

# Mjerenje brzine ultrazvuka u etalonskim pločicama tvrdoće

---

**Grozdanić, Maria**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:284390>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Maria Grozdanić**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Markučič, dipl. ing.

Student:

Maria Grozdanić

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se svim kolegama i profesorima, koji su mi pomagali tijekom studiranja. Posebno se zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. sc. Damiru Markučiću na stručnom vodstvu i nesebičnoj pomoći tijekom pisanja ovog rada. Velike zahvale idu i asistentici dr. sc. Morani Mihaljević na suradnji tijekom odrađivanja eksperimentalog dijela, prof. dr. sc. Željku Alaru na ustupljenim etalonima, tehničkom suradniku Josipu Smoljiću na određivanju debljine uzoraka, tehničkoj suradnici Dubravki Ulagi na provedenom XRF ispitivanju te dr. sc. Tamari Aleksandrov Fabijanić na određivanju tvrdoće uzorka. Bez njihove pomoći ovaj rad ne bi bilo moguće napisati.

Ipak, najveće zahvale idu mojim roditeljima, bratu, sestri i dečku, koji su mi bili velika podrška tijekom studiranja.

Maria Grozdanić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Maria Grozdanić** Mat. br.: 0035203694

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerenje brzine ultrazvuka u etalonskim pločicama tvrdoće**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Ultrasonic velocity measurement on reference hardness blocks**

Opis zadatka:

Jedna od relevantnih akustičkih značajki u svrhu karakterizacije materijala i procjene mehaničkih svojstava je brzina propagacije ultrazvučnih impulsa. Povezanost spomenutih značajki nije izravna niti jednostavna međutim u praktičnoj primjeni i u danim uvjetima susrećemo tehniku karakterizacije svojstava materijala utvrđivanjem brzine propagacije ultrazvučnih impulsa.

U cilju obuhvatnijeg razumijevanja svih relevantnih utjecaja kao i intervala unutar kojih variraju vrijednosti tvrdoće materijala u korelaciji s brzinom ultrazvuka potrebno je:

- Istražiti izvore u kojima su prezentirana do sada provedena istraživanja, analize i rezultati.
- Prikazati relevantne akustičke parametre te ih po mogućnosti rangirati po značajnosti utjecaja.
- Uzeti u obzir homogenost i usmjerenost mikrostrukture uzoraka u ovisnosti o smjeru propagacije ultrazvučnih impulsa.
- Temeljem uvodne analize osmisliti i provesti usporedna mjerenja na etalonskim pločicama tvrdoće.
- Slijedom dobivenih rezultata provesti mjerenja na odabranim uzorcima čelika.
- Zaključno komentirati dobivene rezultate kao i primjenjivost ove tehnike obzirom na dane uvjete u praktičnoj primjeni.

U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:  
29. studenog 2018.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 22. veljače 2019.  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2019.  
**3. rok:** 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 25.2. - 1.3. 2019.  
**2. rok (izvanredni):** 2.7. 2019.  
**3. rok:** 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Markučić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Ispitivanje ultrazvukom.....	1
1.2. Princip rada – tehnika odjeka.....	2
2. ISTRAŽIVANJA KORELACIJE BRZINE PROPAGACIJE ULTRAZVUČNIH IMPULSA I TVRDOĆE.....	4
2.1. Ovisnost brzine propagacije ultrazvučnih impulsa .....	4
2.2. Utjecaj kemijskog sastava i povećanja temperatura toplinske obrade na predviđanje tvrdoće.....	7
2.2.1. Eksperiment i zaključak .....	7
2.3. Utjecaj mikrostrukturnih faza čelika na brzinu ultrazvučnih valova .....	11
2.3.1. Utjecaj veličine zrna i orijentacije toplo valjanog čelika L80 .....	11
2.3.2. Izračun brzina L i T valova za anizotropne materijale .....	11
2.3.3. Eksperiment i rezultati. ....	12
2.4. Utjecaj veličine zrna na koeficijent prigušenja te mikrostrukturnih faza i udjela faza na brzinu i tvrdoću.....	15
2.5. Utvrđivanje tvrdoće mjerenjem brzine ultrazvuka zavarenih spojeva – anizotropija .....	19
3. MJERENJA .....	22
3.1. Tehnički zahtjevi za ultrazvučno mjerenje debljine .....	4
3.2. Mjerenje vremena proleta .....	24
3.3. Mjerenje debljine ispitnih uzoraka.....	28
3.4. Određivanje kemijskog sastava etalonskih pločica tvrdoće - XRF.....	30
3.5. Obrada rezultata mjerenja .....	31
3.6. Obrada rezultata mjerenja na odabranom uzorku .....	32
3.6.1. Određivanje kemijskog sastava - XRF .....	36
3.6.2. Mjerenje tvrdoće po Vickersu.....	37
3.6.3. Zaključak.....	38
4. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA.....	40

