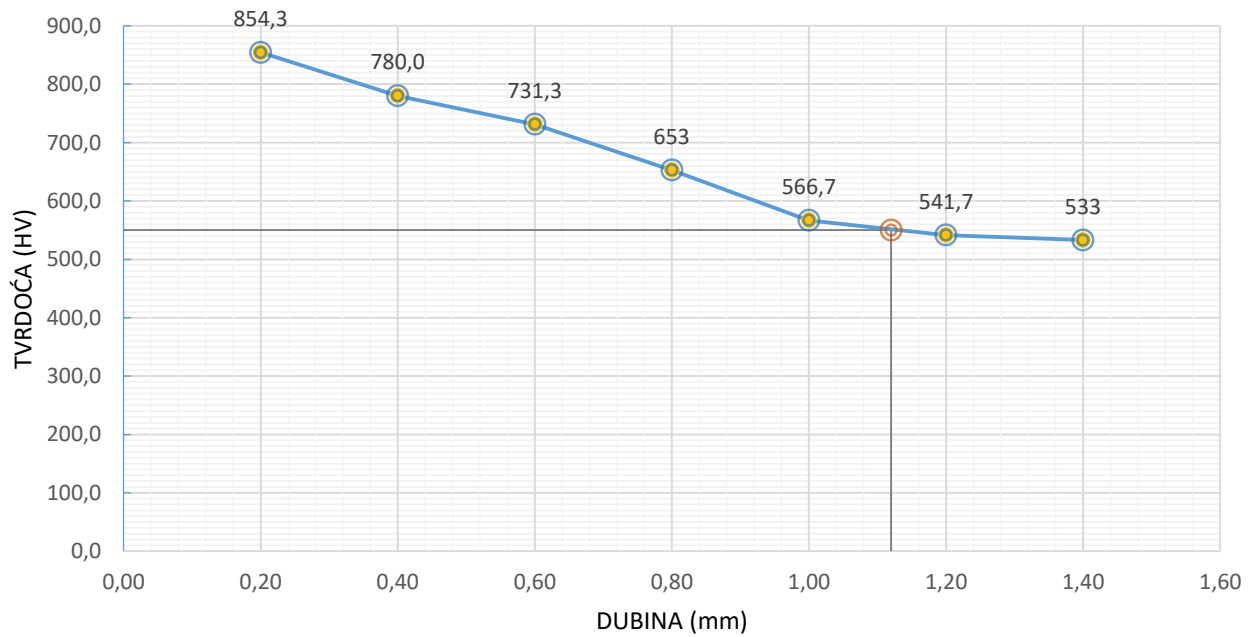
550HV;1,12 mm – efektivna dubina cementacije



