SKLONOST ČELIKA POUGLJIČAVANJU

Vulin, Milica

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:530238

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-10**

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Milica Vulin

SKLONOST ČELIKA POUGLJIČAVANJU

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2020.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Milica Vulin

SKLONOST ČELIKA POUGLJIČAVANJU

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Tomislav Božić dipl. ing. stroj.

Karlovac, 2020.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Ime i prezime	Milica Vulin		
OIB / JMBG			
Adresa	Karlovac		
Tel. / Mob./e-mail			
Matični broj studenta	0110614022		
JMBAG			
Studij (staviti znak **X** ispred odgovarajućeg studija)	• preddiplomski	specijalistički diplomski	
Naziv studija	Stručni studij strojarstva		
Godina upisa	2014.		
Datum podnošenja molbe			
Vlastoručni potpis studenta/studentice			

Naslov teme na hrvatskom: Sklonost čelika pougljičavanju	
Naslov teme na engleskom: The tendency of steel to carbonite	
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 eksperimentalnom (praktičnom) dijelu rada sukladno zadanom planu pokusa provođenja eksperimenta analizirati ukupan proces. Temeljem rezultata ispitivanja pojedinih dubina pougljičenja donijeti zaključak kako različiti polazni kemijski sastavi utječu na dubine pougljičenja u identičnim uvjetima. Zadatak izvršiti sukladno pravilniku za izradu završnih radova VuKa.	
Mentor:	Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad na temu „Sklonost čelika pougljičavanju“ izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija te navedenu stručnu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Tomislavu Božiću, dipl. ing. stroj. na uloženom vremenu i trudu te na ustupanju dodatnih znanja i literature. Jednako tako, zahvaljujem se tvrtki Adriadiesel d.d. i djelatnicima odjela toplinske obrade Ivici Livojević i Dubravku Golubić, dipl. ing. na tehničkoj pomoći pri izradi ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na pruženoj pomoći i podršci tijekom studiranja.

Milica Vulin

Naslov: SKLONOST ČELIKA POUGLJIČAVANJU

SAŽETAK

Prilikom izrade tehničkih proizvoda potrebno je izabrati materijal koji će svojim svojstvima osigurati kvalitetan završni proizvod. Potrebno je poznavati materijale te elementarne postupke obrade materijala kako bi se time dobio koristan i funkcionalan proizvod sa sačuvanim uloženim vrijednostima. Postoje razlike u odabiru čelika, opreme i tehnike, ali uslijed toga nastaju i razlike u kvaliteti gotovog proizvoda.

Iako se pougljičavanje može odvijati na nekoliko načina (u krutim, tekućim i plinovitim sredstvima), svim postupcima je zajednički ciljani rezultat, a to je stvaranje površinskog sloja bogatim ugljikom koji nakon kaljenja otvrdnjava. Kako samo tvrdoća ne može biti pokazatelj zadovoljavajuće kvalitete cementiranog sloja, neophodno je obratiti pozornost na mikrostrukturna svojstva koja bitno utječu na ukupna svojstva obratka, a time i na životni vijek dijelova.

Teoretski dio ovog rada daje kratak uvid u čelike, a detaljnije su objašnjeni čelici za cementaciju (vrste, svojstva i ponašanja ovisno o temperaturi). Opisani su termodifuzijski postupci obrade materijala gdje se fokus zadržao na postupku toplinske obrade cementacije. Objašnjene su i faze cementacije koja uključuju pougljičavanje, kaljenje te niskotemperaturno popuštanje s metodama ispitivanja.

Eksperimentalni dio rada bit će usmjeren na analiziranju cijelog procesa. Počevši od pripreme radnih komada, toplinske obrade (procesa cementacije), izvođenja ispitivanja uzoraka te završno s analizom dobivenih rezultata. Analizom rezultata bit će doneseni zaključci kako polazni kemijski sastav materijala C-15E, 16MnCr5, 15CrNi13 utječe na dubinu pougljičavanja.

Ključne riječi: pougljičavanje, kemijski sastav, C-15E, 16MnCr5, 15CrNi13.

Title: THE TENDENCY OF STEEL TO CARBONITE

SUMMARY

In designing technical products it is necessary to choose a material that will provide a quality final product with its properties. There is a need of knowing the materials and the elementary methods of material treatment in order to obtain a useful and functional product with preserved invested values. There are differences in choosing of steel, equipment and technique, and as a consequence, there is a difference in the quality of the final product.

Although carbonation can be performed in several ways (in solid, liquid and gaseous media) all processes have a common result, that is creating a carbon-rich surface layer that hardens after quenching. As the hardness alone cannot be an indicator of satisfactory quality, of cement layer, it is necessary to pay attention to the microstructural properties which significantly affects on the overall properties of the work piece and thus to the lifetime of the parts.

The theoretical part of this paper gives a brief introduction into steels and cementing steels (types, properties and behaviours depending on temperature) are explained in more detail. Thermal diffusion methods for material treatment are described where the focus is on the process of thermal treatment by cementation. The stages of cementing are also explained which include carbonation, tempering and low temperature yielding with test methods.

The experimental part of this paper will focus on analysing the whole process. Starting with preparation of work pieces, heat treatment (cementation process), testing of samples and finally with analysis of obtaining results. Analysis of the results will conclude that the starting chemical composition of the material C-15E, 16MnCr5, 15CrNi13 effects on the carbon depth.

Keywords: carbonite, chemical composition, C-15E, 16MnCr5, 15CrNi13.

SADRŽAJ

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA I
IZJAVA II
SAŽETAK III
SUMMARY IV
SADRŽAJ V

1. UVOD 1
1. ČELICI ZA CEMENTACIJU 3
2. TERMODIFUZIJSKI POSTUPCI 8
2.1. TERMODIFUZIJSKE (TERMOKEMIJSKE) OBRADE 8
3. CEMENTACIJA 9
3.1. POUGLJIČAVANJE 10
4.1.1 POUGLJIČAVANJE U KRUTOM SREDSTVU 13
4.1.2. POUGLJIČAVANJE U PLINU 15
4.1.3. POUGLJIČAVANJE U SOLNOJ KUPKI 17
4.1.4. VAKUUMSKO POUGLJIČAVANJE 18
4.1.5. PLAZMA POUGLJIČAVANJE 19
3.2. KALJENJE 21
3.2.1. DIREKTNO KALJENJE 23
3.2.2. JEDNOSTRUKO KALJENJE 24
3.2.3. DVOSTRUKO KALJENJE 25
3.3. NISKOTEMPERATURNO POPUŠTANJE 26
4. KONTROLA KVALITETE CEMENTIRANIH ČELIKA 28
5.1. ISPITIVANJE TVRDOĆE 28
5.2. ISPITIVANJE DUBINE CEMENTACIJE 28
5. EKSPERIMENTALNI DIO 30
5.1. PLAN EKSPERIMENTALNOG DIJELA 30
5.2. EKSPERIMENTALINI MATERIJAL 31
5.3. TOPLINSKA OBRADA - CEMENTACIJA 33

5.4. ISPITIVANJE DUBINE POUGLJIČAVANJA I TVRDOĆE 38
5.4.1. REZULTATI ISPITIVANJA MIKROTVRDOĆE ZA ČELIK Č.1221 40
5.4.2. REZULTATI ISPITIVANJA MIKROTVRDOĆE ZA ČELIK Č.4320 43
5.4.3. REZLUTATI ISPITIVANJA MIKROTVRDOĆE ZA ČELIK Č.5426 46
5.4.4. DIJAGRAMI SREDNJE VRIJEDNOSTI 49
6. ANALIZA REZULTATA 51
7. ZAKLJUČAK 52

LITERATURA 53
POPIS OZNAKA 54
POPIS SLIKA 55
POPIS TABLICA 57

1. UVOD

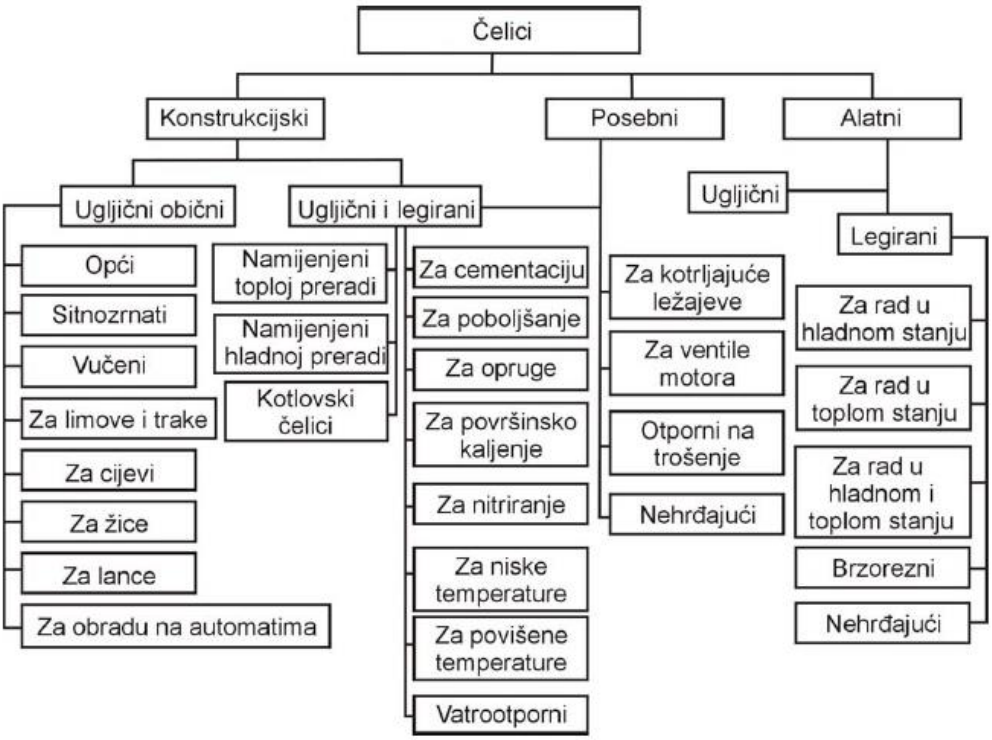
Termin „čelik“ se tijekom vremena znatno transformirao, međutim može se spomenuti neka današnja definicija utvrđena Europskom normom: „Čelikom se označavaju željezni materijali koji su općenito prikladni za toplo oblikovanje“. Može se definirati i kao slitinu (leguru) željeza i ugljika (<2%) s ili bez dodataka ostalih legirajućih elemenata. Velika važnost čelika može se zaključiti i iz toga da je on jedan od najvažnijih tehničkih materijala u primjeni pa tako i u proizvodnji. Svjetska proizvodnja čelika iznosi nešto više od 900 milijuna tona, što predstavlja gotovo polovicu ukupne proizvodnje svih tehničkih materijala. [1]

Osnova za višestruku korist čelika proizilazi iz njegovih upotrebnih svojstava a to su čvrstoća, žilavost, rastezljivost, promjena sastava legiranjem, toplinska obrada i mnoga druga. Sama osnovna svojstva čelika ovise o kemijskom sastavu, mikrostrukturi te o dimenzijama, obliku i stanju gotovog proizvoda. Tako zbog načina proizvodnje i povoljnih svojstava čelik se može koristiti u različite svrhe i u različitim granama industrija poput građevinarstva, prometa, poljoprivrede i brojnih drugih.

Čelici se mogu podijeliti na nekoliko načina:

- Prema načinu proizvodnje dijele se na Bessemerov te Thomasov čelik (napuštene metode), Siemens-Martinov čelik (postoji u industrijama manje razvijenih zemalja), Elektro čelik, čelik iz kisikovih konvertora (LD, LDAC, OBM, LWS...), čelik proizveden sekundarnom metalurškom obradom (vakuumiranje, AOD, CLU...), kontroliranom metalurgijom te prema načinu deoksidacije i lijevanja (neumireni, poluumireni i umireni čelik).
- Prema kemijskom sastavu mogu biti ugljični (nelegirani) te legirni čelici.
- Po kvaliteti ih dijelimo na osnovne, kvalitetne i plemenite.
- Prema mikrostrukturi mogu biti feritni, feritno-perlitni, martenzitni, austenitni, ledeburitni, bainitni te austenitno-feritni čelici.

- Prema posljednjoj podjeli prema namjeni mogu biti konstrukcijski, alatni i čelici s posebnim svojstvima.



Slika 1 - Podjela čelika prema namjeni [1]

U ovom radu naglasak će biti na čelicima za cementaciju, koji će detaljnije biti objašnjeni u nastavku. Posebno tri vrste čelika, različitog kemijskog sastava, koji će biti korišteni u eksperimentalnom dijelu.

1. ČELICI ZA CEMENTACIJU

Čelici za cementaciju su niskougljični (<0,25 %), nelegirani ili niskolegirani čelici čiji je sastav zajamčen, a prema masenom udjelu nečistoća spadaju u kvalitetne i plemenite čelike. Plemeniti čelici sadrže manji maseni udio sumpora i fosfora (<0,035 %) od kvalitetnih (<0,045 %), veću kvalitetu površine i manji broj nemetalnih uključaka u mikrostrukturi. [4]

Tablica 1 - Čelici za cementaciju [2]

Oznaka čelika	Sastav „ostalo“ %	Tvrdoća u isporučenom stanju, HB	Slijepo kaljeno 30mm			Kaljenje	
			Rp 0,2, N/mm2 min	Rm, N/mm2	A5, % min	Jezgra, ºC	Rub, ºC
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

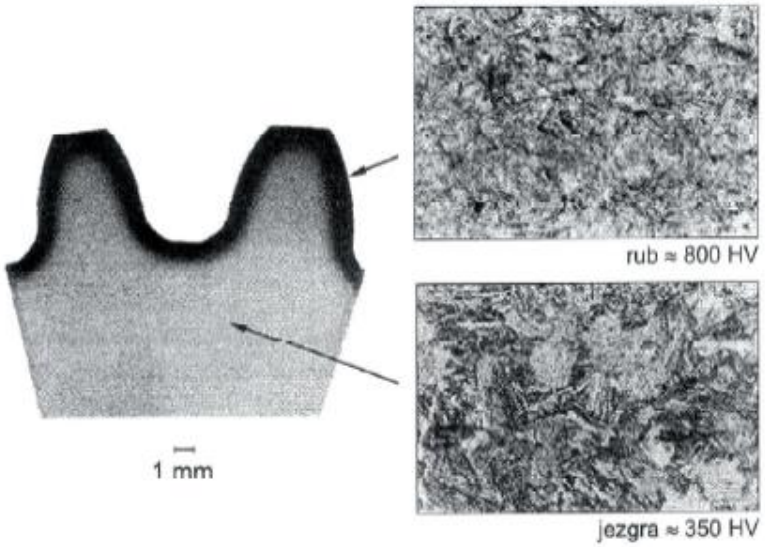
Predstavljaju konstrukcijske čelike kojima se nakon obrade odvajanjem čestica pougljičava rubni sloj. Nakon pougljičavanja rubnog sloja provodi se kaljenje kako bi se postigla visoka otpornost na trošenje rubnih slojeva, te povišena žilavost nepougljičene jezgre.

Kako niskougljični čelici s 0,1-0,2 % ugljika nisu skloni povišenju tvrdoće kaljenjem (već čelici s 0,25 % ugljika), potrebno im je radi zakaljivanja i povećanja otpornosti na abrazijsko trošenje povisiti sadržaj ugljika u rubnim slojevima na 0,8-0,9 % ugljika. Povišenje sadržaja ugljika postiže se postupkom pougljičavanja. Ugljikom obogaćen rub postaje zakaljiv tj. gašenjem s odgovarajuće temperature austenitizacije postaje sklon poprimanju

mikrostrukture visokougljičnog martenzita otpornog na trošenje, time se postiže tvrdoća od 61 do 64 HRC. Čelici iz ove skupine podvrgnuti su postupku cementacije koja se sastoji od nekoliko faza:

- Pougljičavanje površinskih slojeva
- Kaljenje
- Niskotemperaturno popuštanje

Nakon cementacije pougljičena jezgra postaje feritno-perlitna ako proizvod nije prokaljen tj. nastaje niskougljični martenzit u slučaju prokaljivanja (Slika 2.). [1]



Slika 2 - Mikrostruktura cemetiranog zupčanika izrađenog od čelika Č.4320 [2]

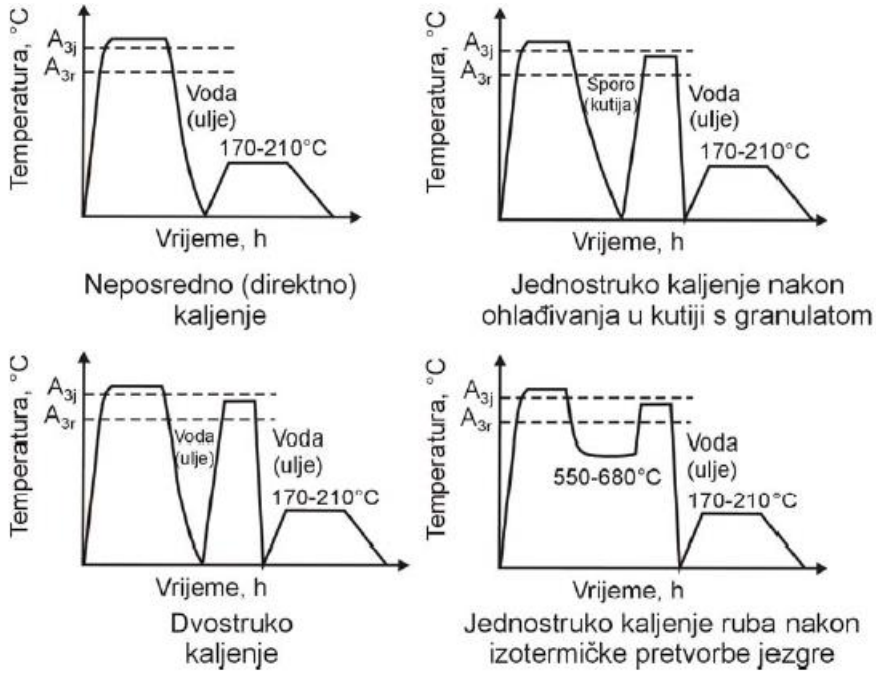
Obje navedene mikrostrukture karakterizira visoka udarna radnja loma pa je konačni proizvod otporan na trošenje sa znatnim iznosom žilavosti. Nakon cementacije površinski slojevi sadrže visokougljični martenzit.

Kod legirajućih čelika poželjna je prokaljenost jer se čelici za cementaciju nisko popuštaju ≤220 ºC pa se žilavost jezgre postiže niskougljičnim martenzitom. Čelici za cementaciju se rijetko visoko popuštaju, no ukoliko bi se to dogodilo tada se smatraju niskougljičnim čelicima za poboljšanje. Visoko popuštanje se ne kombinira s postupkom pougljičavanja jer bi pougljičeni rub pri

popuštanju na temperaturi >220 ºC toliko omekšao da ne bi bio dovoljno otporan na trošenje.

Svrha legirajućih elemenata je utjecaj na jače prokaljivanje pri gašenju nakon pougljičavanja. Legirajući elementi utječu na brzinu procesa pougljičavanja, dubinu pougljičenog 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.

Najčešće korišteni načini pougljičavanja i kaljenja (cementacije) prikazani su na sljedećoj slici.