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Tehnika odjeka .....	3
Slika 2.	Krivulja tvrdoće [1] .....	4
Slika 3.	Brzina longitudinalnih valova ( $v_L$ ) [1].....	5
Slika 4.	Brzina transverzalnih valova ( $v_T$ ) [1] .....	5
Slika 5.	Koeficijent prigušenja longitudinalnih valova ( $\alpha_L$ ) [1].....	6
Slika 6.	Koeficijent prigušenja transverzalnih valova ( $\alpha_T$ ) [1].....	6
Slika 7.	Prikaz brzine L valova na različitim uzorcima, toplinski obrađivanim pri različitim temperaturama [2] .....	7
Slika 8.	Prikaz brzine T valova na različitim uzorcima, toplinski obrađivanim pri različitim temperaturama [2] .....	8
Slika 9.	Korelacija tvrdoće i izračunate brzine L valova [2] .....	8
Slika 10.	Korelacija tvrdoće i izračunate brzine T valova [2] .....	9
Slika 11.	Tvrdoća predviđena na temelju poznavanja sadržaja 14 kemijskih elemenata, toplinske obrade uzorka i brzine a) transverzalnih valova, b) longitudinalnih valova [2].....	9
Slika 12.	Tvrdoća predviđena na temelju poznavanja toplinske obrade uzorka, brzine i a) sadržaja nikla, b) sadržaja kroma [2] .....	10
Slika 13.	Ovisnost $v_L$ za L80-HT o tvrdoći [3].....	13
Slika 14.	Ovisnost $v_T$ za L80-HT o tvrdoći [3].....	13
Slika 15.	$v_L$ za L80-HT (martenzit) i vrijednosti iz literature [3] .....	14
Slika 16.	$v_T$ za L80-HT+4130+5160 (martenzit) i vrijednosti iz literature [3].....	14
Slika 17.	Promjena veličine zrna i koeficijenta prigušenja pri različitim toplinskim obradama [4].....	15
Slika 18.	Pseudobinarni dijagram 70% Fe-Cr-Ni [4] .....	16
Slika 19.	Tvrdoća i brzina L valova u ovisnosti o toplinskoj obradi [4] .....	16
Slika 20.	Tvrdoća i brzina T valova u ovisnosti o toplinskoj obradi [4] .....	17
Slika 21.	Brzina L i T valova za pojedine mikrostrukturne faze [5] .....	17
Slika 22.	Ovisnost tvrdoće o brzini L i T valova [5] .....	18
Slika 23.	Ovisnost brzina L i T valova o veličini zrna [5].....	18
Slika 24.	Usporedba izmjerene i predviđene tvrdoće na izotropnom uzorku [6] .....	19
Slika 25.	Utjecaj udjela karbida na promjenu tvrdoće i promjenu brzine ultrazvučnih valova [6].....	20
Slika 26.	Raspodjela UT tvrdoće (lijevo) i tvrdoće prema Rockwellu (desno) udaljavanjem od središta zavara [6] .....	21
Slika 27.	Etalonske pločice tvrdoće.....	23
Slika 28.	Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 3 [8] .....	23
Slika 29.	Sonda G5KB.....	24
Slika 30.	Mjerna mjesta .....	25
Slika 31.	Mjesta mjerenja na etalonskoj pločici tvrdoće 680HV (jednaka kao i na ostalim etalonskim pločicama tvrdoće).....	25
Slika 32.	Ultrazvučni sustav .....	26
Slika 33.	Mjerenje debljine etalonske pločice tvrdoće digitalnim vanjskim mikrometrom MV 28-454 .....	28
Slika 34.	XRF uređaj Olympus model DS 2000-C .....	30
Slika 35.	Eksperimentalni postav za mjerenja vremena proleta .....	31

---

Slika 36.	Promjena brzine ultrazvuka s promjenom tvrdoće.....	35
Slika 37.	Tvrdomjer 5030TKV tvrtke INENTEC .....	37
Slika 38.	Skica penetratora i otiska kod Vickersove metode .....	38



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Elastične konstante za čelik 1050.....	11
Tablica 2. Izračunate brzine za ferit, perlit i martenzit .....	12
Tablica 3. Brzina, tvrdoća i mikrostruktura L80-HT čelika.....	12
Tablica 4. Parametri sonde .....	24
Tablica 5. Rezultati mjerenja vremena proleta (TOF) za etalonsku pločicu tvrdoće HV 198 .....	26
Tablica 6. Rezultati mjerenja vremena proleta (TOF) za etalonsku pločicu tvrdoće HV 487 .....	27
Tablica 7. Rezultati mjerenja vremena proleta (TOF) za etalonsku pločicu tvrdoće HV 680 .....	27
Tablica 8. Rezultati mjerenja debljine etalonskih pločica tvrdoće.....	29
Tablica 9. Rezultati mjerenja debljine čeličnog uzorka .....	29
Tablica 10. Kemijski sastav etalonskih pločica tvrdoće.....	30
Tablica 11. Brzina ultrazvučnih impulsa u etalonskoj pločici tvrdoće HV 198 .....	32
Tablica 12. Brzina ultrazvučnih impulsa u etalonskoj pločici tvrdoće HV 487.....	33
Tablica 13. Brzina ultrazvučnih impulsa u etalonskoj pločici tvrdoće HV 680. ....	34
Tablica 14. Srednje vrijednosti brzina ultrazvučnih valova u etalonskim pločicama tvrdoće .....	35
Tablica 15. Rezultati mjerenja osciloskopom na odabranom uzorku i izračun brzine ultrazvuka .....	36
Tablica 16. Kemijski sastav odabranog uzorka.....	36

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A$	$\text{mm}^2$	Površina šuplje piramide otisnute u materijalu
$\alpha_L$	dB/m	Koeficijent prigušenja longitudinalnih valova
$\alpha_T$	dB/m	Koeficijent prigušenja transverzalnih valova
$D$	mm	Promjer sonde
$d$	mm	Debljina mjerene komponente
$d_1, d_2$	mm	Dijagonale otiska
$E$	$\text{N/mm}^2$	Youngov modul elastičnosti
$F$	N	Sila opterećivanja
$f$	Hz	Frekvencija
$n$	-	Broj prolaza ultrazvučnog impulsa kroz mjerenu komponentu
$s$	m	Duljina puta
$v$	m/s	Brzina širenja vala
$v_L$	m/s	Brzina longitudinalnog vala
$v_T$	m/s	Brzina transverzalnog vala
$t_{TOF}$	s	Vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa
$\lambda$	m	Valna duljina
$\nu$	-	Poissonov koeficijent
$\theta$	°C	Temperatura

## **SAŽETAK**

Između ostaloga, nerazorne metode ispitivanja mogu se koristiti i u svrhu karakterizacije materijala i procjene mehaničkih svojstava. U ovom radu naglasak je stavljen na istraživanje mogućnosti određivanje tvrdoće pomoću brzine ultrazvučnih impulsa. U uvodnom pregledu prikazana su dosadašnja istraživanja, analize i rezultati u tom području, na temelju kojih su određeni parametri i osmišljeno ispitivanje na etalonskim pločicama tvrdoće i odabranom uzorku u eksperimentalnom dijelu rada. Dobiveni odnosi brzine ultrazvučnih impulsa i tvrdoće u eksperimentalnom dijelu podudaraju se s rezultatima proučenih istraživanja i mjerenja, uzimajući u obzir određene utjecaje u određenom kontekstu, koji utječu na provođenje ispitivanja kao i dobivene rezultate.