HV₁ - Uzorak 27

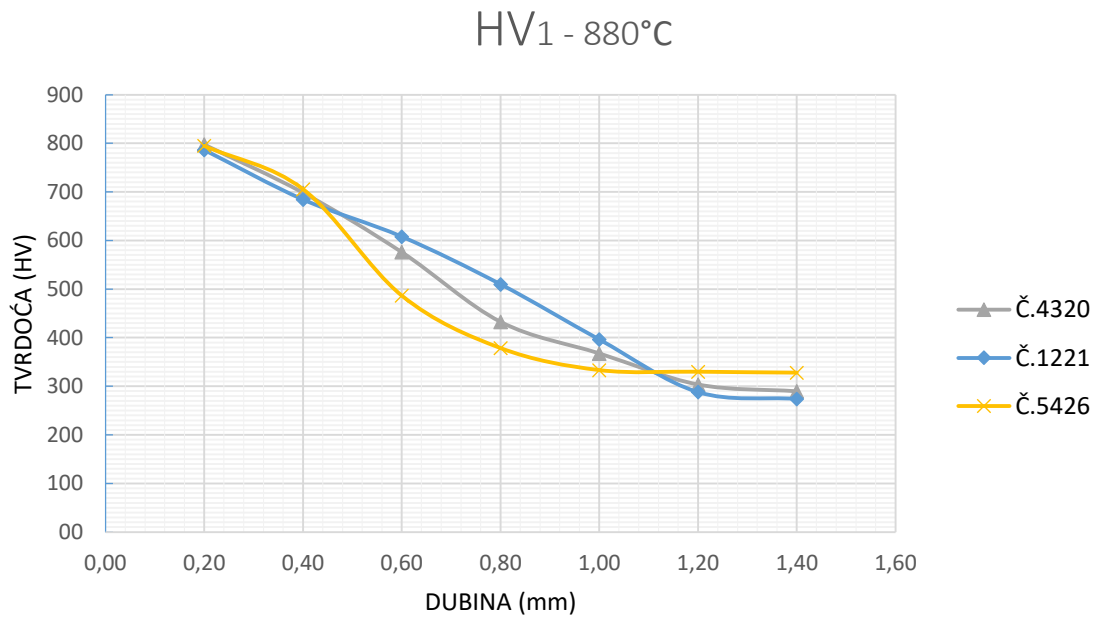


HV₁ - Dijagram 3.3.