Slika 3 - Shematski prikaz dijagrama najčešćih postupaka cementacije j-jezgra, r-rub sloja [2]

Većinom se pougljičavanje provodi u granulatu (drveni ugalj + [$BaCO_3$] barijev karbonat), u kapljevitom sredstvu (rastaljene cijanidne soli) ili u plinovitom sredstvu (ugljikovodici). Direktno kaljenje se uglavnom primjenjuje

nakon pougljičavanja u solnoj kupki, a jednostruko nakon sporog hlađenja u granulatu ili u plinu. Dvostruko kaljenje ili kaljenje nakon izotermičke pretvorbe nepougljičene jezgre provodi se većinom nakon pougljičavanja legirnih čelika u granulatu ili plinu. Nakon završenog kaljenja kod navedenih postupaka primjenjuje se nisko-popuštanje (170-220 ºC).

Jedan od važnijih problema pri propisivanju postupaka pougljičavanja i kaljenja je određivanje pravilne temperature gašenja s obzirom na to da u isto vrijeme postoje mjesta s visokim sadržajem ugljika (rub s preko 0,8 %) i niskom sadržajem ugljika (jezgra ispod 0,2 %). Temperatura gašenja treba biti niža od one idealne za jezgru i viša od idealne za visokougljični rub. U tom pogledu najmanje problema se javlja kod nelegiranih čelika, zato što se kod njih dopušta direktno kaljenje tj. gašenje s temperature pougljičavanja.

Osim čelika Č.4120 (17Cr3) i Č.7420 (20MoCr4) koji se smiju direktno kaliti, sve ostale legirane čelike treba nakon pougljičavanja sporo ohladiti i ponovo ih austenitizirati do temperature koja je nešto viša od one potrebne za rub, te konačno zakaliti. Takvo sporo hlađenje nakon pougljičavanja utječe na usitnjenje zrna koje je ogrubjelo. Nakon pougljičavanja se ne provodi sporo hlađenje zbog opasnosti od pojave kemijskih reakcija između ostatka soli i čelika.

Dubina cementiranog sloja se regulira trajanjem pougljičavanja. Legirajući elementi utječu na dubinu cementiranog sloja koncentracije ugljika u rubnom sloju. Nekarbidotvorci poput nikla i mangana omogućavaju postizanje veće dubini cementacije nego karbidotvorci krom, molibden te vanadij.

Može se približno utvrditi da će za proizvode promjera do 10 mm biti prikladni nelegirani čelici, za one do 80 mm Mn-Cr čelici te za one većih dimenzija od 80 mm Cr-Mo i Cr-Ni čelici.

Glavne karakteristike pojedinih vrsta čelika za cementaciju su sljedeće:

- Nelegirani čelici – npr. Č.1120 (C10), Č.1121 (C10E), Č.1220 (C15)
  Kaljivi su samo u vodi, slabe prokaljivosti; svojstva jezgre su loša pa služe za izradu dijelova manjih dimenzija i malih udarnih opterećenja malih osovinica i zupčanika, poluga, svornjaka, čahura.
- Cr čelici – npr. Č.4121 (15Cr2)
  Dobro su zakaljivi i prokaljivi u vodi i ulju; skloni su pogrubljenju zrna i stvaranju karbida u pougljičenim slojevima; uglavnom se primjenjuju u automobilskoj industriji za izradu poluosovine, bregaste osovine, manjih zupčanika i sličnog.
- Mn-Cr čelici – npr. Č.4320 (16MnCr15)
  Dobro su prokaljivi, pa su pogodni za izradu proizvoda srednjih dimenzija poput zupčanika, osovina i vretena alatnih strojeva, klipnjače motora i bregaste osovine.
- Cr-Mn i Mo-Cr čelici – npr. Č.4721 (20CrMo5), Č.7420 (20MoCr4)
  Zbog kroma i molibdena imaju vrlo dobru prokaljivost, dok molibden stvara karbide otporne na trošenje i nejednolik raspored po presjeku; uglavnom se koriste za izradu bregaste i koljenaste osovine, zupčanika mjenjačkih kutija i sličnog.
- Ni-Cr čelici – Č.5420 (14NiCr6), Č.5421 (18NiCr8)
  Vrlo dobro su prokaljivi, ali su skloni pojavi zaostalog austenita u rubnim slojevima, pa ih je potrebno gasiti s nižih temperatura ili duboko hladiti odmah po završenom gašenju; primjenjuju se za izradu proizvoda najvećih dimenzija poput zupčanika lokomotiva, ali se koriste i za izradu koljenastih osovina, osovina zrakoplova i sličnog.

2. TERMODIFUZIJSKI POSTUPCI

Pojam toplinske obrade može se definirati kao postupak u kojem se predmet namjerno podvrgava temperaturno – vremenskim ciklusima kako bi se promijenila postojeća i postigla željena mikrostruktura, a time i željena (mehanička, fizikalna i kemijska) svojstva. [5]

2.1. TERMODIFUZIJSKE (TERMOKEMIJSKE) OBRADE

Proces termodifuzije nastaje kao posljedica zagrijavanja i hlađenja. Dolazi do toga da lakše molekule difundiraju prema toplijem području, dok teže molekule imaju tendenciju ostati u hladnijem području.

Termodifuzijska obrada je toplinska obrada gdje se toplinskim i kemijskim djelovanjem mijenja kemijski sastav i struktura materijala, a samim time i njegova svojstva. Ovakva obrada se provodi u odgovarajućim medijima (krutim, plinovitim ili tekućim). Termokemijska obrada se uvijek izvodi na povišenoj temperaturi, jer je proces difuzije brži. Njome se teži postići:

- Povećanje tvrdoće u površinskom sloju
- Povećanje površinske otpornosti na trošenje proizvoda
- Povećanje otpornosti prema koroziji i oksidaciji na povišenoj temperaturi

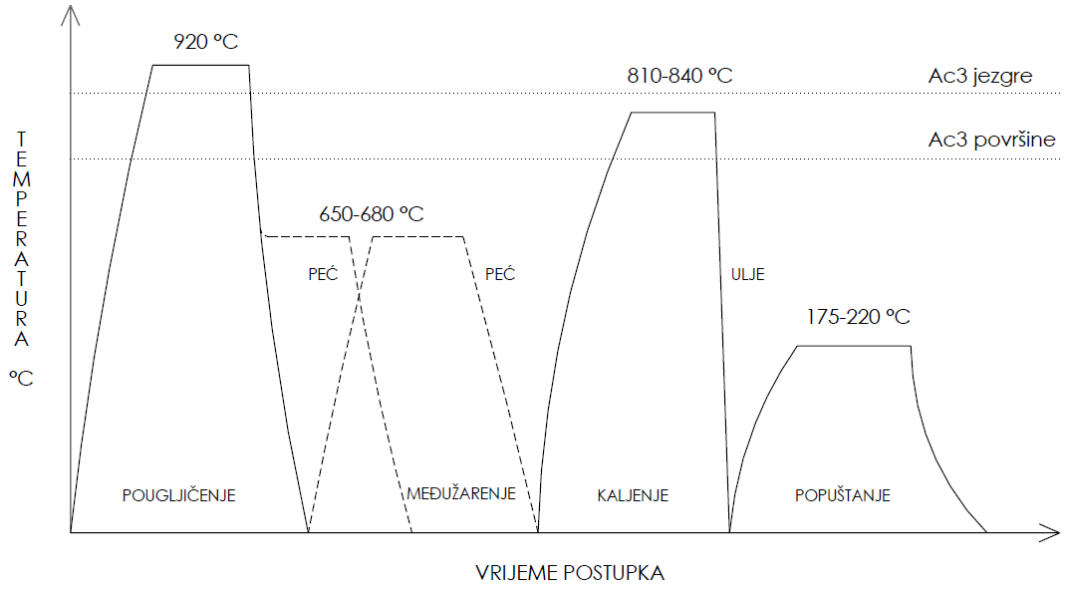
Termodifuzijske obrade možemo podijeliti na:

- Cementaciju (pougljičavanje)
- Nitriranje
- Karboniranje
- Nitrokarburiranje
- Boriranje
- Termodifuzija metala

3. CEMENTACIJA

Cementacija čelika je postupak toplinske obrade gdje se ugljikom obogaćuju rubni slojevi čelika postupkom pougljičavanja. Potom se odvija kaljenje pri čemu se pougljičeni sloj dovodi u martenzitnu strukturu te se kao završna operacija provodi niskotemperaturno popuštanje gdje se naknadno ugrijava čelik u svrhu popuštanja napetosti i postignuća duktilnosti martenzitnog sloja. [5]

Cilj cementacije je dobivanje što veće tvrdoće (do 800 HV) površinskog dijela, otpornost na trošenje, otpornost na umor površine i u konačnici zadržati početna svojstva jezgre kako bi imala što veću otpornost na udarna opterećenja (žilavost).



Slika 4 - Dijagram postupka cementacije [5]

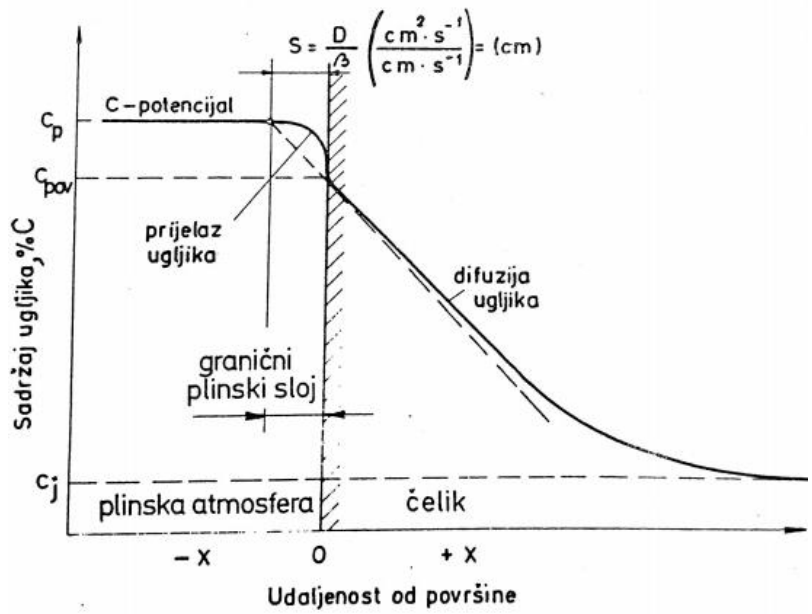
Prilikom cementacije upotrebljavaju se čelici koji sadrže najviše 0,25 % ugljika. Kada bi se takav čelik samo kalio, ne bi se mogla dobiti dovoljno visoka tvrdoća. Dubina pougljičenih slojeva obično iznosi od 0,2 do 0,3 mm, dok ugljik naraste na 0,7 – 0,9 % ovisno o uvjetima pougljičavanja. Sadržaj apsorbiranog

ugljika, tj. površinska koncentracija i efektivna dubina pougljičavanja ovise o kvaliteti čelika, potencijalu ugljika, sredstvu za pougljičavanje, temperaturi i vremenu pougljičavanja. Previše ugljika bi rezultiralo nastajanjem slobodnog cementita i krhkosti, a premalo ugljika ne bi dalo zadovoljavajuću tvrdoću.

Zbog površinske tvrdoće i žilavosti jezgre, postupak cementacije se primjenjuje za strojne dijelove koji su izloženi površinskom trošenju i visokim dinamičkim naprezanjima.

3.1. POUGLJIČAVANJE

Pougljičavanje je faza cementacije pri kojoj dolazi do obogaćivanja rubnih slojeva ugljikom. Pougljičavanje se može provoditi na temperaturama između 800 °C i 1050 °C, ali najčešće je ono između 850 °C i 950 °C. Ponekad se pougljičavanje koristi na 1010 °C kada je potrebno smanjiti vrijeme procesa, dobiti veću dubinu površinskog sloja od 1,5 mm i povećati proizvodnost. Proces pougljičavanja se sastoji od nekoliko fizikalno – kemijskih etapa.



Slika 5 - Prikaz procesa pougljičavanja čelika [3]

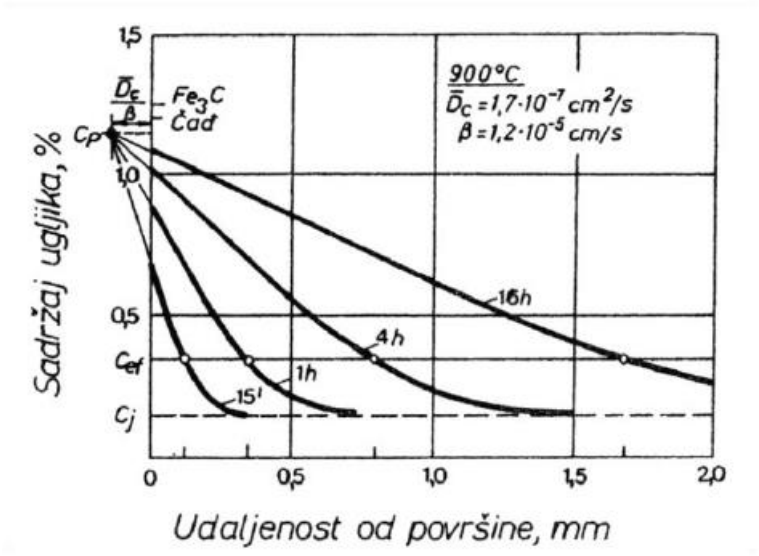
Sredstva za pougljičavanje kod temperature pougljičavanja daju odgovarajući „potencijal ugljika“ (C – potencijal). Sadržaj ugljika sredstava je viši od sadržaja ugljika u čeliku. Potencijal ugljika je maksimalni sadržaj ugljika što se tijekom pougljičavanja može postići na površini obrađivanog čelika i koji se na datoj temperaturi pougljičavanja nalazi u ravnoteži s plinskim okolišem.

Promjena koncentracije ugljika u pougljičenom površinskom sloju ovisi o:

- Sredstvu za pougljičavanje
- Temperaturi i trajanju pougljičavanja
- Vrsti čelika koja se pougljičava

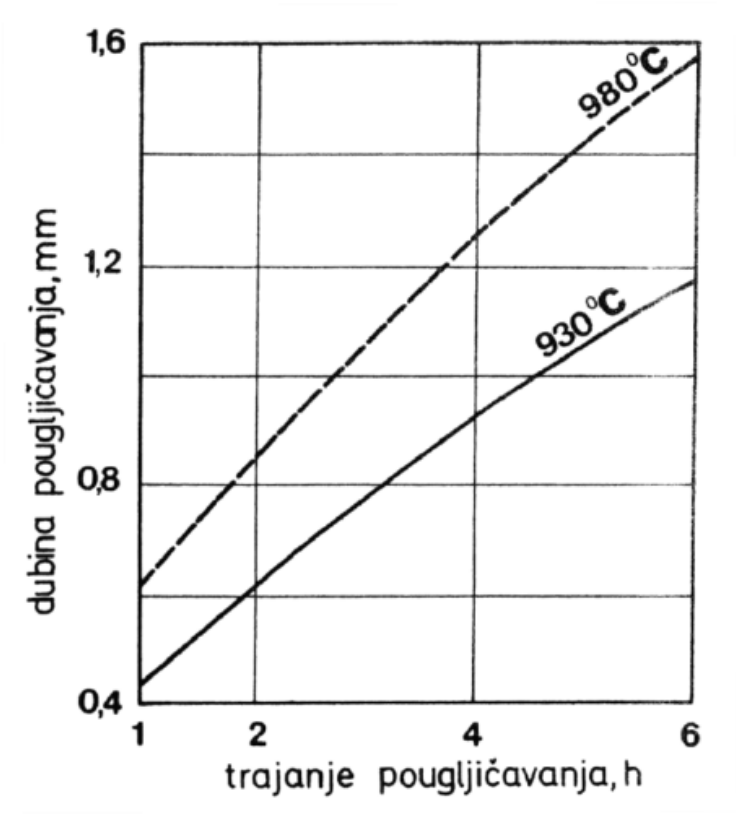
Vrijeme pougljičavanja se u plinskim atmosferama za nelegirane čelike može odrediti izvlačenjem odnosa efektivne dubine i vremena pougljičavanja iz dijagrama. Za legirane čelike se vrijeme pougljičavanja u odnosu na zahtijevanu dubinu cementacije provodi eksperimentalno jer legirni elementi utječu na tijek difundiranja ugljika u materijalu.

Kod dužeg pougljičavanja je i dubina pougljičavanja veća, ali porast dubine nije linearno proporcionalan vremenu pougljičavanja. Dakle brzina pougljičavanja u početku procesa je veća i ravnomjerno opada trajanjem procesa pougljičavanja.



Slika 6 - Utjecaj trajanja pougljičavanja na dubinu pougljičavanja [3]

Na brzinu pougljičavanja također ima veliki utjecaj i temperatura. Povišenjem temperature pougljičavanja od 930 ºC na 980 ºC ima za posljedicu osjetno povećanje dubine pougljičavanja. [3]



Slika 7 - Utjecaj temperature na dubinu pougljičavanja za čelik Č.1220 [3]

Faza pougljičavanja se može provoditi u različitim sredstvima:

1. Pougljičavanje u krutom sredstvu – kao sredstvo za cementaciju koristi se granulat (drveni ugljen, koštani ugljen ili ugljen na bazi životinjske kože) s dodatkom barijevog karbonata [$BaCO_3$] u funkciji aktivatora i veziva
2. Pougljičavanje u plinu – značajniji postupak pougljičavanja koji se provodi u pećima (jamaste, prolazne ili specijalne komore) u smjesi pročišćenih plinova (ugljični monoksid [CO], vodik [H_2], vodena para te manje količine metana [CH_4])

3. Pougljičavanje u solnoj kupki – provodi se u rastaljenim solim za pougljičavanje, u aktivnim i neaktivnim kupkama
    a. Aktivna kupka se sastoji od natrijevih cijanida s manjim udjelom kalijevih cijanida i nešto alkalnih metala, a kao aktivator se koristi stroncijev ili barijev klor
    b. Neaktivna kupka se sastoji od alkalnih cijanidnih soli, a aktivira se tek u kontaktu s kisikom iz zraka
4. Vakuumsko pougljičavanje – proces se sastoji od obrađivanja čelika u vakuumu u plinovitoj atmosferi koja može biti sastavljena od vodika, ugljikovodika, smjese ugljikovodika te smjese ugljikovodika i dušika. Nakon obrade čelik se zakali u ulju ili plinu
5. Plazma pougljičavanje – postupak kod kojeg se konstantan C–potencijal ne održava pomoću kisikove sonde, već se regulira putem gustoće struje; dolazi do bombardiranja površine čelika koncentracijom ugljikovih iona

4.1.1 POUGLJIČAVANJE U KRUTOM SREDSTVU

Ovakav način pougljičavanja spada među jedne on najstarijih postupaka koji se uspio održati do danas. Najčešće se primjenjuje u slučaju malog broja proizvoda koje treba pougljičiti. Primarno su to predmeti koje nakon pougljičavanja neće biti potrebno kaliti s temperature pougljičavanja. [5]

Smjesa koja se upotrebljava za pougljičavanje je mješavina drvenog ugljena, aktivatora i vezivnog sredstva u obliku zrnatog granulata veličine 3-5 mm.