Ključne riječi: nerazorna metoda ispitivanja, ultrazvučno ispitivanje, brzina propagacije ultrazvučnih impulsa, tvrdoća, etalonske pločice tvrdoće

## **SUMMARY**

Among other things, non-destructive methods can be used to characterize materials and assess mechanical properties. In this paper accent has been placed on the probability determination of hardness by ultrasonic pulse rate. In an introductory review are presented the research, analysis and results in the field so far, based on which are determined parameters and designed test on hardness blocks and selected sample in experimental part of the paper. The obtained ratio of ultrasound pulses and hardness in the experimental part is consistent with the results of the studied research, taking into account certain influences in a particular context that affect the performance of the test as well as the results obtained.

Key words: non-destructive testing, ultrasonic testing, ultrasonic velocity, hardness, hardness blocks

## 1. UVOD

Mehanička svojstva materijala najčešće se određuju razornim metodama, međutim, zbog potrebe za izrezivanjem ispitnih uzoraka, epruveta, ili nagrđivanjem površine, koriste se i nerazorne metode, pogodne i za karakterizaciju materijala. Tvrdoća je otpor materijala prema plastičnoj deformaciji [6], dok je brzina propagacije ultrazvučnih impulsa povezana s elastičnim svojstvima materijala. Brojna elastična svojstva materijala, poput Youngovog modula elastičnosti  $E$ , modula smičnosti  $G$  i Poissonovog koeficijenta  $\nu$ , mogu se procijeniti i izračunati mjerenjem brzine ultrazvučnih impulsa koristeći longitudinalne i/ili transverzalne valove. Međutim, čvrstoća i tvrdoća se ne mogu izravno odrediti iz parametara dobivenih ultrazvučnim ispitivanjem, jer također ovise i o kemijskom sastavu, mikrostrukturi materijala (poput veličine zrna, orijentaciji i slično) te toplinskoj obradi. Neizravna procjena vrijednosti tvrdoće temeljem ultrazvučnih mjerenja zasnovana je na teorijskim i empirijskim vezama. Mogućnost korištenja ultrazvučne metode u svrhu karakterizacije materijala, a time i određivanja tvrdoće, proizlazi iz pripadajuće karakteristične brzine propagacije ultrazvučnih impulsa u određenom materijalu izotropne mikrostrukture.

### 1.1. Ispitivanje ultrazvukom

Ispitivanje ultrazvukom (UT) zasniva se na svojstvu širenja ultrazvučnog impulsa kroz homogene materijale i reflektiranja od granice materijala različitih akustičnih impedancija, odnosno od nepravilnosti u materijalu. Korištenjem ultrazvučnih uređaja i ultrazvučnih sondi, najčešće na osnovi piezoelektričnog efekta, u ispitni materijal se odašilju ultrazvučni impulsi te primaju odzivi ultrazvučnih impulsa iz materijala uzorka koji se ispituje.

Kod ispitivanja materijala najčešće se koriste frekvencije ultrazvučnih impulsa od 0,5 MHz do 10 MHz. Iako postoje različite tehnike ultrazvučnog ispitivanja, obično se u praksi koristi tehnika odjeka (*pulse-echo*), pri čemu se koriste ravne ili kutne sonde. Budući da je u eksperimentalnom dijelu ovog rada korištena tehnika odjeka, njen princip rada pri detekciji nepravilnosti objašnjen je u potpoglavlju 1.2., dok je u poglavlju 3 opisan princip mjerenja vremena proleta (TOF) u svrhu određivanja brzine.

Dvije najčešće korištene vrste valova u ultrazvučnom ispitivanju su longitudinalni i transverzalni valovi. Kod longitudinalnog vala čestice titraju u smjeru širenja vala, a kod transverznog u smjeru okomitom na smjer širenja vala. Osnovni parametri koji su određeni vrstom vala i njegovim širenjem kroz materijale su frekvencija, valna duljina i brzina širenja vala, koji su povezani jednadžbom:

$$v = \lambda \cdot f \quad (1)$$

gdje je:

$v$  - brzina širenja vala, m/s,

$\lambda$  - valna duljina, m,

$f$  - frekvencija vala, Hz.

Brzina širenja vala ( $v$ ) konstantna je i različita za svaki materijal, tako da se promjenom frekvencije mijenja valna duljina.