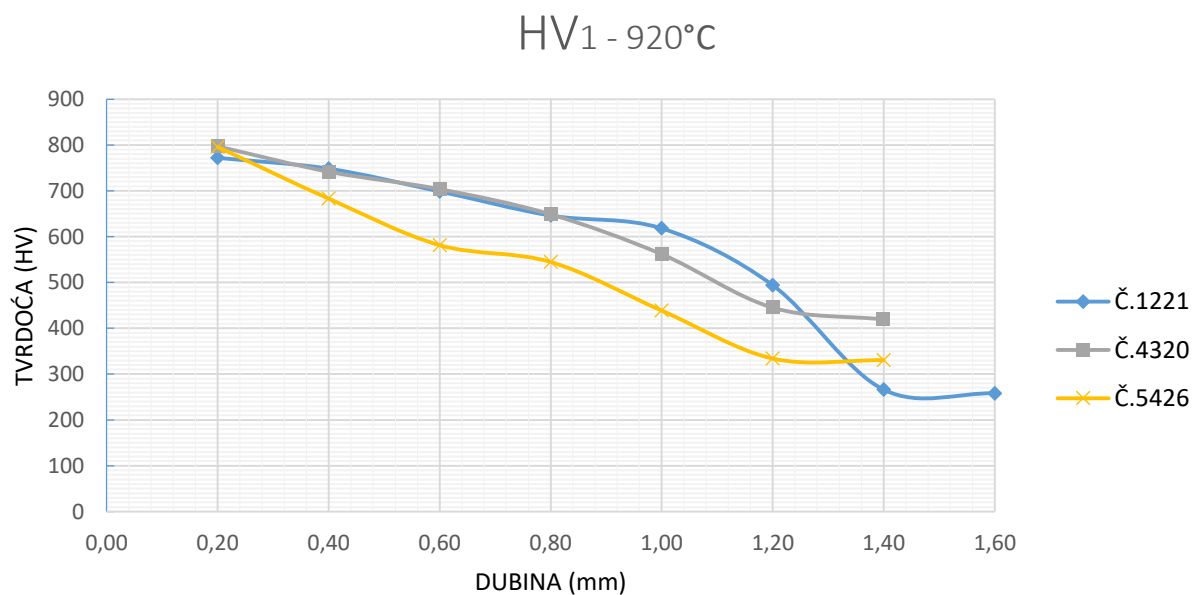


Slika 37. Dijagram uzoraka za Č.5426 na temperaturi 950°C

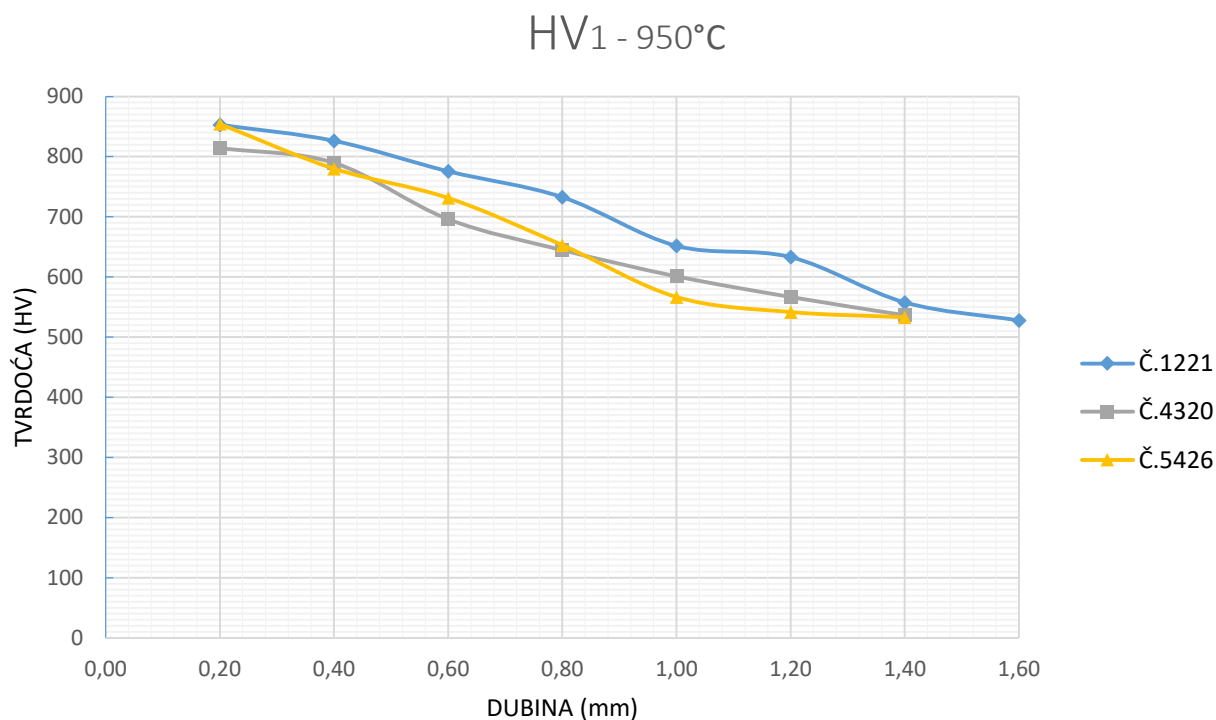
8.4.4. ANALIZA REZULTATA PO TEMPERATURAMA



Slika 38. Dijagram mikrotvrdoće Č.1221, Č.4320 i Č.5426 na temperaturi pougljičenja 880°C



Slika 39. Dijagram mikrotvrdoće Č.1221, Č.4320 i Č.5426 na temperaturi pougljičenja 920°C



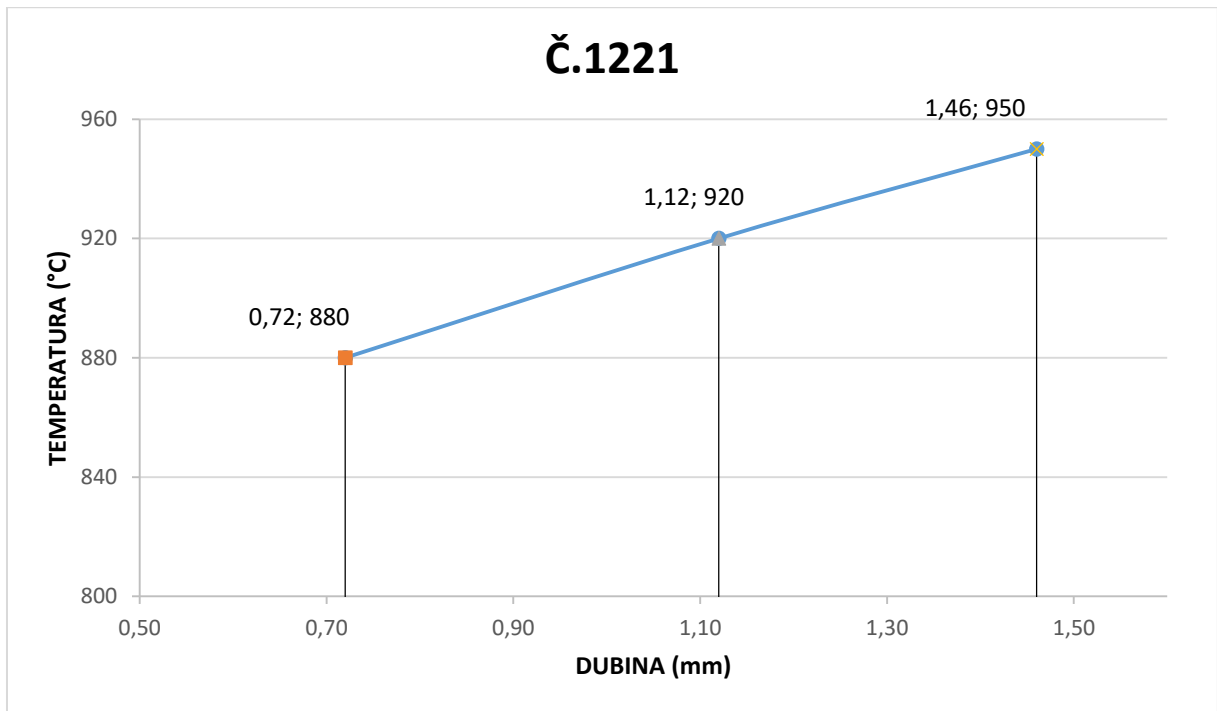
Slika 40. Dijagram mikrotvrdoće Č.1221, Č.4320 i Č.5426 na temperaturi pougličanja 950°C