Slika 8 - Sredstvo za cementaciju (granulat) [5]

Kao aktivator može se koristiti natrijev karbonat [Na_2CO_3], ali najčešće se koristi barijev karbonat [$BaCO_3$] koji se pri povišenim temperaturama raspada na barijev oksid i ugljični dioksid. [3]

$$BaCO_3 \rightarrow BaO + CO_2 \qquad (1)$$

Ugljični dioksid reagira s ugljikom iz granulata stvarajući ugljikov monoksid

$$CO2 + C \leftrightarrow 2\ CO \qquad (2)$$

Pri tome se stvara ravnoteža plinskih atmosfera što u kontaktu s površinom čelika uzrokuje pougljičavanje

$$2\ CO \leftrightarrow (C) + CO_2 \qquad (3)$$

Dolazi do ugradnje ugljika u austenitno zrno koje difuzijom prodire u unutrašnjost jezgre. Prisutnost drvenog ugljena izaziva reakciju ugljičnog dioksida i obnavljanje ugljičnog monoksida. Ovim postupkom se omogućava obnova cijelog procesa i kontinuirana regeneracija plinske atmosfere.

$$CO_2 + C \leftrightarrow 2\ CO \qquad (4)$$

Proces pougljičavanja izgleda tako da se kutije izrađene od niskougljičnog čelika pune granulatnom smjesom visine 13-50 mm. Potom se na taj sloj slažu predmeti, vodeći računa o razmaku i o njihovom položaju. Nakon toga se predmeti pokrivaju s ostatkom smjese. Kutije se zatvaraju poklopcem premazanim glinom ili šamotom radi sprječavanja ulaska zraka. Stavlja se u zagrijanu peć na 600-700 ºC, postupno se povećava temperatura na razinu pougljičavanja 850-950 ºC (ovisno o materijalu i o potrebama). Po završetku procesa kutija se vadi iz peći, a predmeti se odvajaju od granulata.

Prednosti pougljičavanja u krutom sredstvu:

- Nije potrebna sofisticirana oprema
- Pogodan za velike i složene predmete i dobivanje dubokih slojeva
- Sporo hlađenje osigurava da predmeti budu mekani

Nedostaci pougljičavanja u krutom sredstvu:

- Radno intenzivan proces
- Nije pogodan za veliku proizvodnju
- Neprilagodljiv u radu i slaba kontrola procesa

4.1.2. POUGLJIČAVANJE U PLINU

Pougljičavanje u plinu je jedan od najznačajnijih komercijalnih postupaka. Provodi se u pećima, u smjesi pročišćenih plinova (ugljičnog monoksida [CO], vodika [H_2], vodene pare i manjeg udjela metana [CH_4]). Odabir peći ovisi o veličini, obliku, količini proizvoda, dubini željenog sloja i drugom. Prolazne peći se najčešće koriste pri masovnoj proizvodnji (za pougljičavanje dijelova automobilske industrije). Jamaste se peći pak preferiraju za manje predmete koji se smještaju u držače. [5]

Pri pougljičavanju u plinu sadržaj slobodnog ugljika se regulira prema apsorpcijskoj mogućnosti površine čelika. Ukoliko površina ne bi apsorbirala svu količinu nastalih ugljikovih atoma, dolazi do stvaranja čađe.

Proces se odvija u dvije etape. Prva etapa, poznata kao „pougljičavajući korak“, gdje je sadržaj ugljičnog monoksida [CO] u atmosferi veći od parcijalnog tlaka potrebnog za održavanje željenog sadržaja ugljika. Pougljičavanje će se odvijati sve dok se ne postigne nova ravnoteža ili veoma visoki sadržaj ugljika. Pri drugoj etapi površina čelika će gubiti ugljik, dolazi do razugljičenja tako da će se sadržaj ugljika na površini smanjiti na nižu razinu.

Dobivanje visoke kvalitete atmosfere pougljičavanja koju je moguće kontrolirati, odvija se upotrebom atmosfere koje sadrže ugljični monoksid i dušik. Vrste atmosfera poulјičavanja su:

1. Atmosfere na osnovi dušika i metanola
2. Atmosfere na osnovi plina nosača – endoplina
3. Plinske atmosfere proizvedene direktno u peći

Ključni faktori procesa plinskog pougljičavanja su temperatura, vrijeme te sastav atmosfere. Mora postojati odgovarajući odnos temperature i vremena pougljičavanja jer difuzija ugljika u austenitu ovisi o temperaturi. Ako je potrebno dobiti manju dubinu sloja, potrebno je koristiti niže temperature pougljičavanja, suprotno vrijedi za dobivanje debljih slojeva uz povećan oprez od deformacije predmeta. Uobičajene temperature plinskog pougljičavanja su 870-925 ºC.

Neophodno je postići potpunu kontrolu C-potencijala zbog opasnosti od negativnog utjecaja na dubinu sloja. Za provođenje te kontrole potrebno je ugljikovodicima odrediti koncentraciju nekih od sastojaka kao što su ugljikov dioksid [CO_2], kisik [O_2] i vodena para. To se radi pomoću metoda:

- Određivanje točke rosišta
- Infracrvenim plinskim analizatorom
- Metodom sa žicom
- S kisikovom sondom

Kako je osnovni cilj ovog postupka dobivanje određenog profila ugljika koji će osigurati željeni profil tvrdoće nakon kaljenja, potrebno je dobro voditi proces. Kontrolirane metode su razvijene računalom koje koriste mikroprocesore i specijalne programe kako bi održavale kontinuirano praćenje željenog profila ugljika, kod nekog vremena pougljičavanja, pri različitim fazama te uz stalno mjerenje C-potencijala atmosfere i temperature.

Prednosti pougljičavanja u plinu:

- Optimiranje procesa pougljičavanja
- Bolja kvaliteta i jednolikost pougljičavanja
- Fleksibilnost kod izbora različitih programa rada

Nedostaci pougljičavanja u plinu:

- Velika investicija u opremu – preporučljiv za visokoserijsku proizvodnju

Postoji par inačica ovog modela. Jedna od njih je plinsko pougljičavanje čvrstim sredstvima kod kojeg se u pretkomori peći proizvodi plin za pougljičavanje od drvenog ugljena i aktivatora. Druga inačica je plinsko pougljičavanje uz isparavanje u peći za pougljičavanje, gdje smjese (terpentin, aceton, etilni alkohol) isparavaju uz Ni-katalizator.

4.1.3. POUGLJIČAVANJE U SOLNOJ KUPKI

Pougljičavanje u solnoj kupki se provodi u rastaljenim solima za pougljičavanje koje ujedno služe i za karboniranje. To se događa na način da se soli iz kupke raspadaju i oslobađaju ugljik koji difundira u obrađeni čelik. Čelik nakon toga brzo otvrdnjava brzim kaljenjem s odgovarajuće temperature. [5]

Solne kupke mogu biti aktivne ili neaktivne.

- Aktivne kupke se pretežno sastoje od natrijevih cijanida i dijela alkalnih metala, a aktiviraju se stroncijevim ili barijevim klorom. Temperature pougljičenja kreću se između 900 ºC i 1000 ºC, te se ovim kupkama postiže C-potencijal od 0,5 % do 1,2 % ugljika.
- Neaktivne kupke se sastoji od smjese alkalnih cijanidnih soli, ali ne sadrži cijanidni aktivator iz razloga što se aktiviraju kontaktom s kisikom iz zraka. Ove kupke se najčešće koriste za pougljičavanje pri temperaturama od 850 ºC i dubine od 0,5 mm gdje se na površini postiže udio ugljika od 0,4 % do 0,6 %.

Pougljičavanje se obično provodi pri temperaturama od 930 ºC do 980 ºC. Tijekom pougljičavanje nužno je održavati solne kupke i pratiti udio cijanida i aktivatora te vremenom ih dodavati kako bi se održavala vrijednost C-potencijala i ujednačena sposobnost pougljičavanja. Temperatura solne kupke ne bi smjela prijeći 950 ºC jer bi došlo do preintenzivne reakcije, a i potrošnja soli je povećana.

Dubina pougljičavanja ovisi o C-potencijalu, vremenu pougljičavanja i temperaturi pri kojoj se odvija proces. Međutim te vrijednosti ovise i o vrsti čelika koji se pougljičava.

Prednost pougljičavanja u solima su:

- Jednostavan rad
- Jeftinije investicije
- Brzo ugrijavanje čelika na temperaturu kupke
- Manje deformacije proizvoda

Nedostaci pougljičavanja u solima:

- Postupak je radno intenzivan
- Pravilno zbrinjavanje cijanidnog otpada
- Otežano čišćenje složenih predmeta u aktivnim kupkama
- Otežan transport, čuvanje i upravljanje s otrovnim kupkama

4.1.4. VAKUUMSKO POUGLJIČAVANJE

Proces vakuumskog pougljičavanje se odvija na temperaturama od 900 ºC do 1040 ºC. Pougljičava se u plinskoj atmosferi koja može biti sastavljena od vodika, ugljikovodika, smjese ugljikovodika i smjese ugljikovodika i dušika. Nakon obrade čelik se kali u ulju ili u plinu. [5]

Kod ovakvog pougljičavanje, za razliku od plinskog pougljičavanja gdje je C-potencijal funkcija plinske atmosfere, C-potencijal je određen zasićenjem ugljika na površini čelika te vremenom pougljičavanja pri određenim temperaturama. C-potencijal atmosfere s propanom je veći od onog s atmosferom metana jer se dobiva više ugljika tijekom procesa kreiranja propana.

Vakuumska peć je najčešće izrađena od grafita ili keramike, kako bi izdržala visoke tlakove koji ne smiju prijeći 0,4 bara. Razloga toga je sprječavanje prevelikog taloženja ugljika u peći.

Prednosti vakuumskog pougljičavanja:

- Predgrijavanje i naknadna obrada mogu se odvijati pod vakuumom
- Smanjeno vrijeme i veće debljine sloja zbog difuzijskog ciklusa, većeg C-potencijala i rada kod viših temperatura pougljičavanja
- Niža potrošnja plina za pougljičavanje
- Bolja mehanička svojstva (prokaljivost, veća zamorna čvrstoća)

Nedostaci vakuumskog pougljičavanja:

- Oprema je skupa
- Prisutnost osjetljivog balansa, gdje se procesni uvjeti moraju uskladiti radi postizanja najboljeg kompromisa između potrebne dubine, brzine pougljičavanja i rizika od čađe

4.1.5. PLAZMA POUGLJIČAVANJE

Plazma pougljičavanje je postupak pougljičavanja kod kojeg se konstantan C-potencijal ne održava pomoću kisikove sonde, kao kod plinskog pougljičavanja, nego se efektivni C-potencijal regulira putem gustoće struje. Čelik se ovim postupkom zagrije do zasićenja ugljikom pri temperaturama 850-1040 ºC. Kod plazma pougljičavanja, efektivni C-potencijal je ustvari koncentracija ugljikovih iona koji bombardiraju površinu čelika. [5]

Postupak se provodi tako da se čelični predmeti uvedu i postave na određeni razmak (6 mm) u visokotemperaturnu zonu peći. Predmeti obavljaju

funkciju katode, dok unutrašnja konstrukcija peći služi kao anoda. Između njih dolazi do stvaranja plazme.

Plin koji se koristi predstavlja smjesu ugljikovodika (metan ili propan), vodika, argona (ili dušika). Pri ionizaciji plina koristi se istosmjerni napon od 350V do 1kV, bez kisika, kod niskog tlaka od 0,013 do 0,33 bara. Kod malih brzina struje plina i tlaka, postiže se tinjajuće pražnjenje između anoda i katoda. Posljedično dolazi do razdvajanja metana na vodik i ugljik i ionizacije plina za pougljičavanje (atoma koji reagira s površinom obrađenog materijala).

Ciklus plazma pougljičavanja, nakon zagrijavanja na temperaturu pougljičavanja, se sastoji od dvije faze:

1. Vrijeme pougljičavanja tijekom kojeg je prisutno jako strujno tinjajuće pražnjenje plazme
2. Difuzijska faza – faza bez plazme; faza tijekom koje se visoki površinski sadržaj ugljika snizi na željenu razinu te se postiže tražena dubina pougljičavanja

Prednosti plazma pougljičavanja:

- Kraće vrijeme postupka kod sličnih temperatura i istih debljina slojeva
- Veća jednoličnost u debljini pougljičenog sloja na nepravilnim površinama
- Niža potrošnja plina i energije
- Nema onečišćenja okoliša

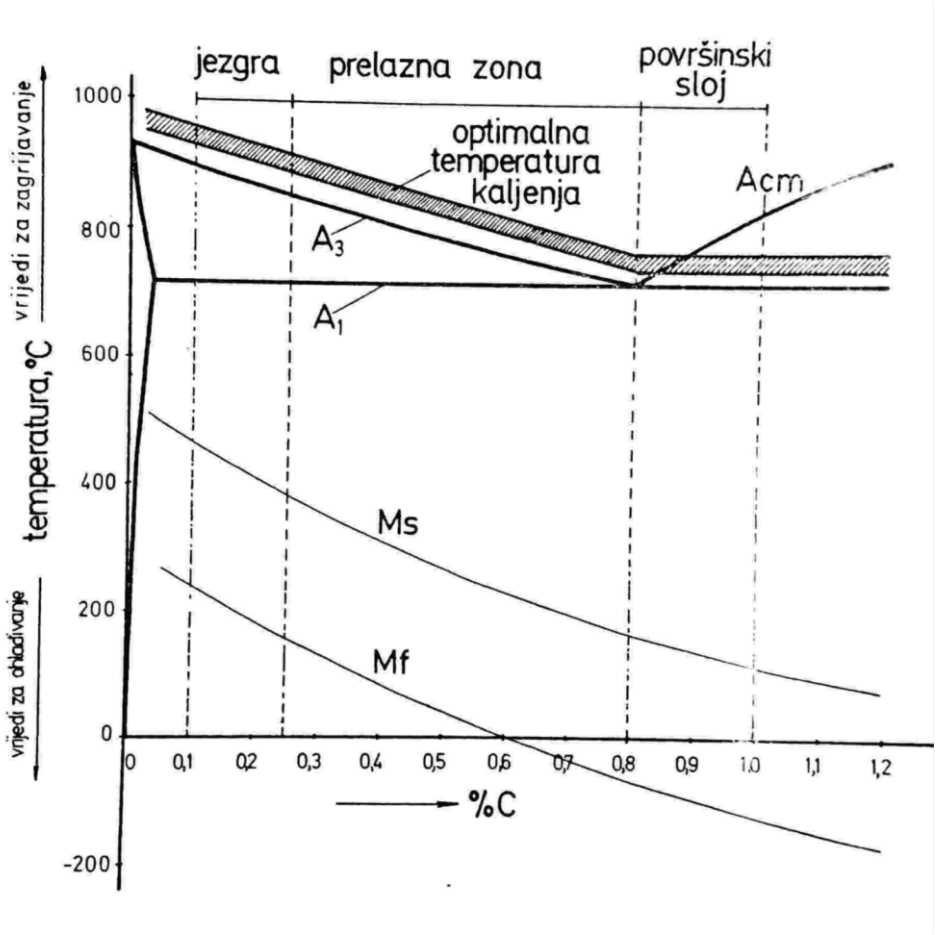
Nedostaci plazma pougljičavanja:

- Nije pogodan za velike predmete zbog potrebnog katodnog kontakta
- Visoka cijena opreme

3.2. KALJENJE

Po završetku faze pougljičavanja slijedi kaljenje. Njome se želi postići visoka tvrdoća površinskog sloja te martenzitna struktura.

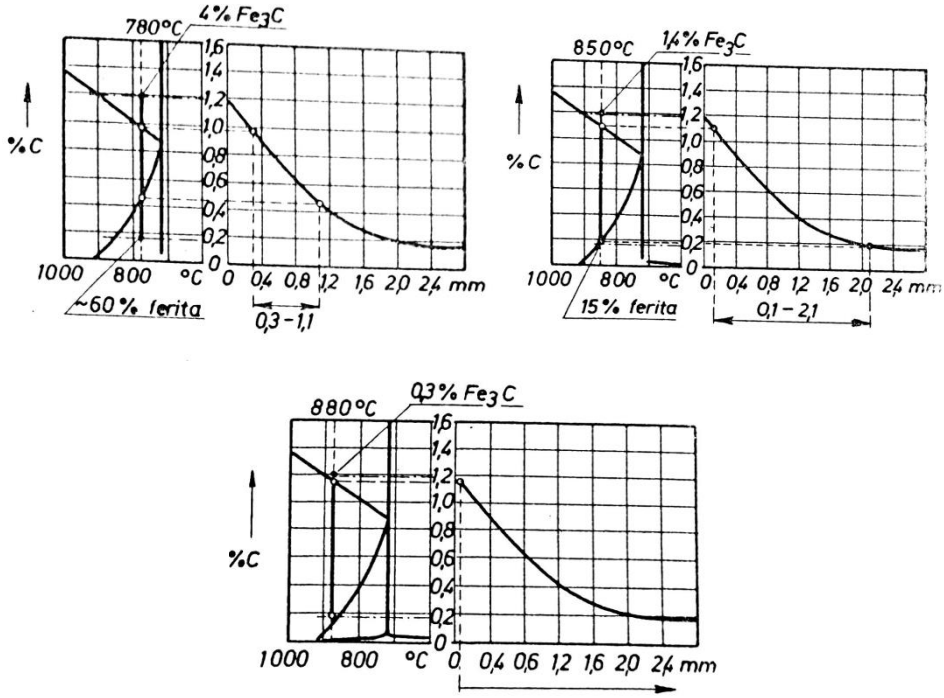
Toplinska obrada nakon pougljičavanja nije jednostavna zbog toga što se u pougljičenom sloju mijenja sadržaj ugljika od površine ka jezgri. Kao poslijedica toga dolazi do pojave različitog toka strukturnih promjena u pojedinim dijelovima pougljičenog sloja. Ove promjene su vidljive u dijelu Fe – C dijagramu za martenzitnu kristalizaciju.



Slika 9 - Prikaz stanja u Fe - C dijagramu nakon pougljičavanja [7]

Gledajući dijagram stanja vidi se da je jezgra u području podeutektoidnih čelika, dok površinski sloj pripada nadeutektoidnom dijelu. Prijelazna zona

prikazuje ravnomjerno opadanje ugljika prema vrijednosti sadržaja jezgre ili polaznom sadržaju ugljika u čeliku. Sadržaj ugljika u čeliku uvjetuje optimalnu temperaturu kaljenja koja iznosi 30-70 ºC iznad A3 te za nadeutektoidne čelike 50-70 ºC iznad A1. Zbog toga nije moguće odabrati jednu temperaturu koja bi bila optimalna i za jezgru i za površinski sloj. Ukoliko bi se pougljičeni čelik kalio temperaturom optimalnom za kaljenje jezgre, površinski sloj bi bio „pregrijan“. Dok bi kaljenje s temperaturom optimalnom za površinski sloj dovelo do nepotpune austenitizacije čelika. Izborom temperature kaljenja mora se ocijeniti jesu li prioriteti svojstva jezgre ili površinskog sloja.



Slika 10 - Kaljenje za tri različite temperature [7]

Početak i kraj transformacije martenzita, Ms i Mf, ovise o sadržaju ugljika. Prvo će se kod kaljenja (gašenja) dogoditi pretvorba strukture u području jezgre (kod viših temperatura), a kod nižih temperatura dolazi do pretvorbe austenita u martenzit u površinskom sloju. Transformacije se neće izvršiti do kraja ako dođe do ohlađenja površinskog sloja u potpunosti pa će u strukturi biti prisutan zaostali austenit. Potpuna transformacija austenita može se postići „dubokim“

ohlađenjem na temperature ispod Mf. Za legirane čelike su temperature i položaji linija Ms i Mf još niže pozicionirane.