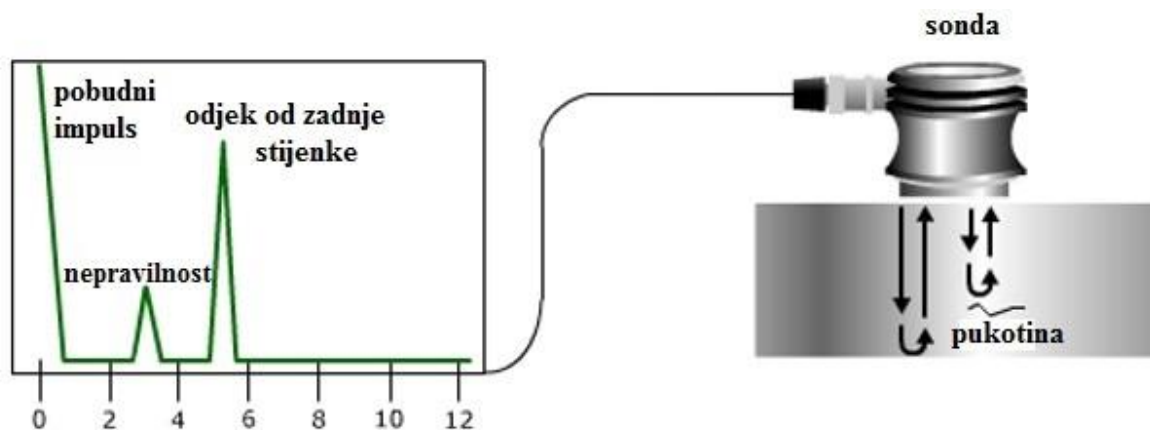
## 1.2. Princip rada – tehnika odjeka

Postupak ispitivanja ultrazvukom provodi se pobuđivanjem ultrazvučnih impulsa u ispitnom materijalu. Slijedom pojave da na granici dva materijala različitih akustičkih impedancija dolazi do refleksije ultrazvučnog impulsa, postavke u tehnici odjeka su takve da sonda, koja odašilje impulse, također i prima reflektirane impulse iz uzorka odgovarajuće geometrije

Postupak ispitivanja ultrazvukom - općenito:

1. Od izvora ultrazvuka šire se ultrazvučni valovi frekvencije 0,5 MHz – 10 MHz kroz materijal koji se ispituje.
2. Ultrazvučni valovi propagiraju kroz materijal te se nailaskom na granice materijala različitih akustičkih svojstava (nepravilnosti) reflektiraju nazad u sondu. Ako na njihovom putu nema nepravilnosti, prodiru dublje te se reflektiraju od zadnje stijenke.

3. Reflektirani valovi (energija) se prikazuju u odnosu na vrijeme proleta (A-prikaz) te se može odrediti udaljenost na kojoj se u materijalu reflektira val.



Slika 1. Tehnika odjeka

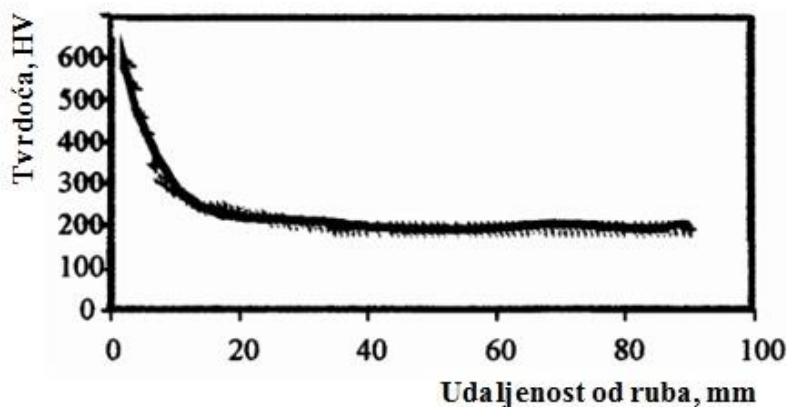
## 2. ISTRAŽIVANJA KORELACIJE BRZINE PROPAGACIJE ULTRAZVUČNIH IMPULSA I TVRDOĆE

U ovom poglavlju predstavljena su istraživanja korelacije brzine propagacije ultrazvučnih impulsa i tvrdoće metalnih materijala (čelika i legura). Prikazani su rezultati mjerenja brzine propagacije ultrazvučnih impulsa u ovisnosti o kemijskom sastavu materijala, mikrostrukтури (izotropni i anizotropni uzorci), usmjerenosti mikrostrukture, temperaturi i provedenoj toplinskoj obradi.

### 2.1. Ovisnost brzine propagacije ultrazvučnih impulsa

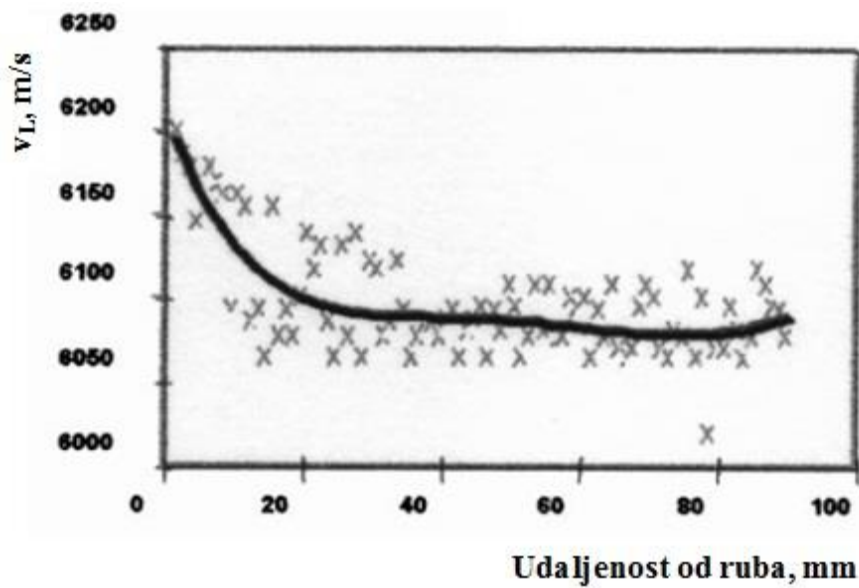
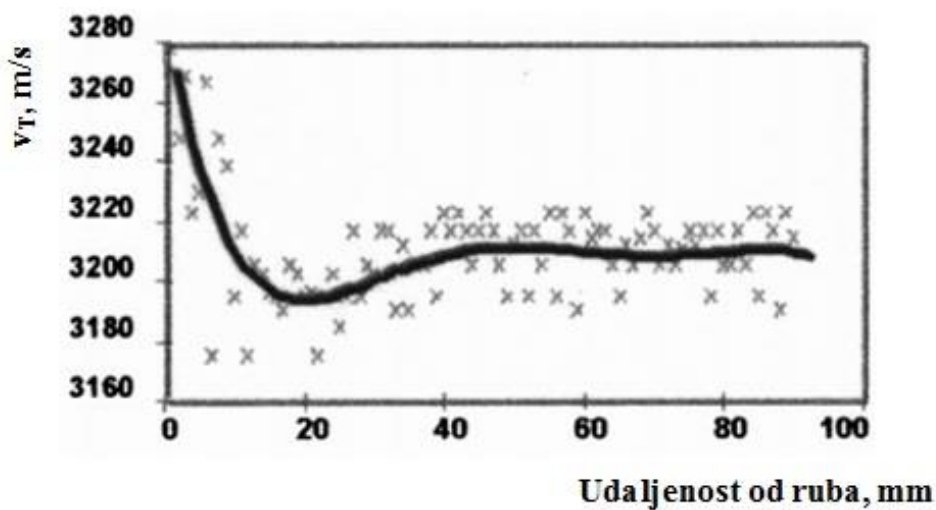
U članku [1] prikazana je ovisnost brzine propagacije ultrazvučnih impulsa, a posredno i tvrdoće, o temperaturi, mikrostrukтури i orijentiranosti karbida.