Na temperaturi cementacije od 880°C najveća efektivna dubina pougličanja postignuta je kod čelika Č.1221 i ona iznosi 0,72 mm, potom slijedi Č.4320 s dubinom od 0,63 mm, te Č.5426 s postignutom dubinom od 0,54 mm. Najveća površinska mikrotvrdoća ispitanih materijala imao je Č.4320 sa iznosom od 797 HV.

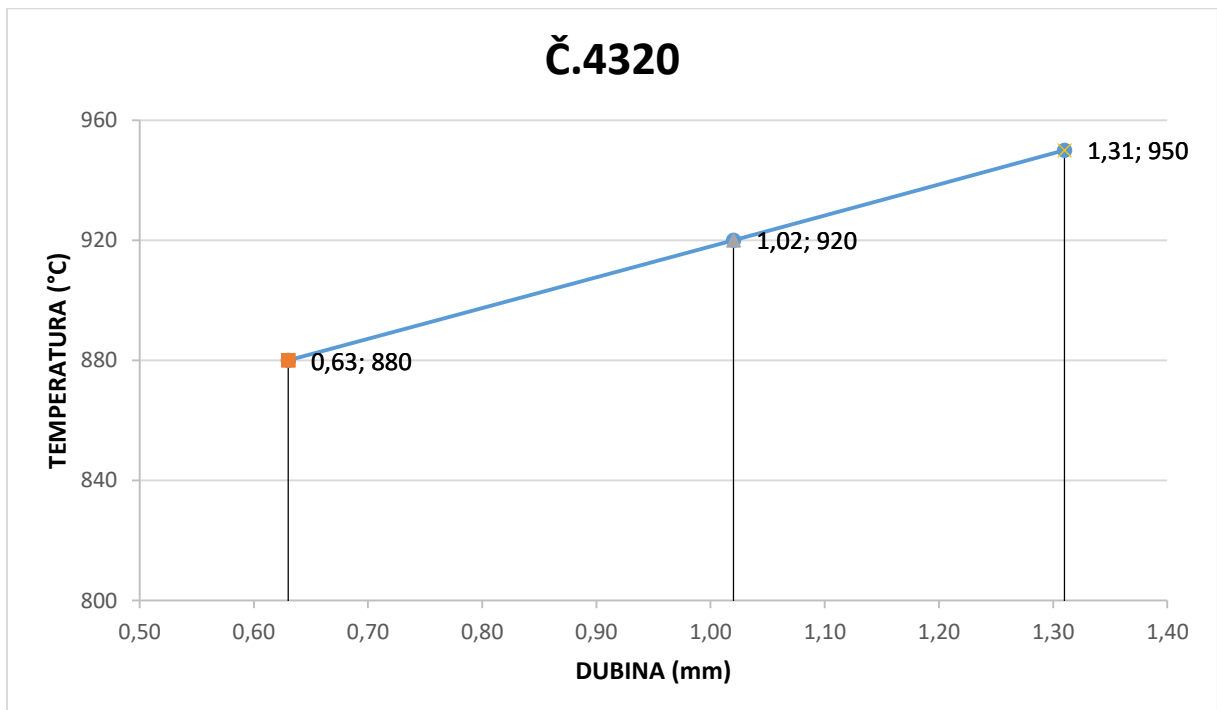
Temperaturom cementacije od 920°C najbolje rezultate postigao je Č.1221 s efektivnom dubinom cementacije od 1,12 mm. Najveću površinsku mikrotvrdoću imao je Č.4320, nešto manje Č.5426, te na posljednjem mjestu Č.1221 sa iznosom mikrotvrdoće od 772 HV.