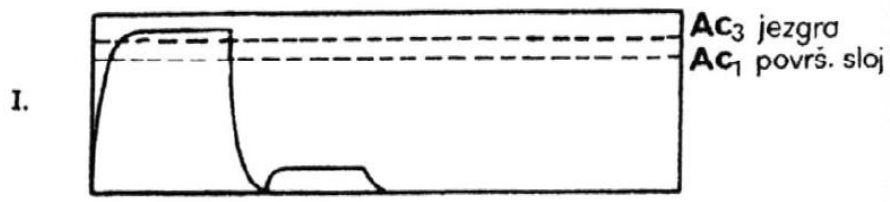
Nakon pougljičavanja mogu se provoditi različiti postupci toplinske obrade, ali u praksi se najčešće koriste:

- Direktno kaljenje
- Jednostruko kaljenje
- Dvostruko kaljenje

3.2.1. DIREKTNO KALJENJE

Direktno kaljenje čelika se odvija na temperaturi pougljičavanja. Iako ovaj postupak spada u najjeftinije, postoje određeni nedostaci. Ukoliko bi došlo do dugog držanja na temperaturi pougljičavanja dolazi do pogrubljenja austenitnog zrna, što štetno djeluje na žilavost kaljenog čelika. Zbog toga se ovaj postupak koristi kod standardnih kvaliteta čelika, kada se ne postavljaju visoki zahtjevi glede strukturnih i mehaničkih svojstava. No ukoliko bi se tražili visoki zahtjevi, koriste se „sitnozrnati čelici“ kod kojih ne dolazi do bitnog pogrubljenja zrna, a i sklonost austenita je manja.

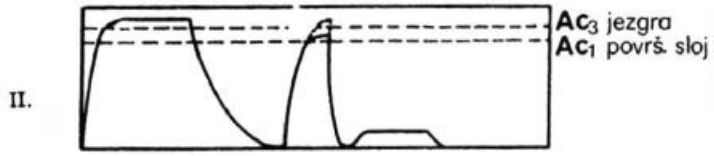
U praktičnom radu se često primjenjuje direktno kaljenje „snižene temperature“. Tu se nakon pougljičavanja čelik hladi na nižu temperaturu, obično je to temperatura kaljenja jezgre s koje se provodi kaljenje. Ovakav način je povoljniji zato što je temperatura pougljičavanja previsoka za kaljenje.



Slika 11 - Prikaz direktnog kaljenja [3]

3.2.2. JEDNOSTRUKO KALJENJE

Ova vrsta kaljenja se provodi s temperaturama koje odgovaraju temperaturama kaljenja za površinski sloj ili za kaljenje jezgre. Pri sporom hlađenju nakon pougljičavanja, postoji opasnost od stvaranja karbidne mreže po granicama zrna onda kada je sadržaj ugljika u površinskom sloju iznad eutektoidne koncentracije. Iz tog razloga je preporučljivo brzo ohlađenje.



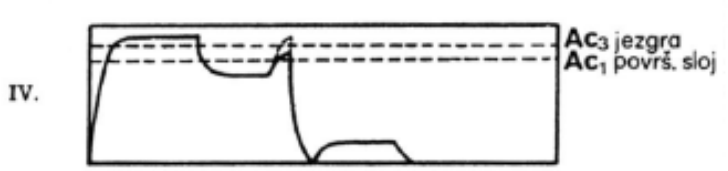
Slika 12 - Jednostruko kaljenje [3]

Postoji nekoliko načina ovog postupka kaljenja, ali svima je zajedničko da se između pougljičavanja i kaljenja provodi postupak pretvorbe austenita i naknadnom austenitizacijom iznad A1 postiže djelomična prekristalizacija. Posljedica toga je usitnjavanje zrna gdje treba voditi računa da se rastvore karbidi na granicama zrna.

Jednostruko kaljenje nakon međužarenja provodi se na temperaturi od 650 ºC. Jedan je od starijih postupaka, predlagan s ciljem smanjenja deformacija i naprezanja, ali je odbačen jer se ti efekti međužarenjem ne postižu. To se događalo jer naknadno kaljenje ima odlučujući utjecaj na deformacije strojnih dijelova.

Slika 13 - Jednostruko kaljenje nakon međužarenja [3]

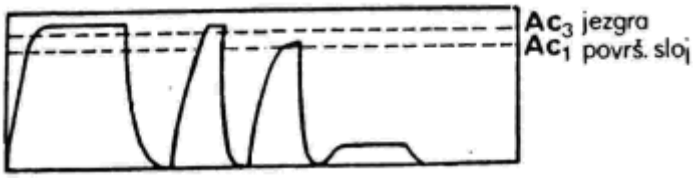
Jednostruko kaljenje nakon izotermičke pretvorbe najčešće se primjenjuje nakon pougljičavanja u solnim kupkama, ali i plinskim atmosferama. Izvodi se tako da temperaturu pougljičavanja čelika brzo ohladimo na 600 ºC, a potom držimo odgovarajuće vrijeme pri čemu se odvija pretvorba austenita u perlitnom stupnju. Zatim slijedi ugrijavanje na temperaturu kaljenja površinskog sloja ili temperaturu kaljenja jezgre. Prednost ovog postupka je manji utrošak energije i skraćenje ukupnog ciklusa toplinske obrade.



Slika 14 - Jednostruko kaljenje nakon izotermičke pretvorbe [3]

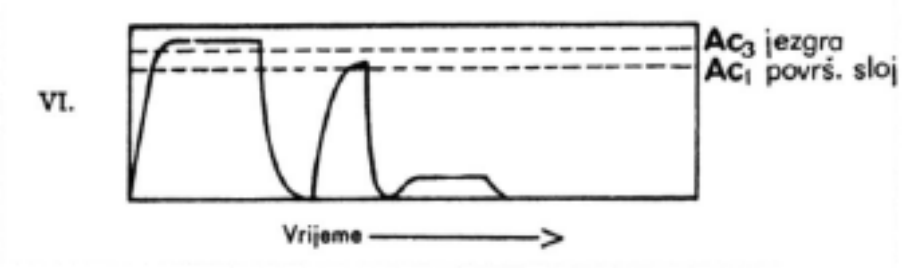
3.2.3. DVOSTRUKO KALJENJE

Dvostruko kaljenje se ranije upotrebljavalo onda kada je trebalo postići najvišu površinsku tvrdoću i najbolju žilavost jezgre, ali praksom se uvidjelo da je to nemoguće ostvariti. Razlog toga je što visoka žilavost koja se postiže prvim kaljenjem, temperaturom koja odgovara optimalnoj temperaturi kaljenja jezgre, uvelike se smanji drugim kaljenjem s niže temperature. Drugo kaljenje se provodi s temperature koja je preniska za kaljenje jezgre. To rezultira prisutnošću austenita i ferita u jezgri, pa je iz tog razloga žilavost umanjena jer postoji heterogena struktura.



Slika 15 - Dvostruko kaljenje [3]

Zaseban slučaj dvostrukog kaljenja je slučaj kad se prvo kaljenje izvodi direktno na temperaturi pougljičavanja, a drugo kaljenje na temperaturi koja odgovara temperaturi površini jezgre.



Slika 16 - Dvostruko kaljenje [3]

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

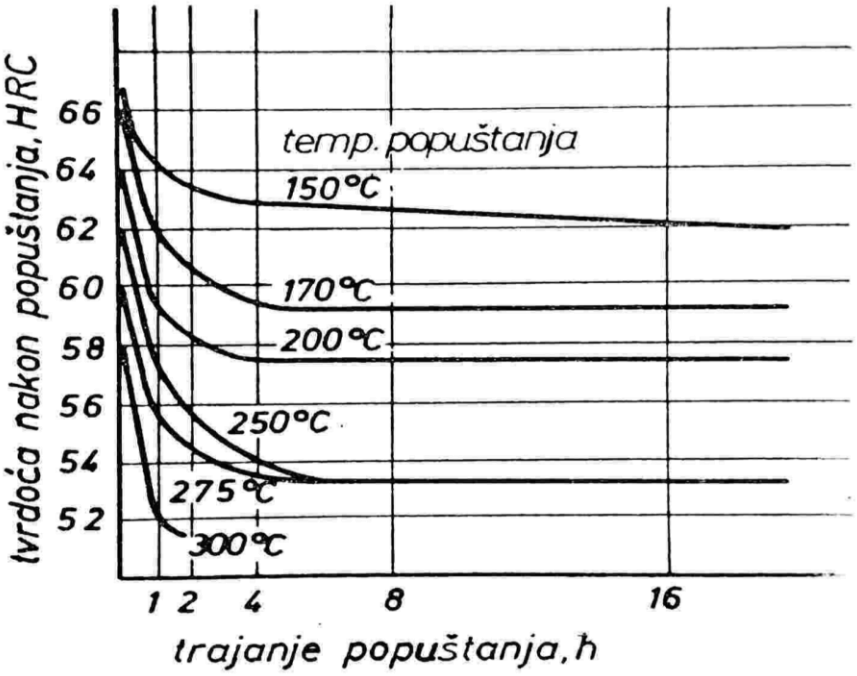
3.3. NISKOTEMPERATURNO POPUŠTANJE

Pri postupku kaljenja došlo je do stvaranja tetragonalnog martenzita u pougljičenom dijelu, a umjesto toga teži se postizanju kubičnog martenzita. Postupak niskotemperaturnog popuštanja provodi se zbog opasnosti od nastajanja defekta, uslijed visokih napetosti u cementiranom čeliku. Posljedica ovog postupka je ujedno i pad tvrdoće. Obično se ovaj postupak provodi u kupkama ili komornim pećima s cirkulacijom zraka.

Mogu su navesti neke od posljedica procesa popuštanja:

- Smanjenje tvrdoće i krhkosti
- Promjena mikrostrukture
- Otpuštanje zaostalih naprezanja
- Omekšavanje metala radi lakše deformacije i obrade odvajanjem čestica

Popuštanje uveliko ovisi o temperaturi i trajanju popuštanja što je vidljivo na sljedećoj slici.



Slika 17 - Pad tvrdoće u ovisnosti o temperaturi i trajanju popuštanja [5]

Postupak popuštanja se odvija na temperaturama od 150 do 200 ºC, pri čemu površinska tvrdoća iznosi 58 do 62 HRC. Temperature iznad 200 ºC obično se ne primjenjuju jer mogu dovesti do smanjenja tvrdoće i dinamičke izdržljivosti uslijed pojave krtosti kod nekih vrsta čelika.

4. KONTROLA KVALITETE CEMENTIRANIH ČELIKA

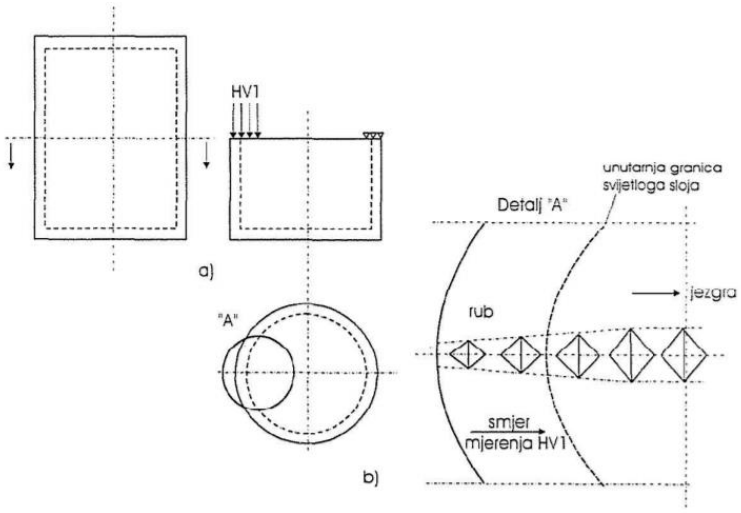
Provođenje ispitivanja kvalitete cementiranih uzoraka uglavnom se izvodi ispitivanjem dubine cementacije i površinske tvrdoće, ali i provjerom strukture.

5.1. ISPITIVANJE TVRDOĆE

Mjerenje tvrdoće može se odrediti Brinellovom, Vickersovom ili Rockwellovom metodom, gdje je zadnja metoda češće korištena. Prije početka ispitivanja, za točno određivanje tvrdoće, potrebno je pripremiti površinu ispitanog uzorka. Neophodno je ukloniti nečistoće s površinskog sloja materijala uporabom brusnog papira, a tek nakon toga se vrši mjerenje tvrdoće prodiranjem penetratora. Time dobivamo rezultate površinske tvrdoće. [7]

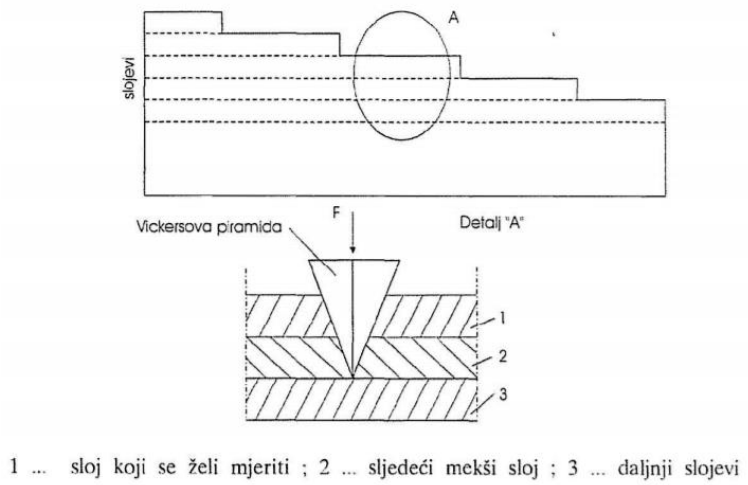
5.2. ISPITIVANJE DUBINE CEMENTACIJE

Određivanje dubine cementiranog sloja vrši se uporabom utega težine 1000 pounda (HV1). Ispitivanje tvrdoće mora se provoditi na poprečno presječenom, pougljičenom i kaljenom uzorku.



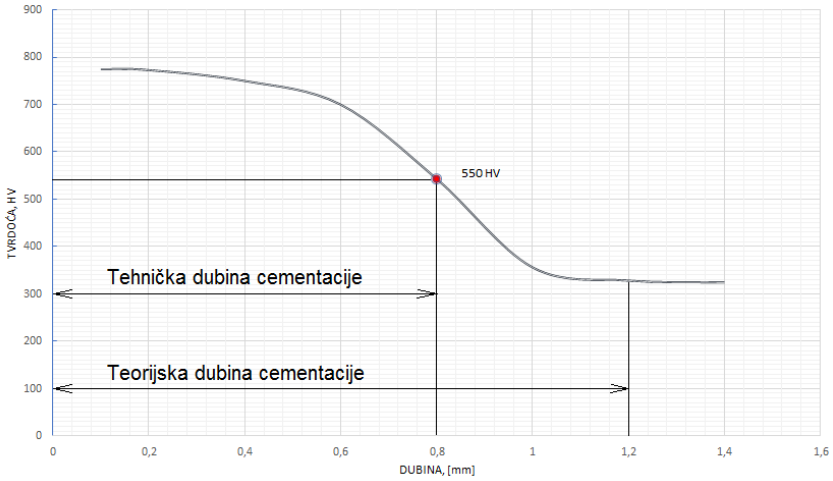
Slika 18 - Shematski prikaz postupka pri utvrđivanju tehničke dubine cementacije: a)razrezivanje uzorka ; b)shema Vickersovih utisnuća [5]

Ispitivanje tvrdoće na stupnjevito brušenim uzorcima ne bi dalo mjerodavne rezultate, zato što penetrator prodire u sloj ispod onog koji želimo mjeriti (probija ga), pa se u većoj mjeri osjeti utjecaj sljedećeg, mekšeg sloja.



Slika 19 - Shematski prikaz mjerenja tvrdoća slojeva nakon stupnjevitog brušenja sloja [5]

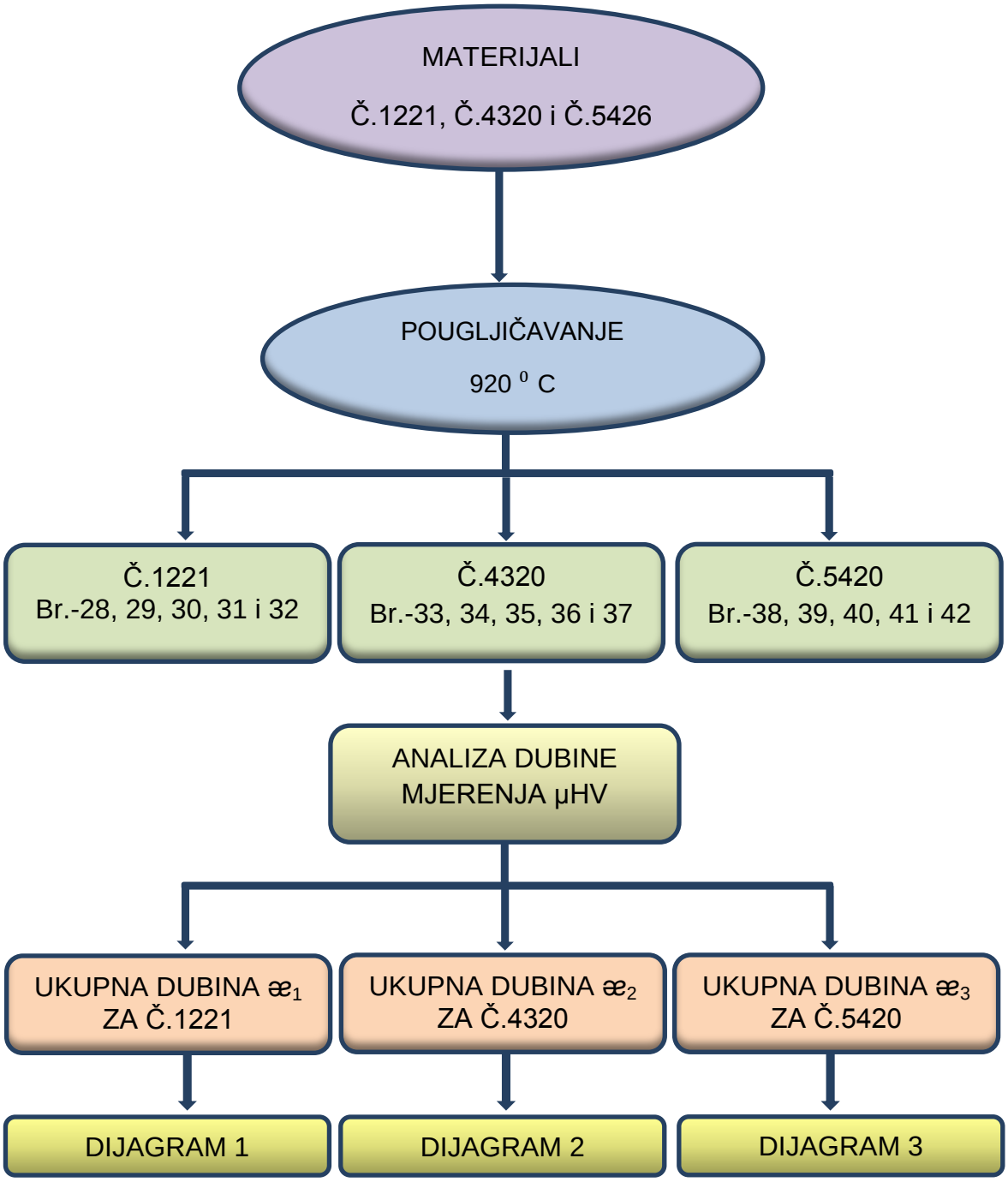
Nakon izmjerenih vrijednosti određuje se efektivna dubina cementiranog sloja [Edc]. To je ona dubina na kojoj je postignuto 80 % maksimalne tvrdoće cementiranog sloja. Time bi se mogla utvrditi neka određena tvrdoća (550 HV1) i dogovoriti da će ta tvrdoća značiti „stvarnu tehničku dubinu cementiacije“, ili bolje rečeno „dubinu tvrdoće cementacije“.