Tehnikom uranjanja mjerene su brzine i prigušenja longitudinalnih i transverzalnih valova toplinski obrađenog čelika XC38H2. Nakon zagrijavanja na temperaturu austenitizacije, uređajem sličnim Jominyjevom, vodom je hlađen jedan kraj uzorka. Na rubu uzorka dobivena je martenzitna mikrostruktura, koja je, udaljavanjem od hlađenog ruba, preko bainitne i bainitno-perlitne, postala perlitno-feritna, jednaka početnoj mikrostrukтури (utjecaj mikrostrukturnih faza detaljnije je objašnjen u poglavlju 2.3.). Mjerenja brzine ultrazvučnih impulsa longitudinalnim (L) i transverzalnim (T) valovima provedena su mjerenjem vremena proleta impulsa (TOF – „time of flight“). Mjerenjem tvrdoće prema Vickersu i brzine ultrazvučnih impulsa, longitudinalnim i transverzalnim valovima, uočene su sličnosti.

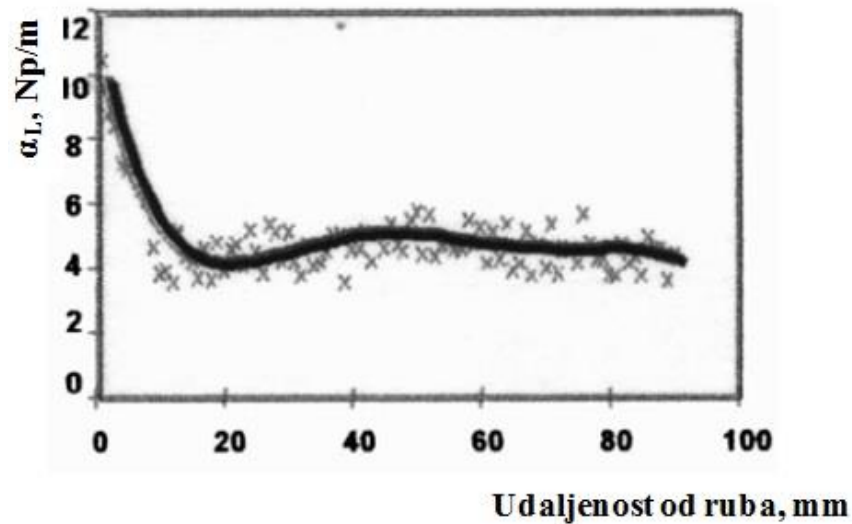


Slika 2. Krivulja tvrdoće [1]

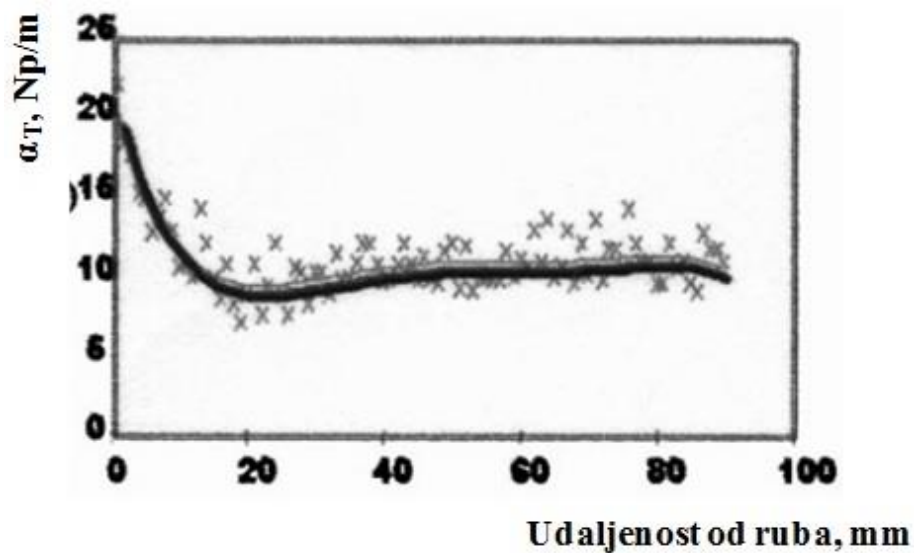


Slika 3. Brzina longitudinalnih valova ( $v_L$ ) [1]Slika 4. Brzina transverzalnih valova ( $v_T$ ) [1]

Heterogenost materijala unosi razlike u vrijednostima koeficijenta prigušenja L i T valova, jer su više osjetljivi na promjene u mikrostrukturi od brzine. Zbog različite orijentiranosti karbida unutar uzorka, različite su i dobivene vrijednosti koeficijenta prigušenja (slika 4 i slika 5).