Posljednja temperatura ispitivanja bila je 950°C. Na toj temperaturi najvišu vrijednost dubine pougličavanja ponovo je imao Č.1221 s efektivnom dubinom od 1,46 mm. Č.5426 imao je najmanju efektivnu vrijednost od sva tri materijala, na svim temperaturama cementacije. Na ovoj temperaturi ona iznosi 1,12 mm. Najmanju površinsku mikrotvrdoću imao je Č.4320.

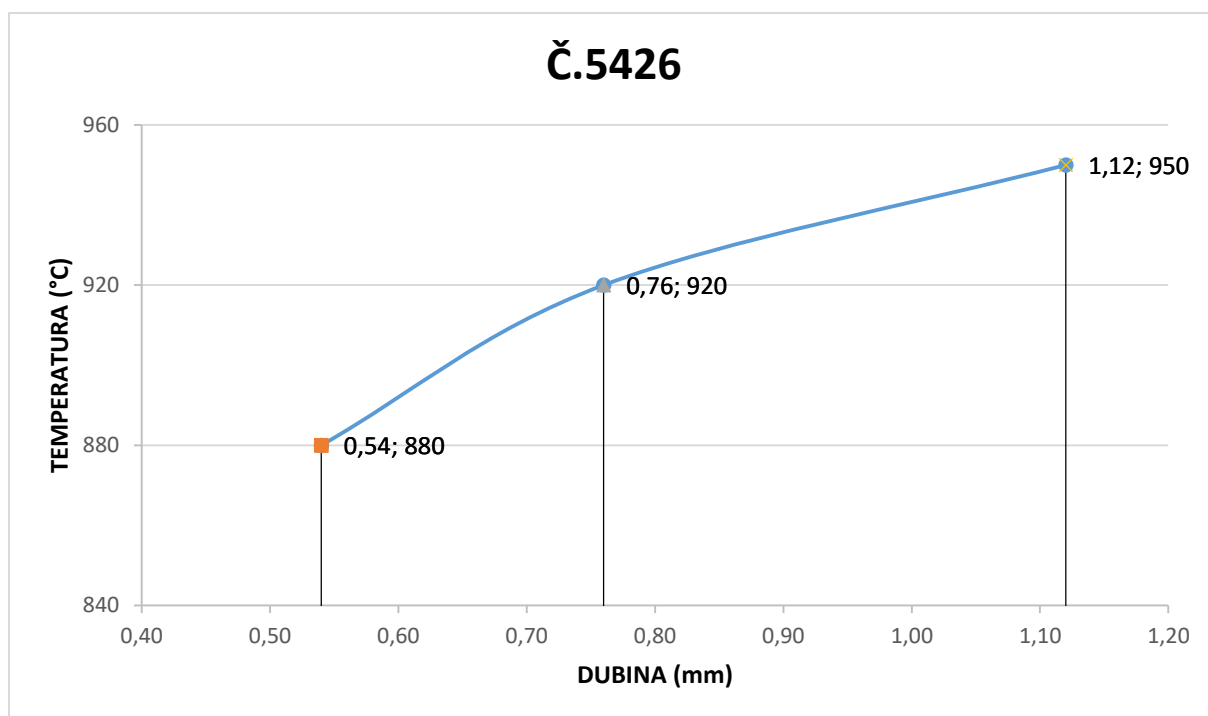
8.4.5. ANALIZA DUBINE (TEMPERATURE) ZA SVAKI POJEDINI ČELIK



Slika 41. Dijagram dubine pougljičenja Č.1221 na tri temperature



Slika 42. Dijagram dubine pougljičenja Č.4320 na tri temperature



Slika 43. Dijagram dubine pougličjenja Č.5426 na tri temperature

Pougličjenje se izvodilo na tri vrste čelika te na tri različite temperature u krutom sredstvu. Čelici su se razlikovali u kemijskom sastavu, što se bitno odrazilo na dobivene rezultate. Za svaki čelik dobiveni rezultati pokazali su veliku razliku u efektivnoj dubini pri različitim temperaturama.