Slika 20 - Efektivna dubina cementirnog sloja [9]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. PLAN EKSPERIMENTALNOG DIJELA



5.2. EKSPERIMENTALINI MATERIJAL

Za eksperimentalni dio utvrđivanja sklonosti pougljičavanja čelika upotrebljavat će se tri različite vrste čelika za cementaciju. Pet epruveta je izrađeno od nelegiranog čelika Č.1221 (Ck 15), pet od legiranog čelika Č.4320 (16MnCr5) i pet epruveta od Č.5426 (15CrNi13). U dolje navedenim tablicama je prikazan kemijski sastav pojedinog čelika te njihova mehanička svojstva.

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“ %	Tvrdoća u isporučenom 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 korištene u eksperimentalnom dijelu su izrezane u uzorke manjih veličina i numerirane prema datom planu pokusa. Njime je određeno da će za čelik Č.1221 biti definirani uzorci pod brojem 28, 29, 30, 31 i 32; za Č.4320 uzorci će biti označeni brojevima 33, 34, 35, 36 i 37, te za Č.5426 uzorci će biti po brojevima 38, 39, 40, 41 i 42.

Sljedeća slika prikazuje izgled uzorka od sve tri vrste čelika za cementaciju.

Slika 21 - Izgled uzoraka prije pougljičavanja [9]

Uzorci čelik Č.1221 i Č.4320 su okruglog oblika, dok su za čelik Č.5426 pravokutnog. Dimenzije izrezanih uzoraka su sljedeće:

- Č.1221 – Ø 35 x 10 mm
- Č.4320 – Ø 35 x 13 mm
- Č.5426 – 10 x 17 x 35 mm

5.3. TOPLINSKA OBRADA - CEMENTACIJA

Proces toplinske obrade pokusnih uzoraka proveden je u pogonu tvrtke Adriadiesel d.d.. Prva etapa ovog dijela je slaganje i pozicioniranje uzoraka u visoke okrugle čelične kutije ispunjene granulatom. Granulat je smjesa koja se koristi za pougljičavanje. To je mješavina drvenog ugljena, veziva i aktivatora u obliku zrnatog granulata veličine od 3 do 5 mm.

Slika 22 - Posuda za pougljičavanje [9]

Čelične kutije se najprije ispune slojem granulata a potom se na taj dio granulata slažu uzorci pazeći pritom na njihov razmak i položaj. Pozicionirani uzorci se zatim opet prekrivaju slojem granulata, na koji se opet slažu uzorci. Ovaj proces se ponavlja još jednom da bi se sve na kraju prekrilo završnim slojem granulata.

Slika 23 - Pozicioniranje uzoraka u posudu za pougljičavanje [9]

Posuda nije ispunjena granulatom do kraja, već se ostavlja jedan dio posude do vrha praznim. Taj dio se prekriva zemljom radi sprječavanja doticaja sa okolišom. Ovakvo pripremljena posuda se zatvara posebnim poklopcem.

Slika 24 - Prikaz zatvorene posude za pougljičavanje [9]

Druga etapa je proces pougljičenja. Ova faza je provedena u komornoj elektro peći pri temperaturi od 920 °C.

Slika 25 - Komorna elektro peć [9]

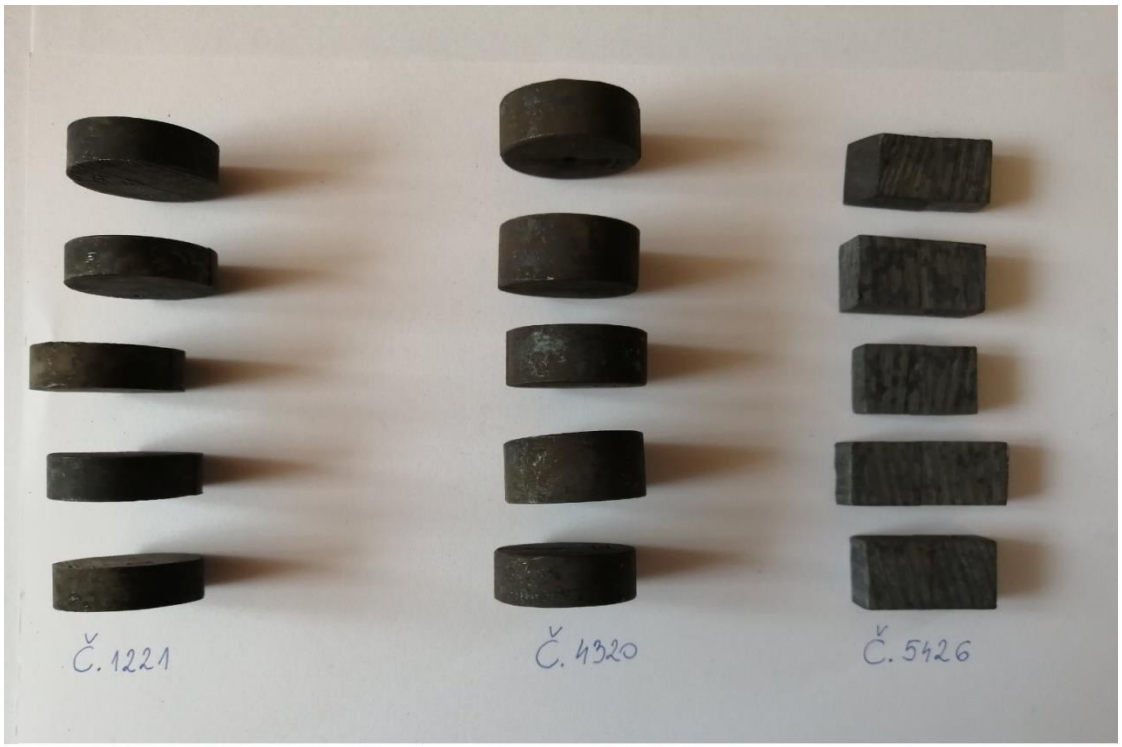
Pripremljena posuda se stavlja u peć gdje se uzorci postupno zagrijavaju do temperature od 920 °C, te se drži na toj temperaturi par sati. Nakon toga se posuda vadi iz peći i ostavlja da se materijal ohladi. Nakon hlađenja uzorci se vade iz kutije i odvajaju se od granulata.

Poslije procesa pougljičavanja provedeno je kaljenje uzoraka. Ovaj postupak je provoden na sljedeći način:

- Uzorci Č.1221 su kaljeni u vodi (iz soli u vodu), pri temperaturi od 820°C
- Uzorci Č.4320 i Č.5426 su termalno kaljeni (iz soli u sol), bez popuštanja

Analiza procesa kaljenja nije cilj ovog završnog rada te su zbog toga navedene samo osnovne informacije.

Po završetku kaljenja proveden je i poslijednji postupak niskotemperaturnog popuštanja na temperaturi od 180°C. Tim zadnjim korakom je završen proces cementacije uzoraka.



Temperatura pougljičavanja
920°C

Slika 26 - Izgled uzoraka nakon postupaka cementacije [9]

Cementirane čelične štapove je neophodno poprečno prerezati po presjeku radi daljnjeg ispitivanja tvrdoće i dubine pougljičenja. Visokobrzinsko rezanje uzoraka izvedeno je pomoću pile marke Buehler. Nakon rezanja uzorci moraju proći intenzivno hlađenje, time se sprječava zagrijavanje i promjena strukture materijala uslijed povećanja temperature. Bez toga uzorci ne bi bili ispravni, odnosno ispitivanja ne bi dala točne i pouzdanje vrijednosti.

Slika 27 - Visokobrzinsko rezanje štapova [9]

Zadnja faza prije početka ispitivanja uzoraka je njihovo poliranje. Ovaj postupak je izveden na polirki marke Buehler Ecomet 3. Nakon poliranja uzorci također moraju proći adekvatno hlađenje.

Slika 28 - Poliranje uzoraka [9]

5.4. ISPITIVANJE DUBINE POUGLJIČAVANJA I TVRDOĆE

Ispitivanje pokusnih uzoraka je provedeno u laboratoriju Adriadiesel-a d.d.. Ispitivanja tvrdoće su izvedena na THR 6101 stolnom uređaju za mjerenje tvrdoće materijala prema Rockwell metodi s analognim očitanjem rezultata na velikoj mjernoj uri.

Slika 29 - Mjerni uređaj za ispitivanje tvrdoće [9]

Nakon toga je provedeno 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.

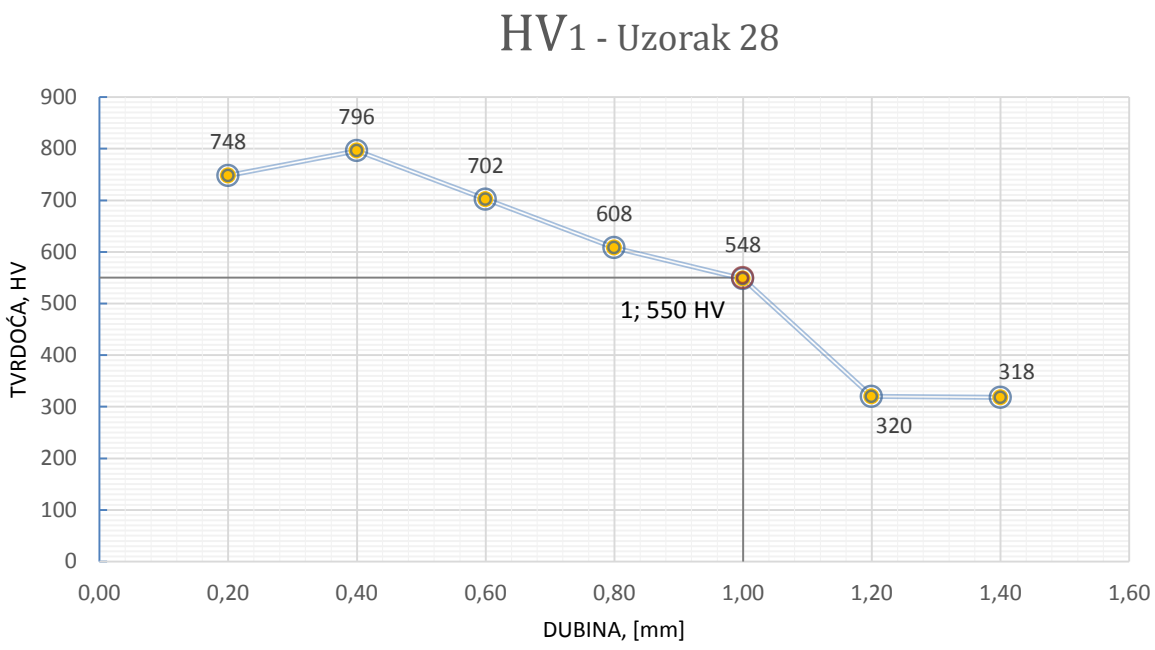
Slika 30 – LEITZ Durimet 2 mikroskop [9]

U nastavku su dati rezultati ispitivanja dubine pougljičavanja za materijal Č.1221, Č.4320 i Č.5426. Svaki dijagram odgovara određenom uzorku, a na kraju se nalazi i dijagram sa zajedničkim rezultatima uzoraka, za svaki od ispitanih čelika.