Slika 5. Koeficijent prigušenja longitudinalnih valova ( $\alpha_L$ ) [1]



Slika 6. Koeficijent prigušenja transverzalnih valova ( $\alpha_T$ ) [1]

Autori navode da je na temelju dobivenih rezultata istraživanja moguće kvalitativno procijeniti tvrdoću materijala jednim od sljedeća četiri parametra:

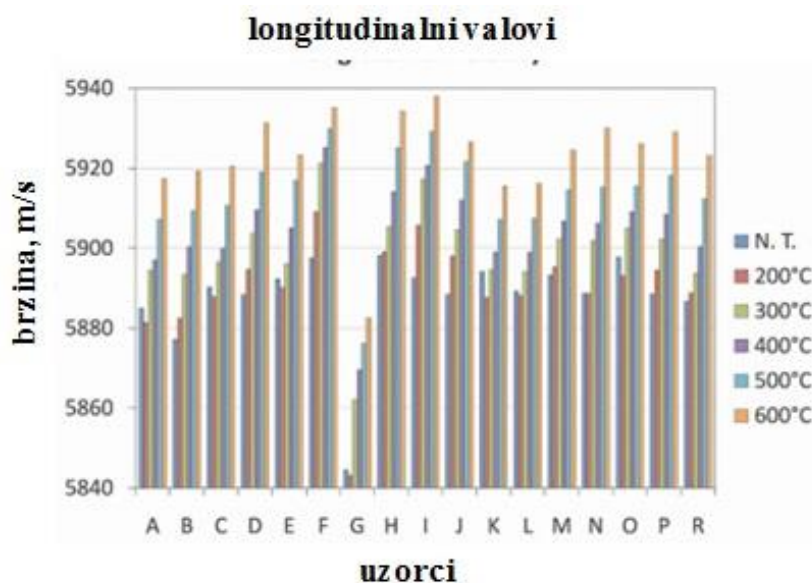
- brzinom longitudinalnih valova ( $v_L$ ),
- brzinom transverzalnih valova ( $v_T$ ),
- koeficijentom prigušenja longitudinalnih valova ( $\alpha_L$ ) ili
- koeficijentom prigušenja transverzalnih valova ( $\alpha_T$ ).

## 2.2. Utjecaj kemijskog sastava i povećanja temperature toplinske obrade na predviđanje tvrdoće

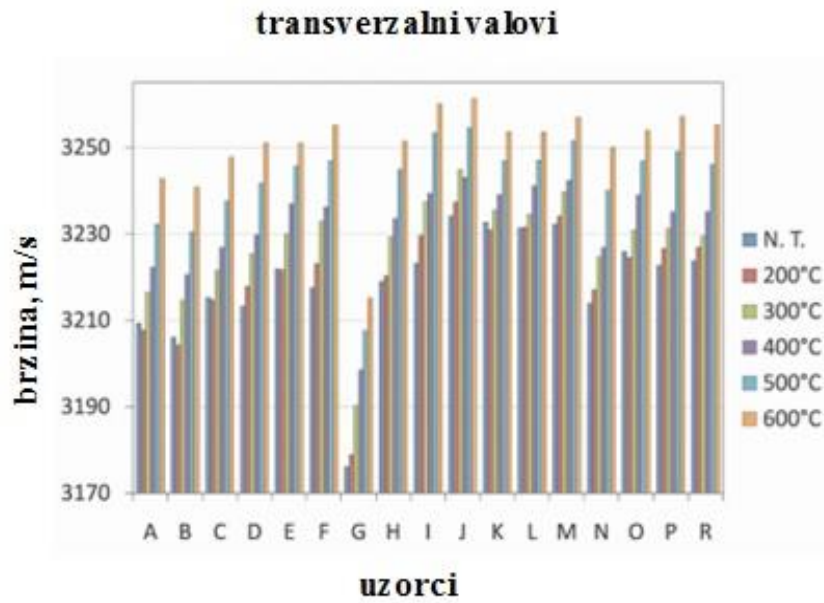
Provedeno i opisano istraživanje u članku [2], za razliku od dotada provedenih ispitivanja koja su bila usmjerena prema samo jednom materijalu, jer različiti materijali pokazuju različitu ovisnost tvrdoće o brzini propagacije ultrazvučnih valova, istražuje mogućnost predviđanja tvrdoće sličnih materijala, u ovom slučaju martenzitnih čelika, poznavajući kemijski sastav (u različitim kombinacijama) i brzinu propagacije ultrazvučnih impulsa.

### 2.2.1. Eksperiment i zaključak

Tehnikom odjeka ispitano je 17 uzoraka pet različitih martenzitnih čelika nakon što su toplinski obrađivani pri različitim temperaturama. Za ispitivanje longitudinalnim valovima korištena je sonda frekvencije 3,5 MHz, a rezolucija mjerenja vremena je 0,1 ns. Raspon točnosti rezultata mjerenja brzine, u ovisnosti o debljini uzorka, bio je od 3,7 m/s do 9,7 m/s, dok je kod ispitivanja transversalnim valovima raspon točnosti bio od 1,6 m/s do 4,3 m/s, a rezolucija mjerenja vremena 0,01 ns.