Najbolje rezultate na sve tri temperature imao je nelegirani Č.1221. Promatrajući ponašanje tog čelika podvrgnutim različitim temperaturama uočava se da najmanju dubinu pougličavanja ima na najnižoj ispitanoj temperaturi, tj. 880°C, nešto bolje na temperaturi 920°C s dubinom od 1,12 mm, a najbolje na temperaturi 950°C gdje je postigao rezultat efektivne dubine od 1,46 mm.

Analizirajući Č.4320 uočen je također velik porast efektivne dubine pougličjenja s porastom temperature ispitivanja. Ovaj čelik na temperaturi 880°C postiže dubinu pougličjenja od 0,63 mm, dok je najbolju dubinu postigao na temperaturi 950°C. Također legirani Č.5426 daje nešto manje rezultate od prethodno ispitanog materijala. Ovaj će čelik na temperaturi 880°C postići efektivnu dubinu od 0,54 mm, na temperaturi 920°C će porasti na 0,76 mm, dok na 950°C iznosi 1,12 mm.

10. ZAKLJUČAK

Eksperimentalni dio ovoga rada bazira se na toplinskoj obradi cementacije i ispitivanju koje se izvodilo u prostoru tvrtke Adriadiesel d.d..

U ovoj analizi nije bilo bitno vrijeme pougljičenja već je naglasak bio na utjecaju temperature na dubinu pougljičenja kod nelegiranog Č.1221 (Ck 15) , te dva legirana čelika Č.4320 (16MnCr5) i Č.5426 (15CrNi13). Već u samom kemijskom sastavu ovih ispitanih materijala može se uočiti razlika koja također utječe na rezultate ispitivanja dubine pougljičenja.

Analiza je izvedena na 27 uzoraka, od kojih 9 za svaku vrstu čelika tj. temperaturu procesa pougljičenja. Temperature pougljičenja čiji je utjecaj analiziran su 880°C, 920°C te 950°C. Analizirajući materijale na određenoj temperaturi može se zaključiti da porastom temperature raste i dubina pougljičenja kod sva tri čelika.

Sukladno dijagramima može se očitati da najveću efektivnu dubinu na sve tri temperature postiže Č.1221 koji na temperaturi pougljičenja od 950°C ima efektivnu dubinu od 1,46 mm, što je znatno više u usporedbi s dva legirana čelika koji su na istoj temperaturi postigli dubine od 1,31 mm za Č.4320, te 1,12 mm za Č.5426. No ako se usporedi Č.1221 koji je pougljičen na temperaturi 920°C i Č.5426 pougljičen na temperaturi 950°C, uočava se kako su postigli jednake rezultate efektivne dubine od 1,12 mm. Može se zaključiti kako pravilan odabir temperature pougljičenja, za određeni materijal koji se pougljičava, ima velik utjecaj na konačan rezultat dubine pougljičenja.

LITERATURA

- [1] Robert Sladonja: Tehnologija izrade i kontrola kvalitete cementiranih strojnih dijelova, Karlovac, (2019.)
- [2] Stjepan Kožuh: Specijalizirani čelici, skripta, Sisak, (2010.)
- [3] „Tehnička enciklopedija“, glavni urednik Hrvoje Požar, Grafički zavod Hrvatske, 1987.
- [4] Goran Haviđić: Utjecaj pozicioniranja dijelova pri pougljičenju u krutom sredstvu na rezultate dubine pougljičenja, Karlovac, (2018.)
- [5] „Materijali II“, Igor Gabić, Slaven Šitić, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split 2015.
- [6] Liščić B.: Termokejski postupci, Metalburo Zagreb, (1981.)
- [7] Božić T.: Nastavni materijal, Veleučilište u Karlovcu
- [8] „Strojarski priručnik“, Bojan Kraut, Tehnička knjiga Zagreb 2009.
- [9] <https://omnimerkur.hr/prodajni-program/crna-metalurgija/celici-za-cementiranje/> , dostupno 16.3.2020.
- [10] Vlastita izrada

POPIS OZNAKA

Simbol	Jedinica	Značenje
ϑ_{TO}	°C	temperatura toplinske obrade
D_c	cm ² /s	koeficijent difuzije ugljika
M	g	masa ugljika
t	s	vrijeme
C_{pov}	%	sadržaj ugljika na površini
C_p	%	C-potencijal ugljika
C_j	%	sadržaj ugljika u jezgri
d_{ef}	cm	efektivna dubina pougljičavanja
T	h	vrijeme pougljičavanja
R_e, R_p	N/mm ²	granica razvlačenja
$R_{p0,2}$	N/mm ²	konvncionalna granica razvlačenja
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
A_5	%	produljenje