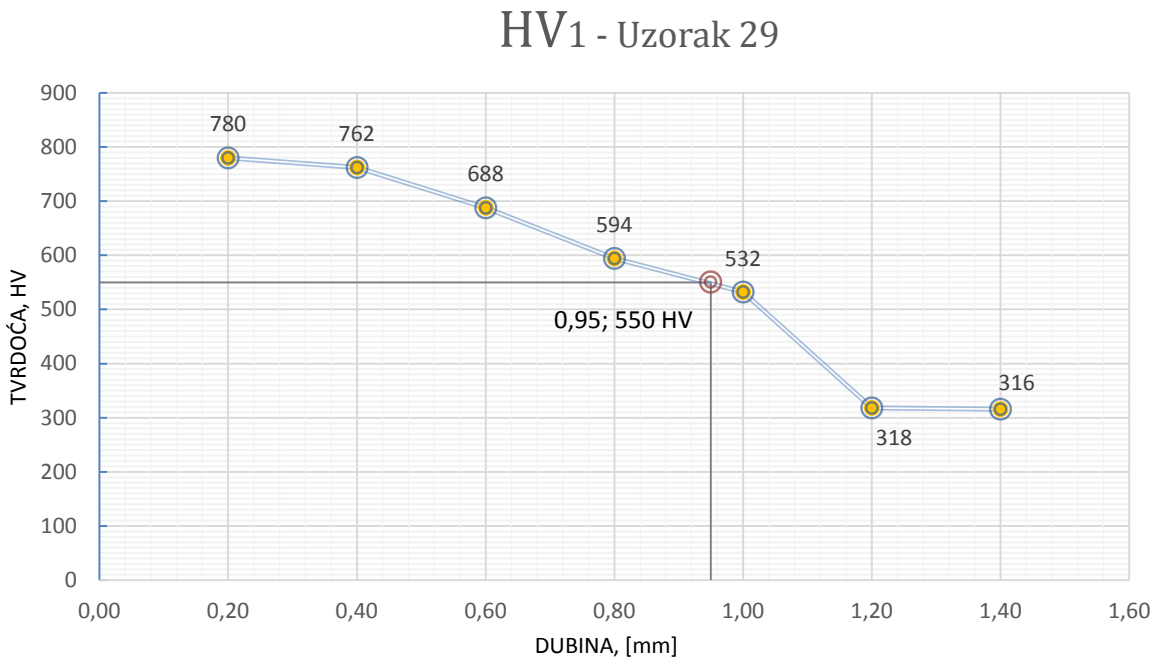
5.4.1. REZULTATI ISPITIVANJA MIKROTVRDOĆE ZA ČELIK Č.1221

Uzorak 28 i 29

550 HV → 1 mm dubine – efektivna dubina cementacije

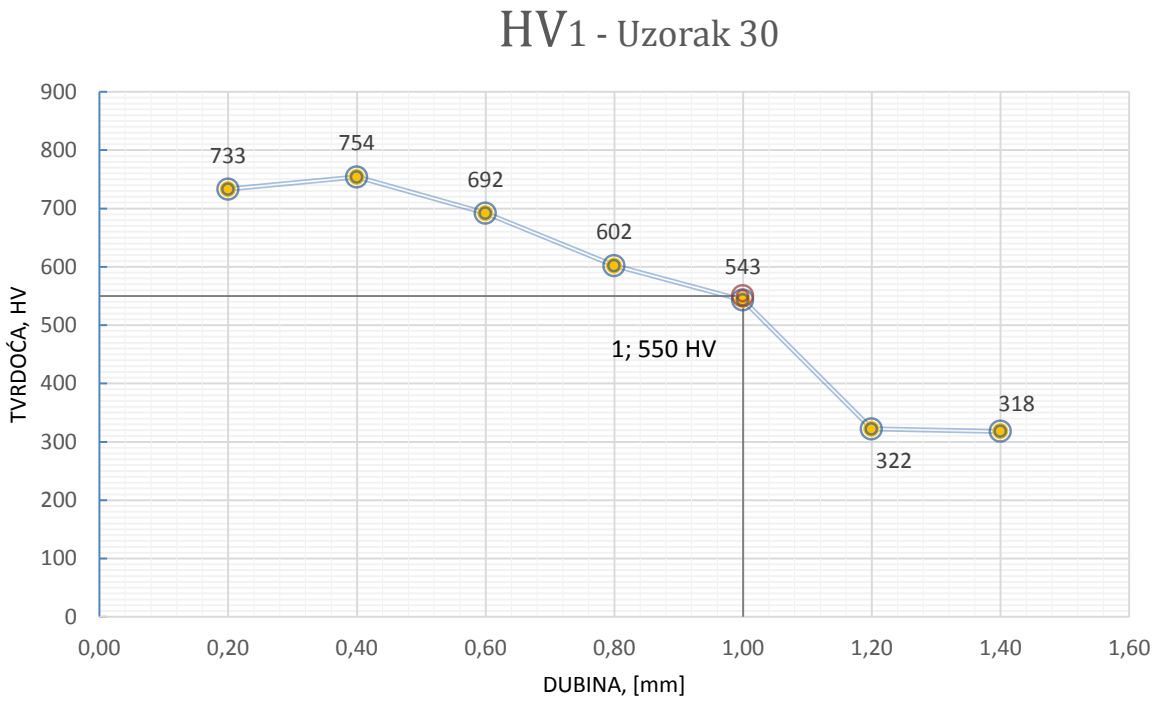


550 HV → 0,95 mm dubine – efektivna dubina cementacije

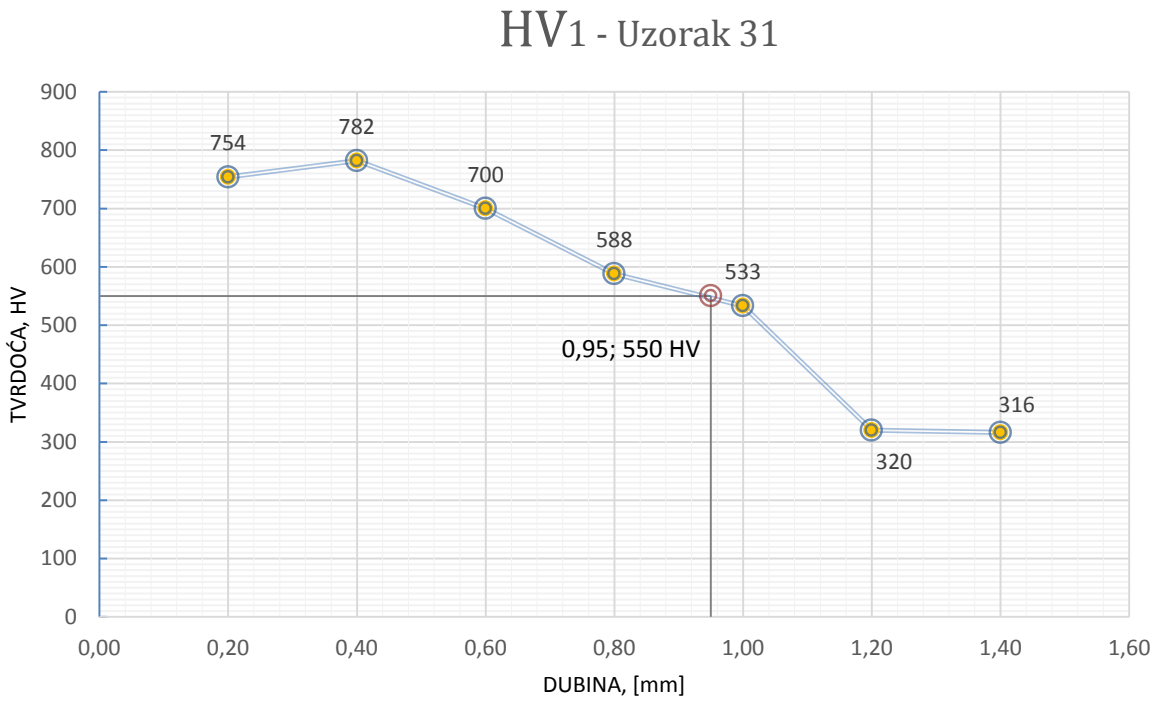


Uzorak 30 i 31

550 HV → 1 mm dubine – efektivna dubina cementacije

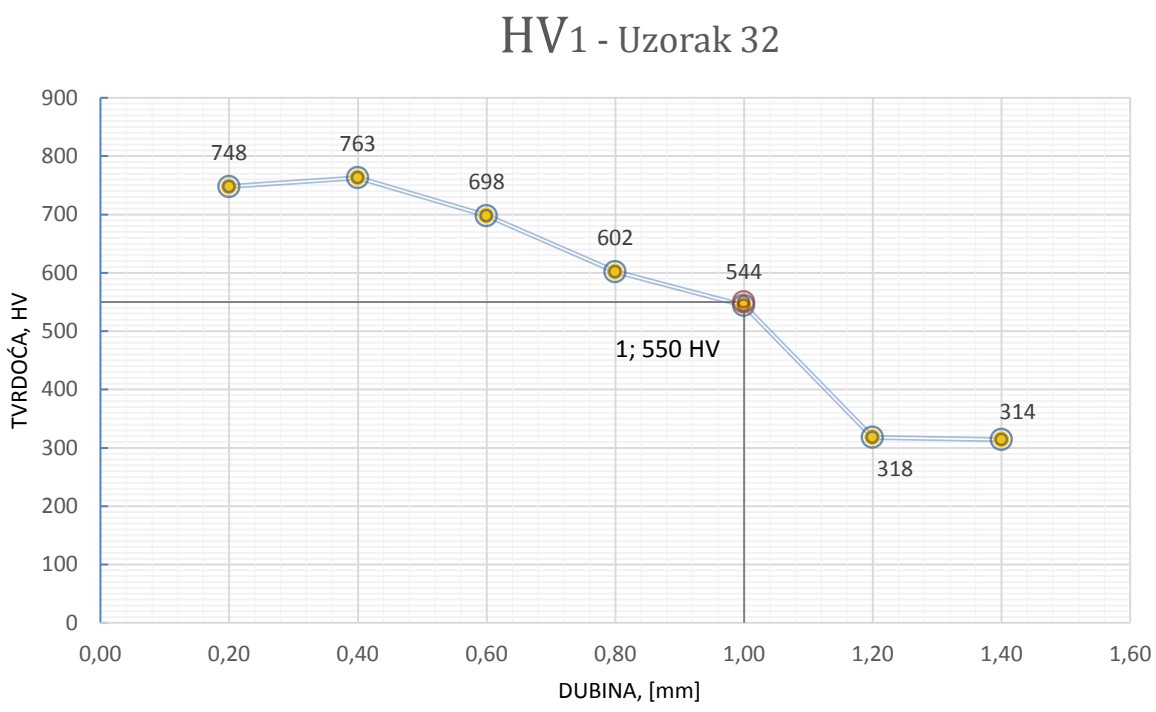


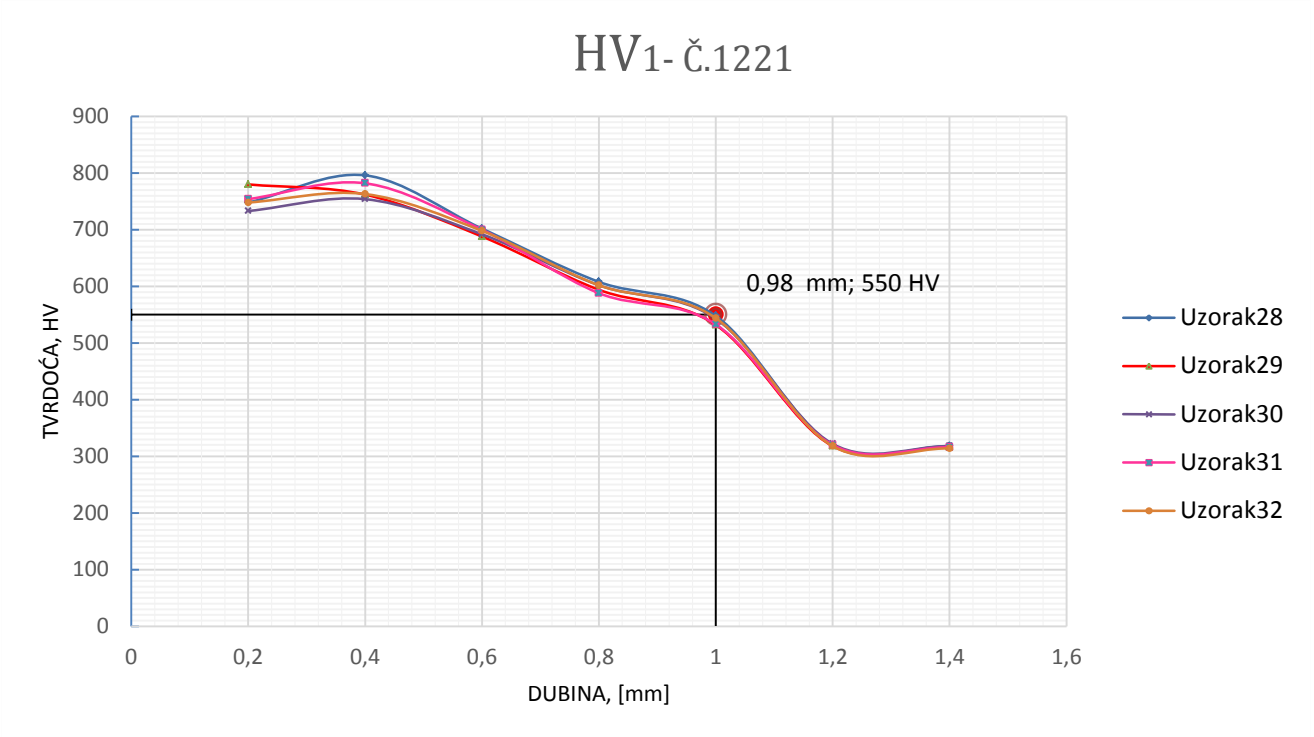
550 HV → 0,95 mm dubine – efektivna dubina cementacije



Uzorak 32

550 HV → 1 mm dubine – efektivna dubina cementacije



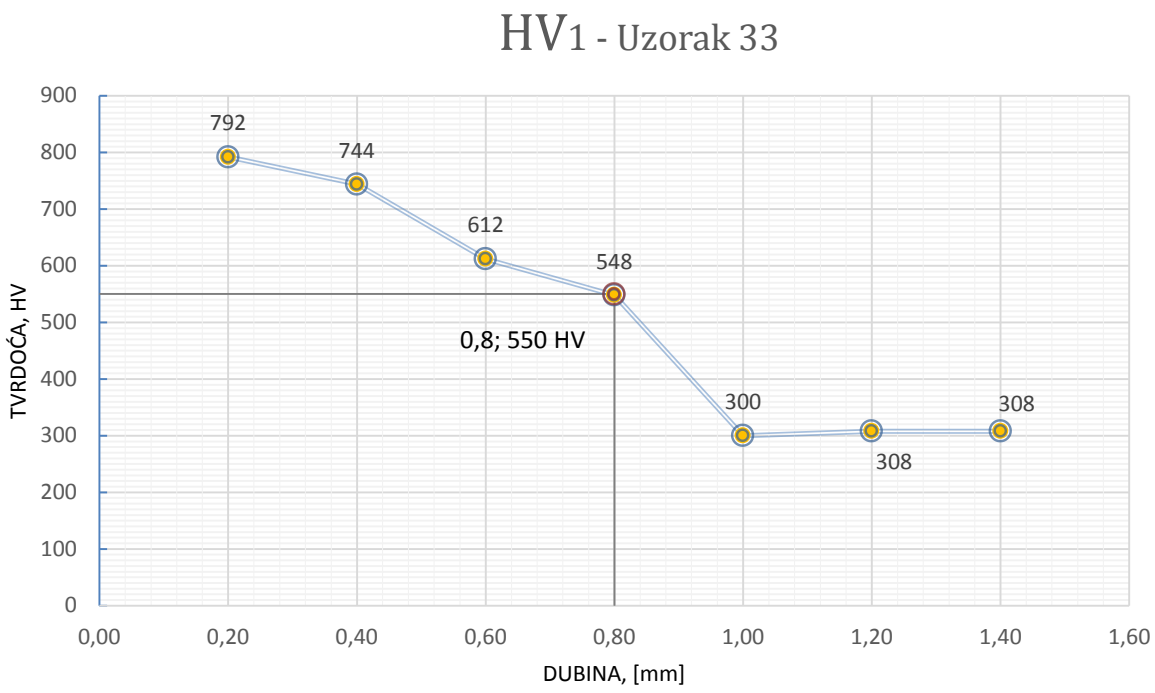


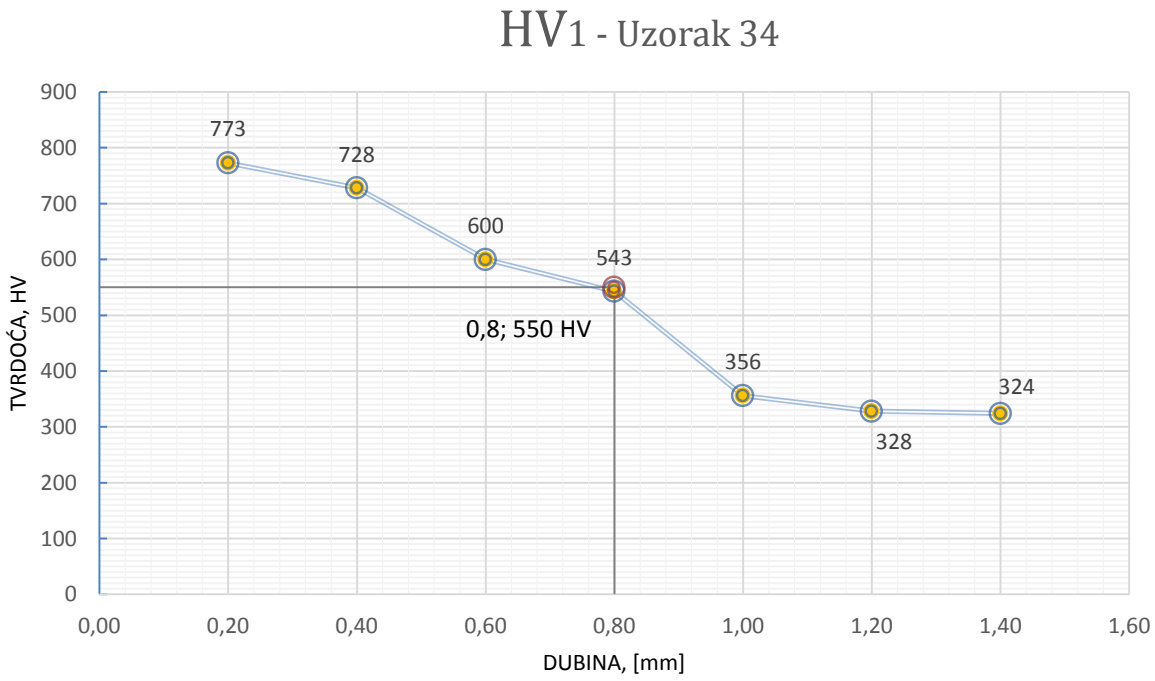
Slika 31 - Dijagram uzoraka za čelik Č.1221

5.4.2. REZULTATI ISPITIVANJA MIKROTVRDOĆE ZA ČELIK Č.4320

Uzorak 33 i 34

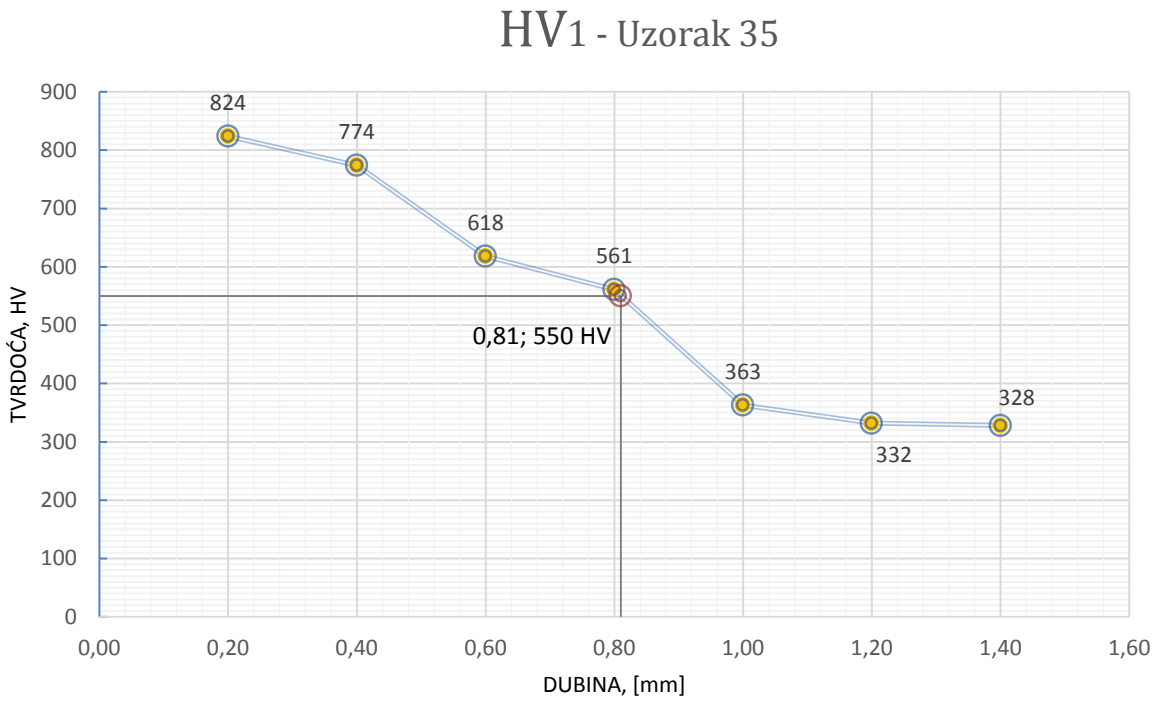
550 HV → 0,8 mm dubine – efektivna dubina cementacije

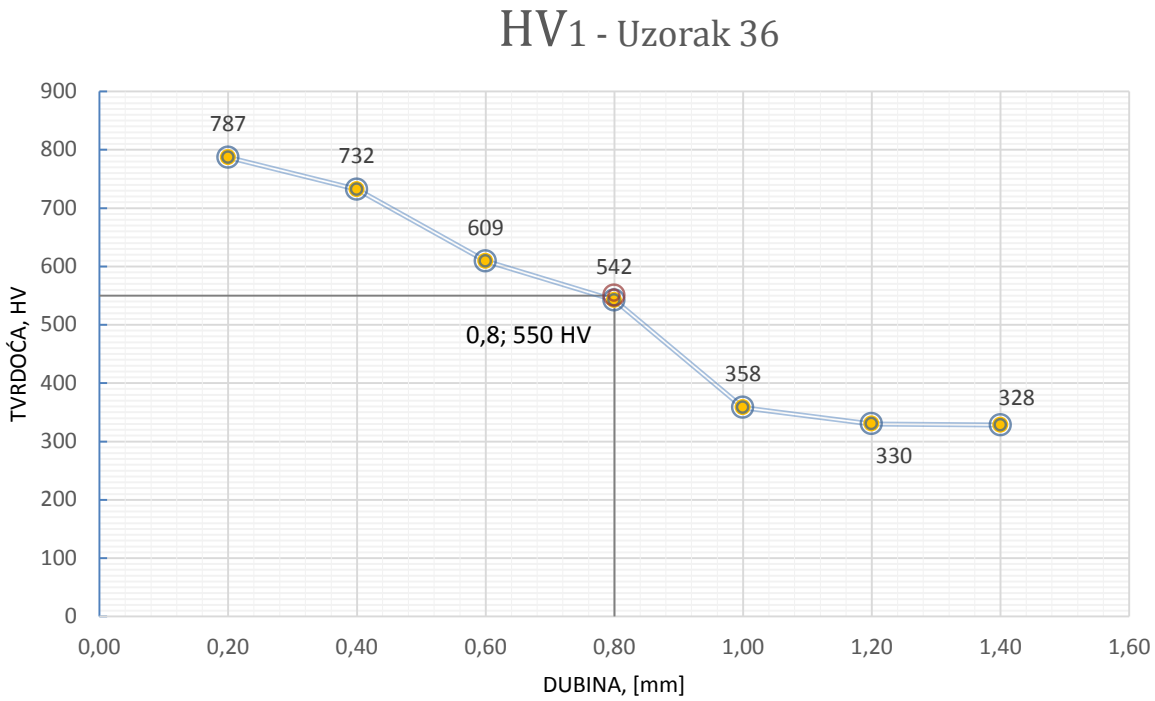




Uzorak 35 i 36

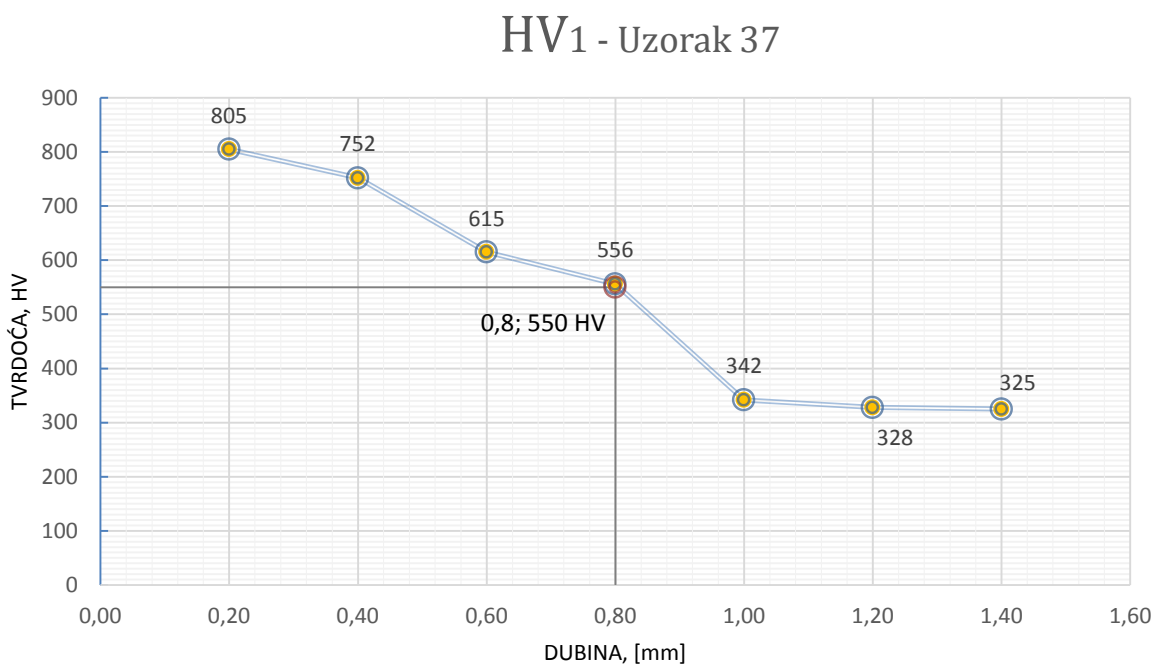
550 HV → 0,81 mm i 0,80 mm dubine – efektivna dubina cementacije