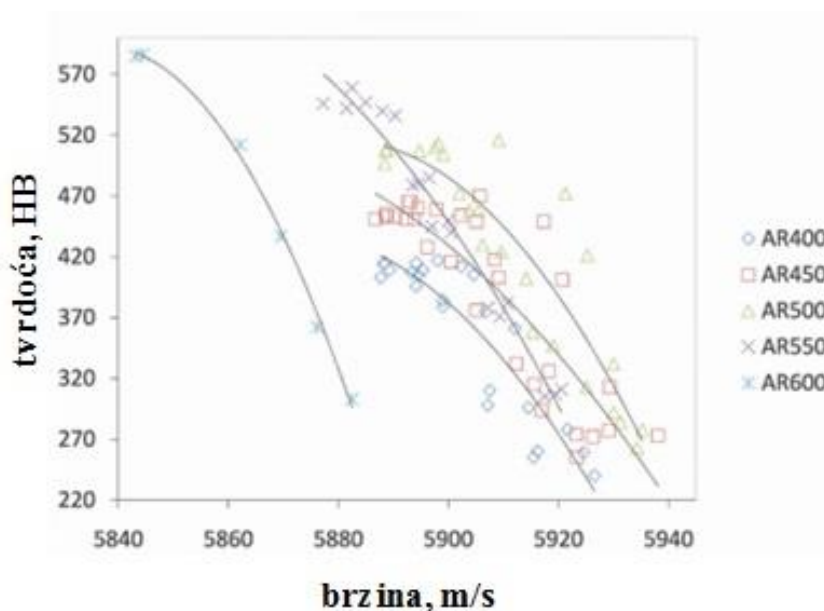


Slika 7. Prikaz brzine L valova na različitim uzorcima, toplinski obrađivanim pri različitim temperaturama [2]

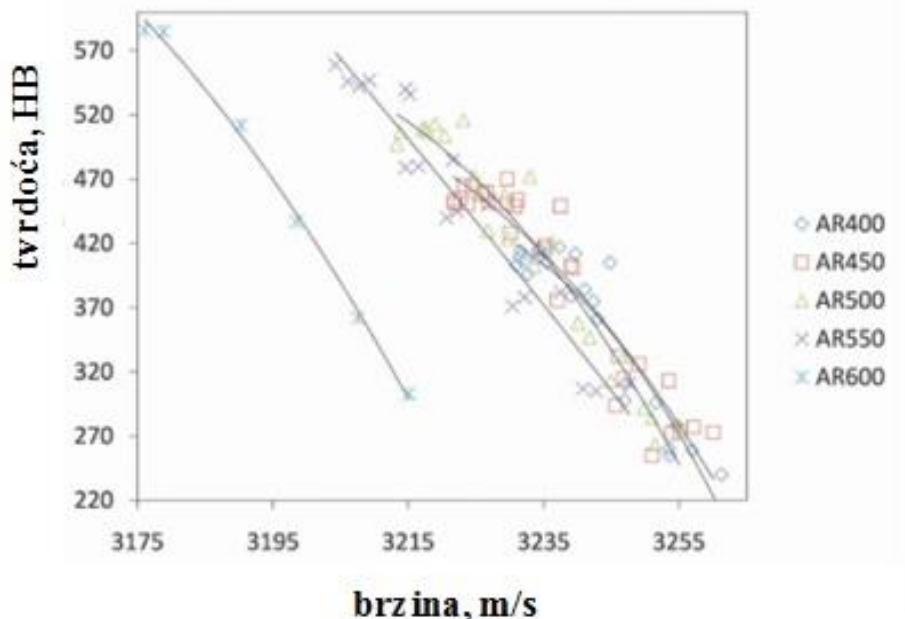


**Slika 8.** Prikaz brzine T valova na različitim uzorcima, toplinski obrađivanim pri različitim temperaturama [2]

Brzina ultrazvučnog impulsa pokazuje nelinearnu ovisnost o tvrdoći te je aproksimirana parabolom. Povećanjem tvrdoće uočeno je smanjenje vrijednosti brzine ultrazvuka.



**Slika 9.** Korelacija tvrdoće i izračunate brzine L valova [2] (AR400, AR450, AR500, AR550 i AR600 su vrste čelika)

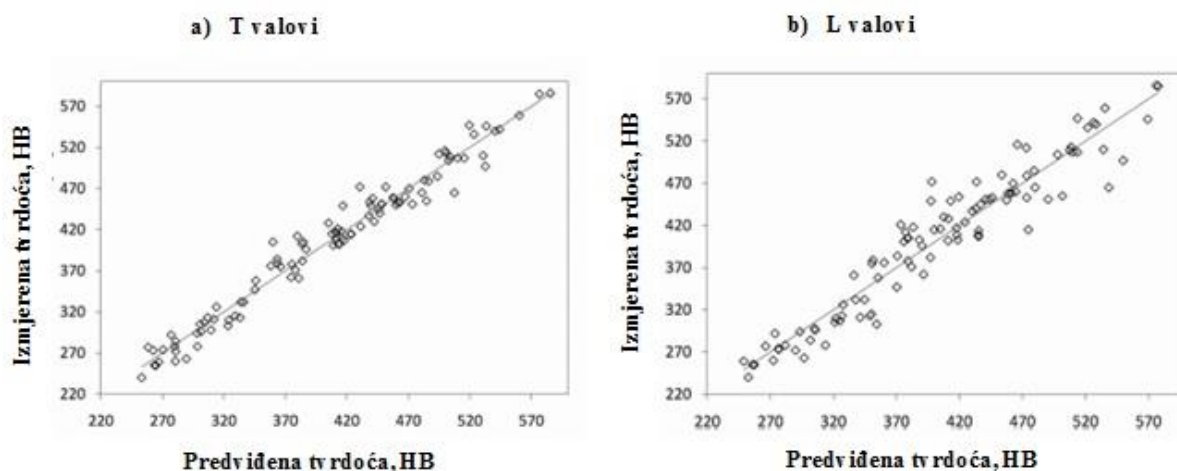


Slika 10. Korelacija tvrdoće i izračunate brzine T valova [2]

Zaključeno je da kemijski sastav i toplinska obrada imaju ključni utjecaj na tvrdoću i trebali bi se uzeti u obzir prilikom određivanja tvrdoće na temelju brzine ultrazvučnih valova.