POPIS SLIKA

Slika 1. Opći dijagram procesa toplinske obrade [1].....	1
Slika 2. Mikrostruktura cementiranog zupčanika izrađenog iz čelika 16MnCr5 [2]	3
Slika 3. Dijagram postupka cementacije [3].....	7
Slika 4. Burns-ov dijagram [4].....	8
Slika 5. Prikaz procesa pougljičenja čelika [3]	10
Slika 6. Utjecaj trajanja pougljičenja na dubinu pougljičenja [3].....	11
Slika 7. Utjecaj temperature na dubinu pougljičenja za Č.1220 [3].....	12
Slika 8. Prikaz tijeka promjene udjela ugljika u pougljičenom sloju [3].....	13
Slika 9. Utjecaj vremena držanja izratka (na temperaturi pougljičenja) na dubini pougljičenog sloja za različita sredstva pougljičenja [5].....	14
Slika 10. Pougljičenje u krutom sredstvu [5]	16
Slika 11. Stanje u Fe-C dijagramu nakon pougljičenja [5].....	22
Slika 12. Izgled cementiranog sloja prije (lijevo) i nakon (desno) toplinske obrade kaljenja [5]	23
Slika 13. Direktno kaljenje [6]	24
Slika 14. Jednostruko kaljenje nakon ohlađivanja u kutiji s granulatom [6].....	24
Slika 15. Jednostruko kaljenje ruba nakon izotermičke pretvorbe jezgre [6]	25
Slika 16. Dvostruko kaljenje [6].....	26
Slika 17. Uzorci prije pougljičenja [10]	28
Slika 18. Plan eksperimentalnog dijela	29
Slika 19. Plan analize rezultata.....	30
Slika 20. Priprema i pozicioniranje uzoraka u čeličnu kutiju [10].....	31
Slika 21. Prikaz pripremljene čelične kutije za proces pougljičenja [10]	31
Slika 22. Komorna elektro peč [10].....	32
Slika 23. Uzorci Č.1221 i Č.4320 nakon postupka cementacije [10].....	33
Slika 24. Uzorci Č.5426 nakon postupka cementacije [10].....	34
Slika 25. Pila marke Buehler [10].....	34
Slika 26. Polirka Buehler Ecomet 3 [10]	35
Slika 27. Mjerni uređaj za ispitivanje tvrdoće [10]	36
Slika 28. LEITZ Durimet 2 mikroskop [10]	37

Slika 29. Dijagram uzoraka za Č.1221 na temperaturi 880°C.....	39
Slika 30. Dijagram uzoraka za Č.1221 na temperaturi 920°C.....	41
Slika 31. Dijagram uzoraka za Č.1221 na temperaturi 950°C.....	43
Slika 32. Dijagram uzoraka za Č.4320 na temperaturi 880°C.....	45
Slika 33. Dijagram uzoraka za Č.4320 na temperaturi 920°C.....	47
Slika 34. Dijagram uzoraka za Č.4320 na temperaturi 950°C.....	49
Slika 35. Dijagram uzoraka za Č.5426 na temperaturi 880°C.....	51
Slika 36. Dijagram uzoraka za Č.5426 na temperaturi 920°C.....	53
Slika 37. Dijagram uzoraka za Č.5426 na temperaturi 950°C.....	55
Slika 38. Dijagram mikrotvrdoće Č.1221, Č.4320 i Č.5426 na temperaturi pougljičenja 880°C.....	56
Slika 39. Dijagram mikrotvrdoće Č.1221, Č.4320 i Č.5426 na temperaturi pougljičenja 920°C.....	56
Slika 40. Dijagram mikrotvrdoće Č.1221, Č.4320 i Č.5426 na temperaturi pougljičenja 950°C.....	57
Slika 41. Dijagram dubine pougljičenja Č.1221 na tri temperature	58
Slika 42. Dijagram dubine pougljičenja Č.4320 na tri temperature	58
Slika 43. Dijagram dubine pougljičenja Č.5426 na tri temperature	59

POPIS TABLICA

Tablica 1. Čelici za cementaciju [2]	2
Tablica 2. Kemijski sastav čelika [8]	27
Tablica 3. Mehanička svojstva čelika [8].....	27