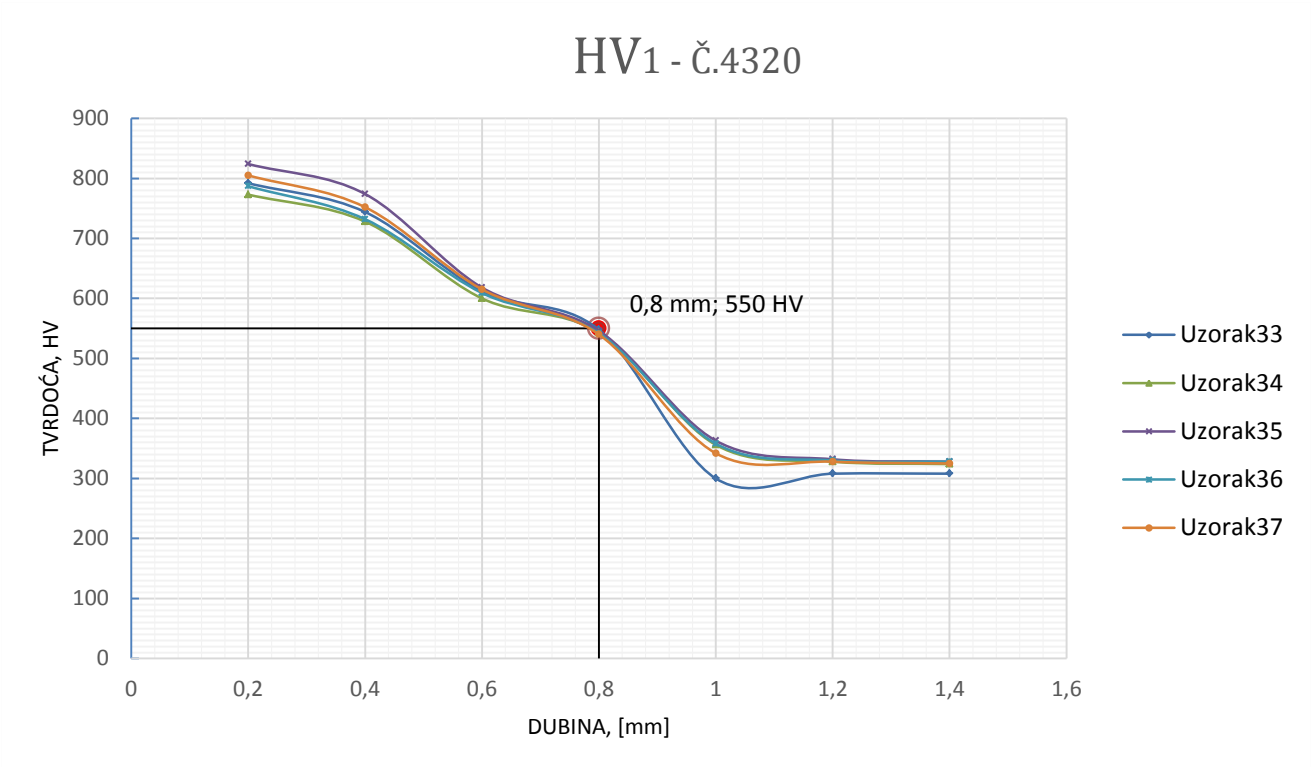




Uzorak 37

550 HV → 0,8 mm dubine – efektivna dubina cementacije



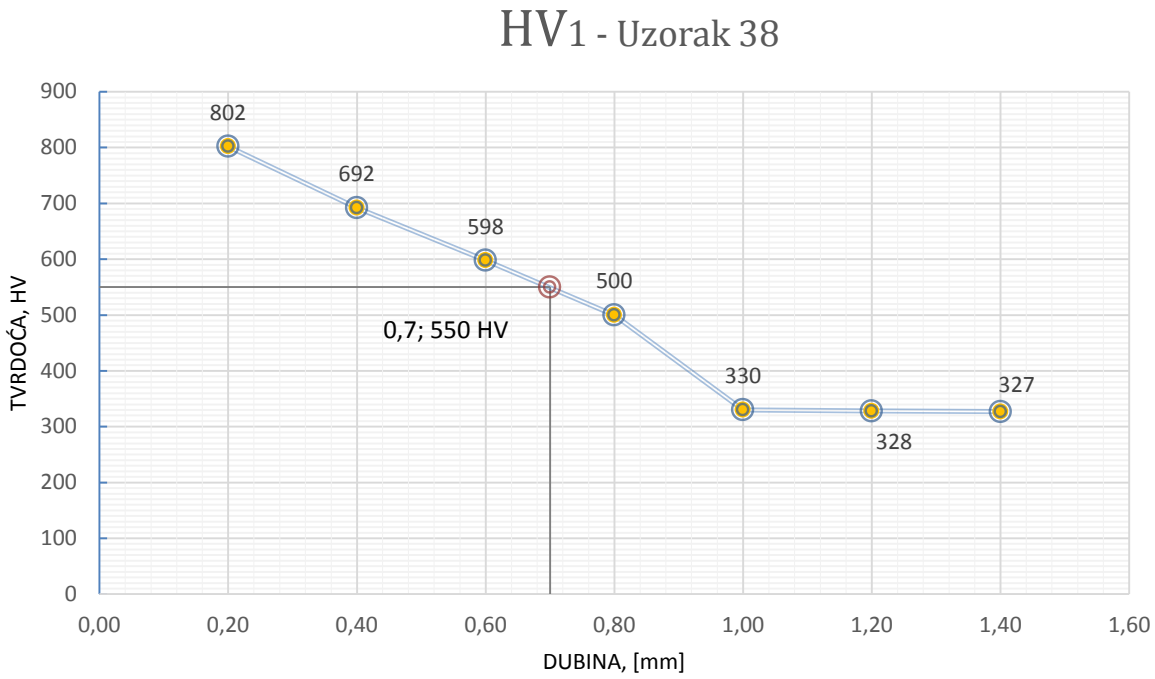


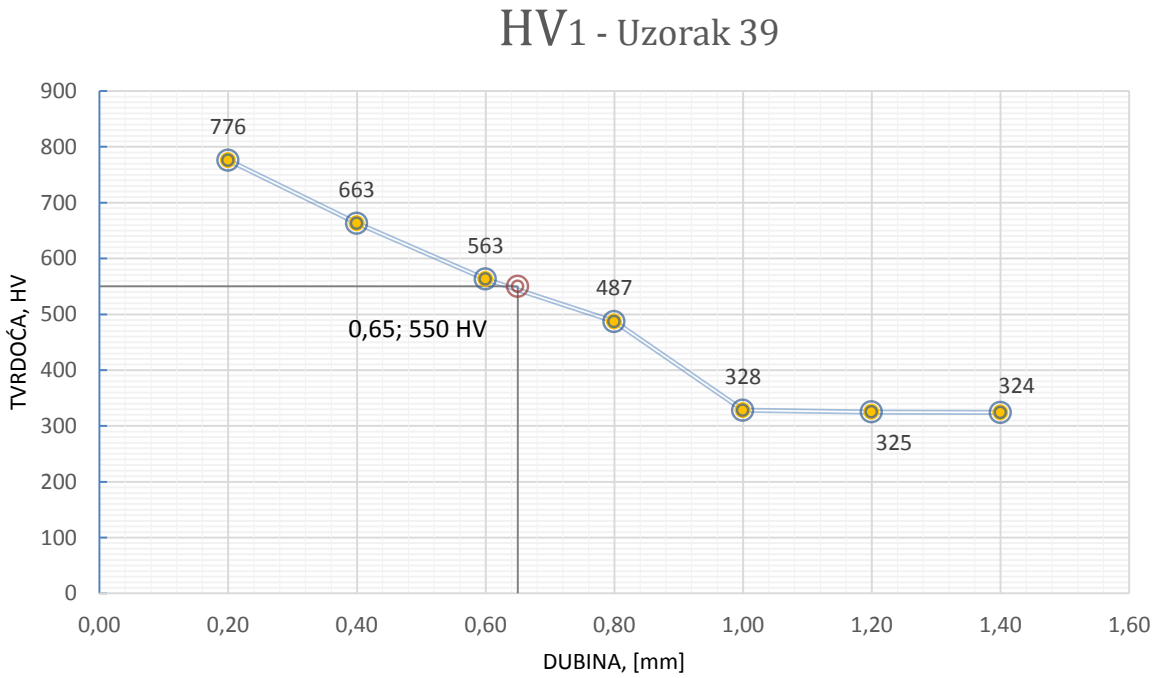
Slika 32 - Dijagram uzoraka za čelika Č.4320

5.4.3. REZLUTATI ISPITIVANJA MIKROTVRDOĆE ZA ČELIK Č.5426

Uzorak 38 i 39

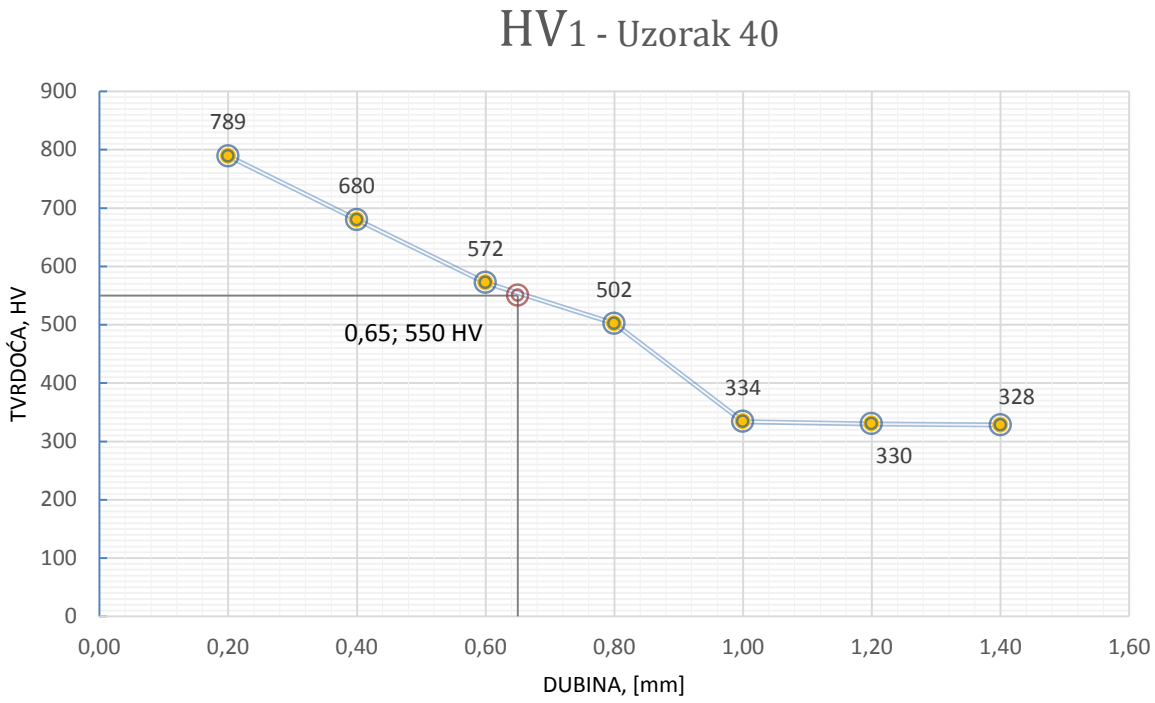
550 HV → 0,70 mm i 0,65 mm dubine – efektivna dubina cementacije

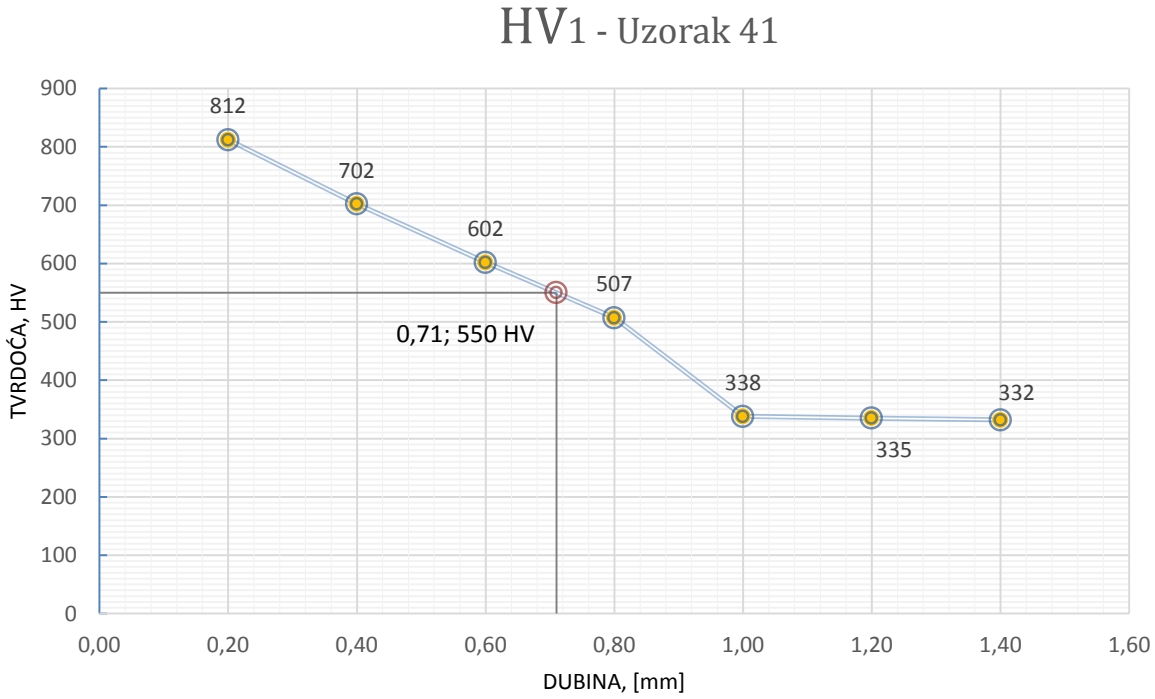




Uzorak 40 i 41

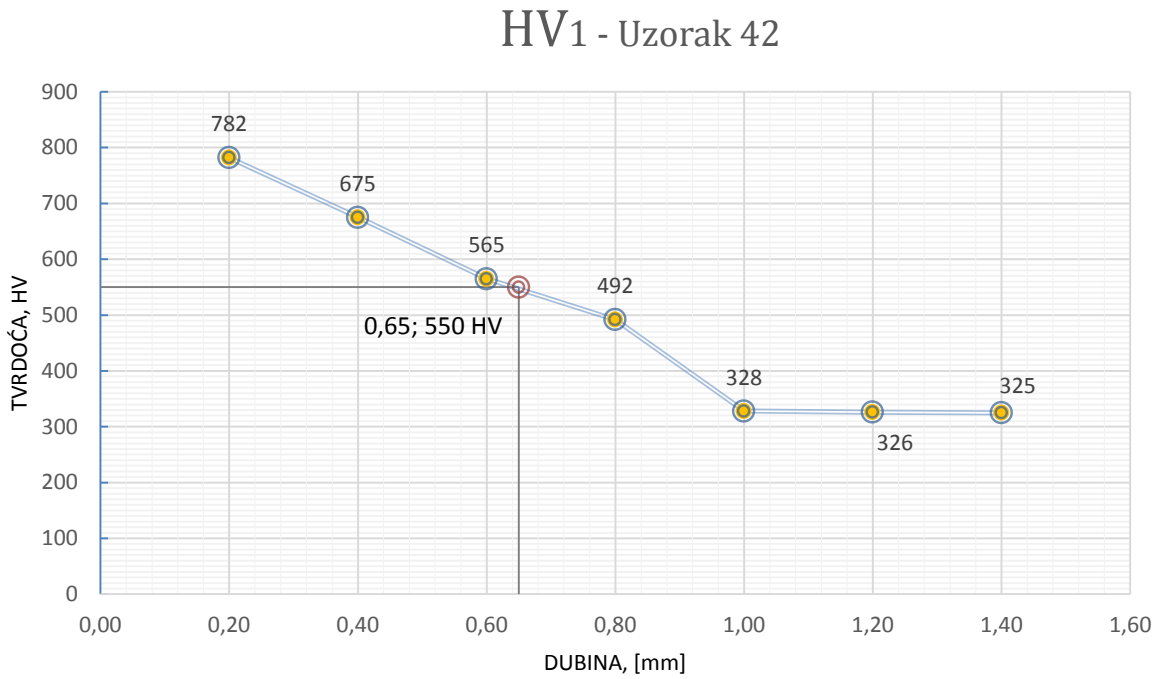
550 HV → 0,65 mm i 0,71 mm dubine – efektivna dubina cementacije

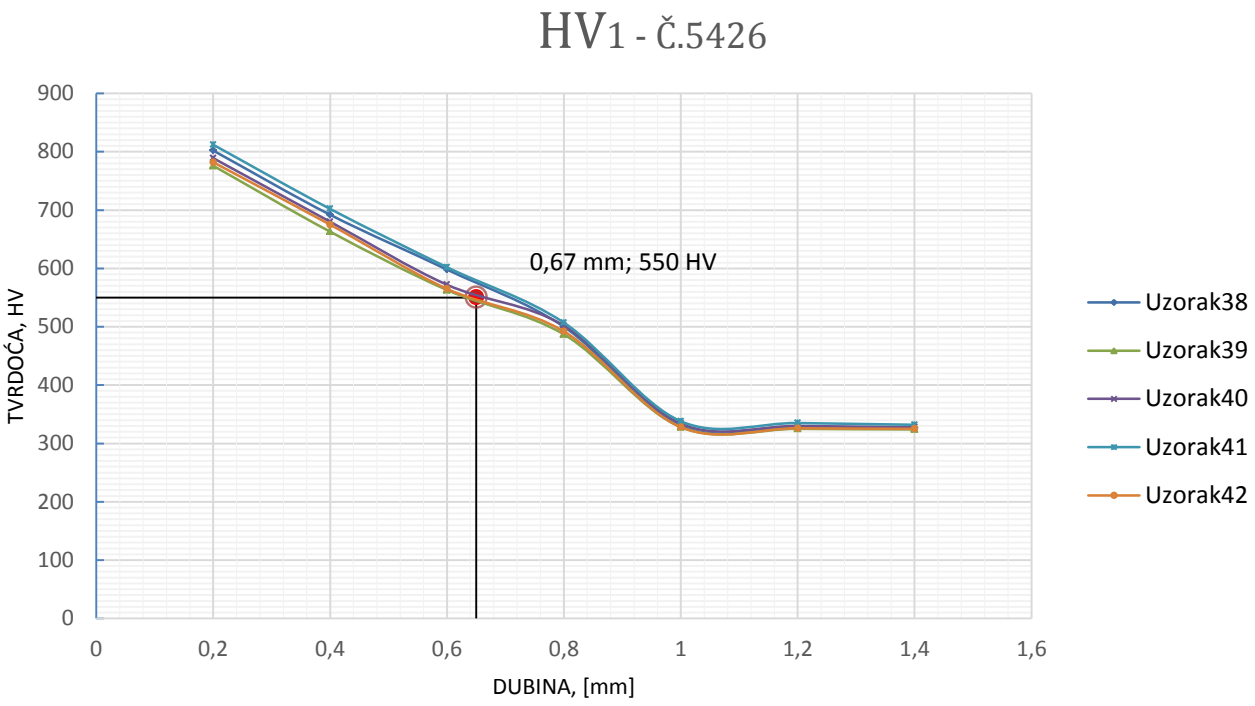




Uzorak 42

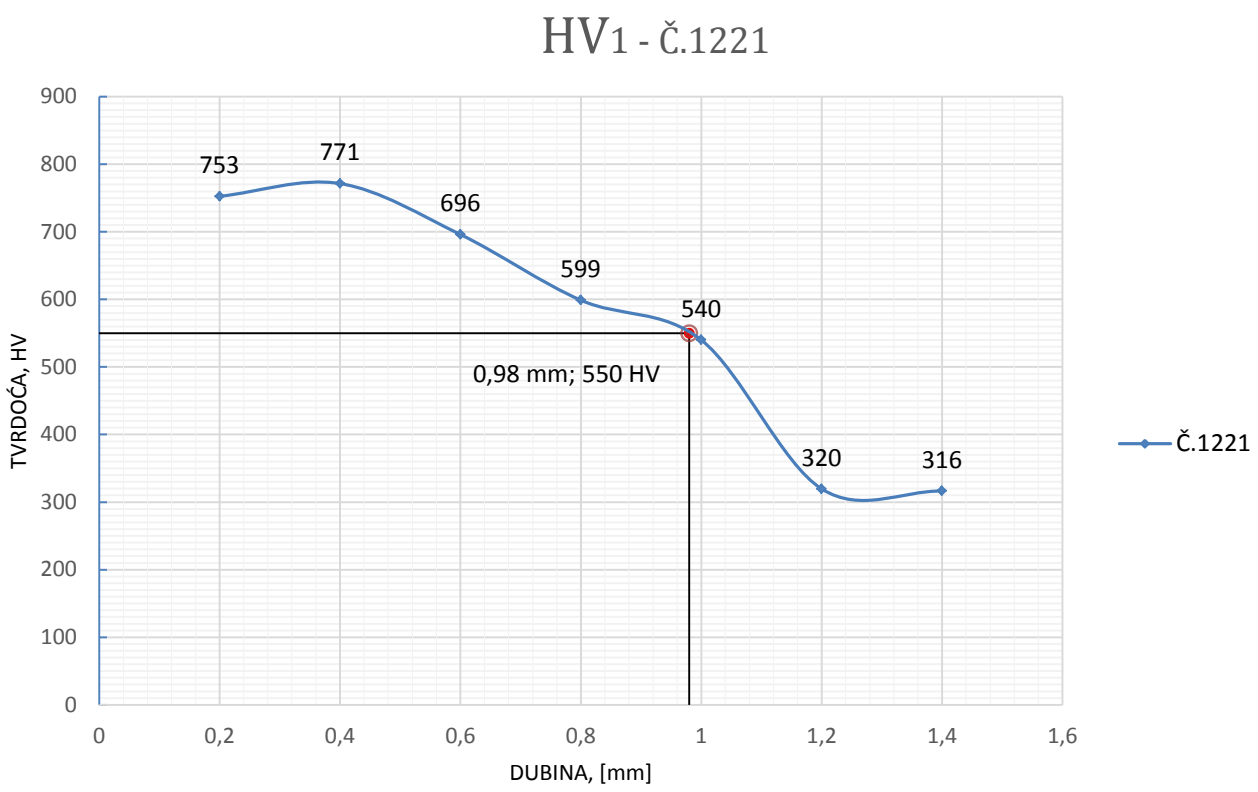
550 HV1 → 0,65 mm dubine – efektivna dubina cementacije

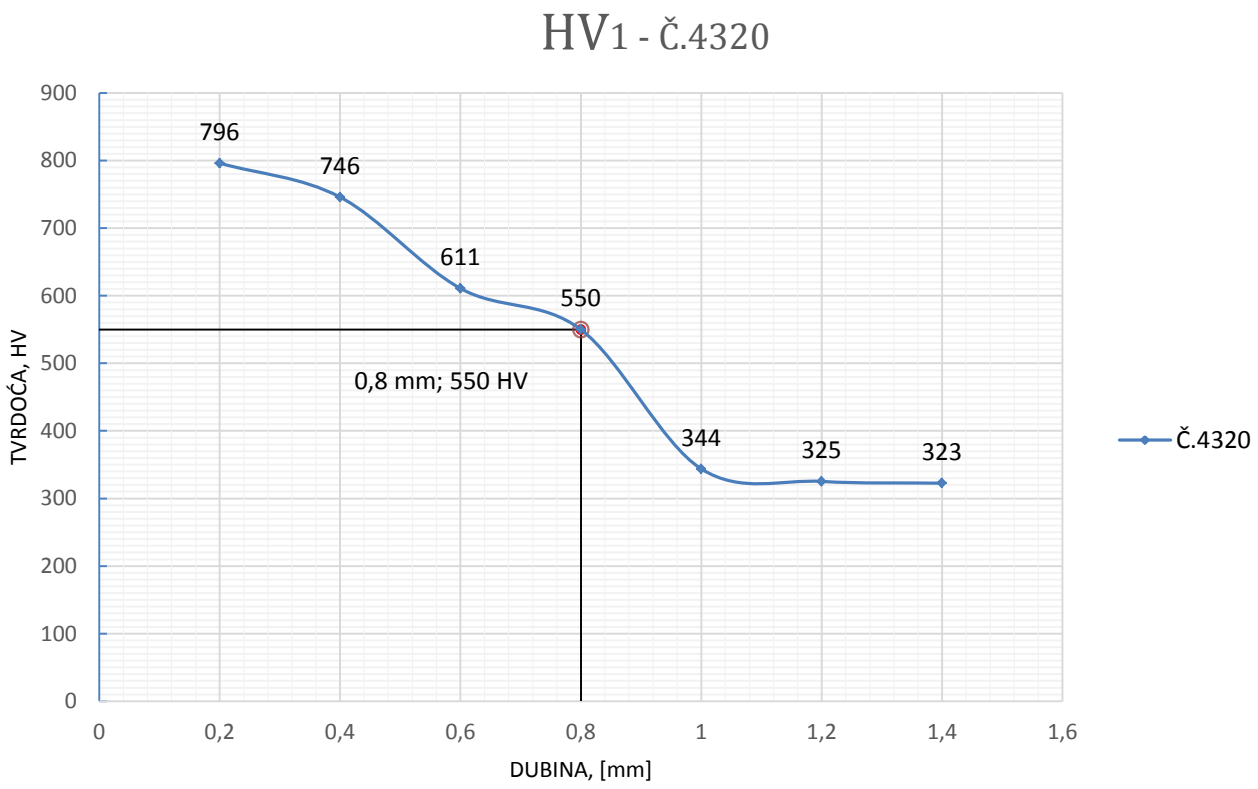


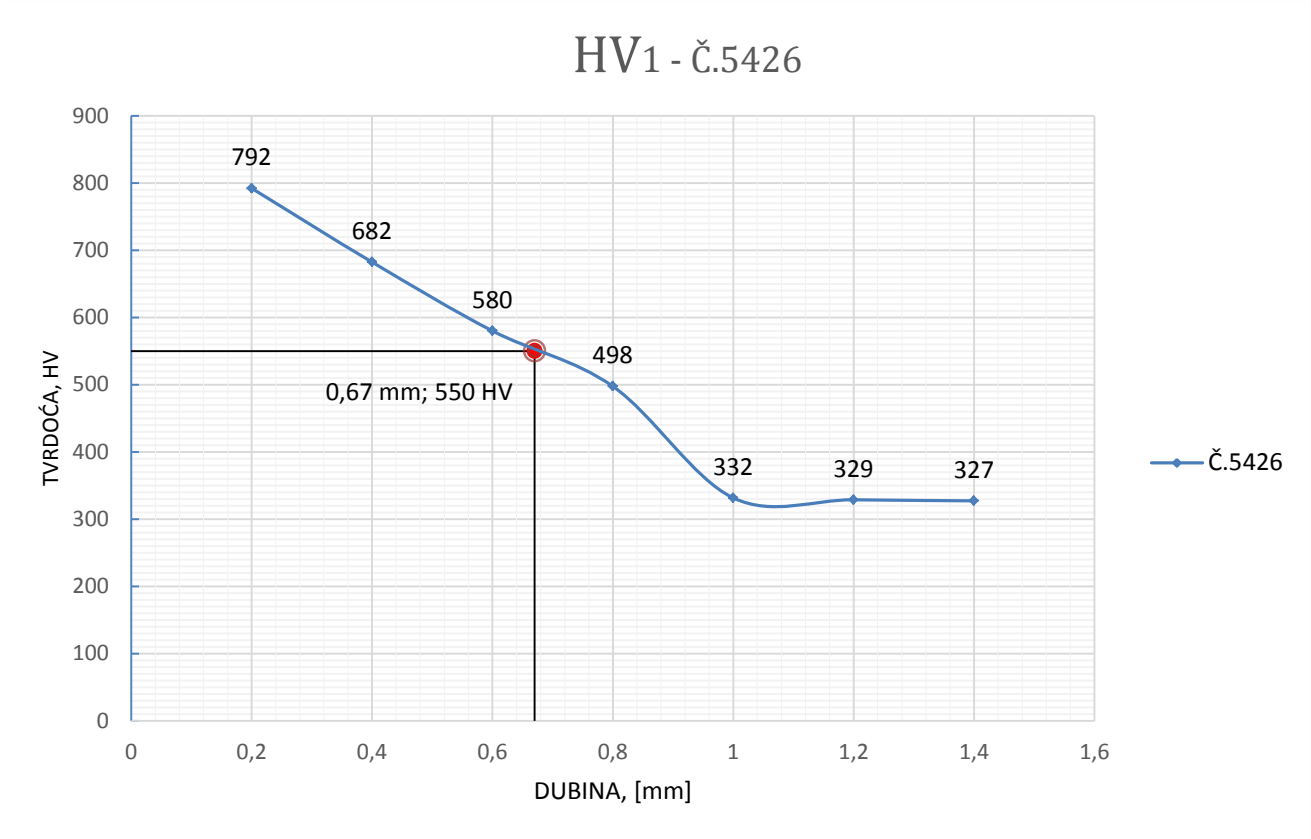


Slika 33 - Dijagram uzoraka za čelik Č.5426

5.4.4. DIJAGRAMI SREDNJE VRIJEDNOSTI







Najveća efektivna dubina pougljičavanja postignuta je kod čelika Č.1221 i ona iznosi 1 mm. Najveća površinska mikrotvrdoća ovog materijala iznosi 780 HV, što gledajući srednje vrijednosti svrstava ovaj materijal na treće mjesto po mikrotvrdoći.

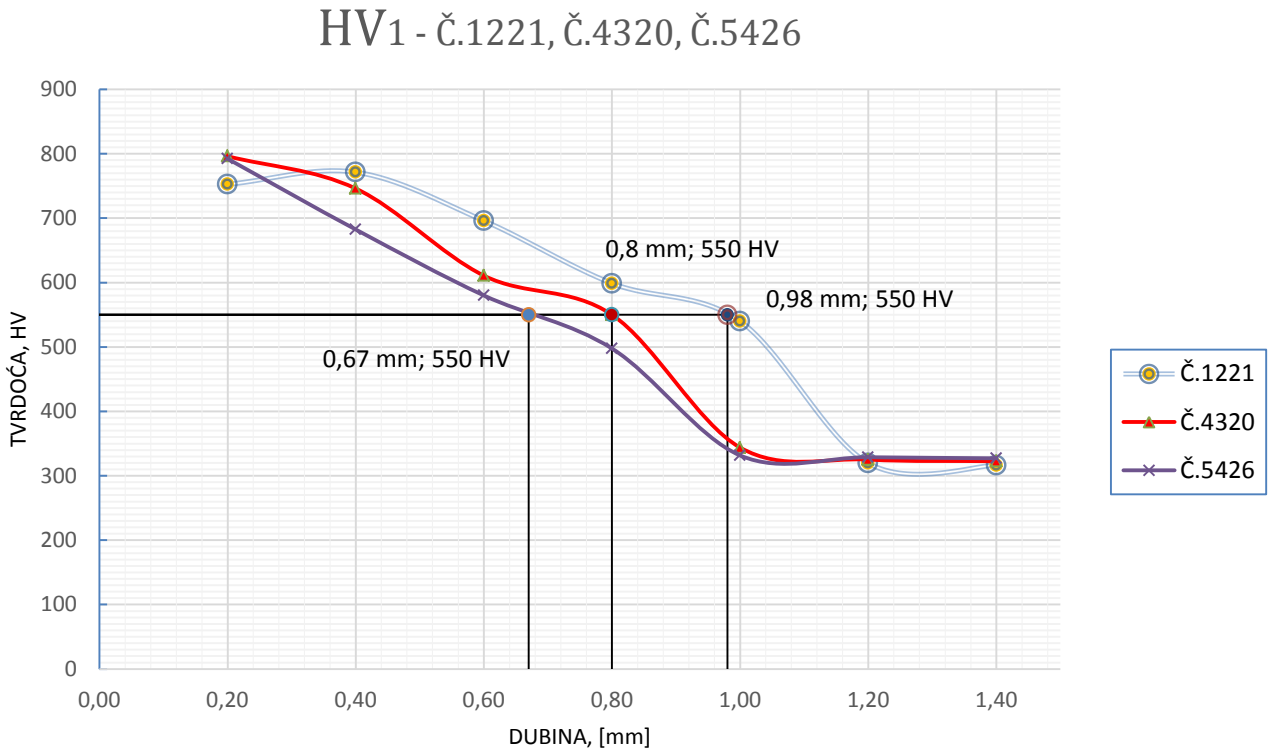
Što se tiče čelika Č.4320, postigao je najveću površinsku mikrotvrdoću od 824 HV, dok je najmanja iznosila 773 HV. Dubina pougljičavanja ovog materijala iznosila je najviše 0,81 mm.

Posljednji ispitani materijal Č.5426 imao je najmanju efektivnu vrijednost od sva tri materijala i ona je iznosila 0,65 mm, odnosno, 0,67 mm gledajući srednju vrijednost. Površinska tvrdoća ovog materijala kretala se između 812 HV i 776 HV.

6. ANALIZA REZULTATA

Dobiveni rezultati mjerenja ukazuju na razliku vrijednosti efektivne dubine pougljičavanja čelika za cementaciju. Pougljičavanje se provodilo pod jednakim uvjetima s istom temperaturom i pougljičavajućim sredstvom. Razlika je bila samo u kemijskom sastavu cementiranih čelika, gdje je jedan bio nelegirani te dva legirana čelika (Cr-Mn, Cr-Ni).

Ispitivanjem dubine pougljičavanja nelegiranog čelika Č.1221 dobivena je najveću vrijednost efektivne dubine pougljičavanja od 0,98 mm. Ispitivanjem legiranih čelika zapažen je trend opadanja vrijednosti efektivne dubine pougljičavanja. Čelik Č.4320 ostvario je 0,8 mm efektivne dubine, dok je čelik Č.5426 pokazao najmanje vrijednosti efektivne dubine od 0,67 mm zbog utjecaja nikla u svom kemijskom sastavu. Jasno je vidljiva razlika u izgledu krivulja tvrdoće ova dva čelika, gdje je krivulja Č.5426 položenija od krivulje Č.4320.



Slika 34 - Dijagram čelika srednje vrijednosti Č.1221, Č.4320, Č.5426

7. ZAKLJUČAK

Eksperimentalni dio ovog rada, toplinska obrada čelika tj. cementacija materijala i ispitivanje njihove mikrotvrdoće, izvodio se u prostoru tvrtke Adriadiesel d.d..

Pokus se temeljio na pougljičavanju, neovisno o vremenu trajanja pougljičavanja, već samo o analizi tri materijala pod identičnim uvjetima rada. Korištene su tri vrste čelika za cementaciju s različitim kemijskim sastavom. Za svaki materijal uzeto je pet probnih uzoraka i svaki je ispitan nakon procesa pougljičavanja u granulatu i kaljenja. Nakon procesa toplinske obrade na uzorcima je vršeno mjerenje mikrotvrdoće slojeva po dubini pougljičenog sloja.

Analizom efektivne dubine pougljičavanja pod identičnim uvjetima možemo zaključiti da je tijekom istih uvjeta pougljičavanja cementiranog čelika, najduže pougljičavanje za čelike Č.1221 te zatim za Č.4320, dok je najmanja efektivna vrijednost dubine postignuta kod čelika Č.5426 što je po funkciji legiranih elemenata. Zbog toga možemo reći da kemijski sastav i legiranost materijala imaju utjecaj na postizanje različitih vrijednosti mikrotvrdoća i efektivnih dubina pougljičavanja.

LITERATURA

[1] Pavle Pavlović: Materijal čelik, SKTH/Kemija u industriji Zagreb, (1990.)

[2] Stjepan Kožuh: Specijalizirani čelici, skripta, Sisak, (2010.)

[3] Liščić B.: Termokemijski postupci, Metalbiro Zagreb, (1981.)

[4] Filetin T., Kovačiček F.: Svojstva i primjena materijala, FSB Zagreb, (2002.)

[5] Bozić T.: Nastavni materijal, Veleučilište u Karlovcu

[6] Robert Sladonja: Tehnologija izrade i kontrola kvalitete cementiranih strojnih dijelova, Karlovac, (2019.)

[7] Goran Havidić: Utjecaj pozicioniranja dijelova pri pougljičenju u krutom sredstvu na rezultate dubine pougljičenja, Karlovac, (2018.)

[8] Bojan Kraut: Krautov strojarski priručnik, Zagreb, (2009.)

[9] Vlastita izrada

[10] Hrvoje Požar: Tehnička enciklopedija, Grafički zavod Hrvatske, (1987.)

POPIS OZNAKA

Simbol	Jedinica	Značenje
ϑ_{TO}	ºC	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 - Podjela čelika prema namjeni [1] 2
Slika 2 - Mikrostruktura cemetiranog zupčanika izrađenog od čelika Č.4320 [2] 4
Slika 3 - Shematski prikaz dijagrama najčešćih postupaka cementacije j-jezgra, r-rub sloja [2] 5
Slika 4 - Dijagram postupka cementacije [5] 9
Slika 5 - Prikaz procesa pougljičavanja čelika [3] 10
Slika 6 - Utjecaj trajanja pougljičavanja na dubinu pougljičavanja [3] 11
Slika 7 - Utjecaj temperature na dubinu pougljičavanja za čelik Č.1220 [3] 12
Slika 8 - Sredstvo za cementaciju (granulat) [5] 13
Slika 9 - Prikaz stanja u Fe - C dijagramu nakon pougljičavanja [7] 21
Slika 10 - Kaljenje za tri različite temperature [7] 22
Slika 11 - Prikaz direktnog kaljenja [3] 23
Slika 12 - Jednostruko kaljenje [3] 24
Slika 13 - Jednostruko kaljenje nakon međužarenja [3] 24
Slika 14 - Jednostruko kaljenje nakon izotermičke pretvorbe [3] 25
Slika 15 - Dvostruko kaljenje [3] 25
Slika 16 - Dvostruko kaljenje [3] 26
Slika 17 - Pad tvrdoće u ovisnosti o temperaturi i trajanju popuštanja [5] 27
Slika 18 - Shematski prikaz postupka pri utvrđivanju tehničke dubine cementacije: a)razrezivanje uzorka ; b)shema Vickersovih utisnuća [5] 28
Slika 19 - Shematski prikaz mjerenja tvrdoća slojeva nakon stupnjevitog brušenja sloja [5] 29
Slika 20 - Efektivna dubina cementirnog sloja [9] 29
Slika 21 - Izgled uzoraka prije pougljičavanja [9] 32
Slika 22 - Posuda za pougljičavanje [9] 33
Slika 23 - Pozicioniranje uzoraka u posudu za pougljičavanje [9] 34
Slika 24 - Prikaz zatvorene posude za pougljičavanje [9] 34
Slika 25 - Komorna elektro peć [9] 35
Slika 26 - Izgled uzoraka nakon postupaka cementacije [9] 36
Slika 27 - Visokobrzinsko rezanje štapova [9] 37

Slika 28 - Poliranje uzoraka [9] 37
Slika 29 - Mjerni uređaj za ispitivanje tvrdoće [9] 38
Slika 30 – LEITZ Durimet 2 mikroskop [9] 39
Slika 31 - Dijagram uzoraka za čelik Č.1221 42
Slika 32 - Dijagram uzoraka za čelika Č.4320 45
Slika 33 - Dijagram uzoraka za čelik Č.5426 48
Slika 34 - Dijagram čelika srednje vrijednosti Č.1221, Č.4320, Č.5426 51

POPIS TABLICA

Tablica 1 - Čelici za cementaciju [2] 3
Tablica 2 - Kemijski sastav čelika [8] 31
Tablica 3 - Mehanička svojstva čelika [8] 31