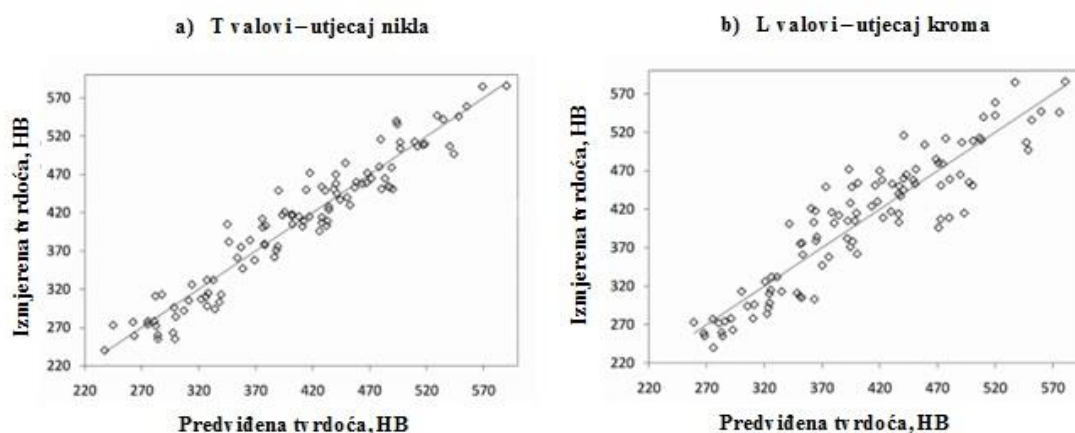
Za izračunavanje predviđene tvrdoće potrebno je poznavati:

- 14 kemijskih elemenata, toplinsku obradu uzorka i brzinu ultrazvuka,



Slika 11. Tvrdoća predviđena na temelju poznavanja sadržaja 14 kemijskih elemenata, toplinske obrade uzorka i brzine a) transversalnih valova, b) longitudinalnih valova [2]

- sadržaj nikla (Ni), toplinsku obradu i brzinu ultrazvuka dobivenu mjerenjem transverzalnim valovima,
- sadržaj nikla (Ni) i brzinu ultrazvuka dobivenu mjerenjem transverzalnim valovima,
- sadržaj kroma (Cr), toplinsku obradu i brzinu ultrazvuka dobivenu mjerenjem longitudinalnim valovima ili



Slika 12. Tvrdoća predviđena na temelju poznavanja toplinske obrade uzorka, brzine i a) sadržaja nikla, b) sadržaja kroma [2]

- sadržaje 5 legirnih elemenata (nikal (Ni), krom (Cr), silicij (Si), molibden (Mb) i mangan (Mn)).

Dakle, za procjenu tvrdoće temeljem brzine longitudinalnih valova nužno je poznavanje toplinske obrade uzorka, dok kod transverzalnih nije. Problem nepoznavanja toplinske obrade uzorka riješen je poznavanjem sadržaja 5 gore navedenih kemijskih elemenata.

Za uspješno provođenje ovakvog ispitivanja, na temelju kemijskog sastava i toplinske obrade, nužno je precizno mjerenje debljine uzorka, kao što je u istraživanju i napravljeno.

### 2.3. Utjecaj mikrostrukturnih faza čelika na brzinu ultrazvučnih valova

Mikrostrukturne faze imaju različite elastične konstante, poput  $E$  i  $\nu$  (Tablica 1). Kako je brzina propagacije ultrazvučnih valova ovisna o elastičnim svojstvima materijala i posredno se izračunava na temelju njihovih vrijednosti, direktno proizlazi da će brzina propagacije ultrazvučnih valova biti drugačija za različite faze.

**Tablica 1. Elastične konstante za čelik 1050**

Faza	$E$ , GPa	$\nu$
Ferit	211,9	0,289
Perlit	210,3	0,288
Martenzit	203,5	0,292

Na primjerima tri toplinski obrađena čelika [3], L80 (niskolegirani toplo valjani čelik, koristi se za cijevi u naftnoj industriji), 4130 i 5160, prikazana je usporedba podataka iz literature s rezultatima dobivenim formulama za izotropne i anizotropne materijale koristeći vrijednosti brzina ultrazvučnih valova.

#### 2.3.1. Utjecaj veličine zrna i orijentacije toplo valjanog čelika L80

Veličina zrna utječe na vrijednost izmjerene brzine u polikristalnim materijalima [6].

#### 2.3.2. Izračun brzina $L$ i $T$ valova za anizotropne materijale

Za izračun brzine ultrazvučnih valova u anizotropnim materijalima vrijednosti elastičnih svojstava nisu reprezentativne. Pri proračunu u obzir se uzimaju dva moda transverzalnih valova ( $v_{T1}$  i  $v_{T2}$ ), zbog različitih svojstava u  $x$  i  $y$  smjeru koordinatnog sustava, dok kod izotropnih materijala nema razlika u svojstvima u  $x$  i  $y$  smjeru.

**Tablica 2. Izračunate brzine za ferit, perlit i martenzit**

	Ferit, m/s	Perlit, m/s	Martenzit, m/s
Izotropni materijali			
$v_L$	5939	5915	5896
$v_T$	3235	3228	3196
Anizotropni materijali – prosječna vrijednost			
$v_L$ - prosječno	6161	5914	5906
$v_{T1}$ - prosječno	2823	3233	3196
$v_{T2}$ - prosječno	3605	3236	3200

$v_{T1}$  – brzina T vala u smjeru valjanja L80-HT čelične trake („Heat Treated L80“),

$v_{T2}$  – brzina T vala u smjeru okomitom na smjer valjanja čelične trake

### 2.3.3. Eksperiment i rezultati

Uzorci čelika L80, 4130 i 5160 austenitizirani su na temperaturi iznad 850°C i hlađeni četirima vrstama hlađenja do sobne temperature. Tehnikom odjeka ispitane su brzine L i T valova u uzorcima podvrgnutim hlađenjem vodom, hlađenjem u ulju temperature 200°C, hlađenjem na zraku i hlađenjem u peći. Različitim načinom hlađenja dobivene su različite mikrostrukturne faze.

Slijede dobiveni rezultati za L80-HT:

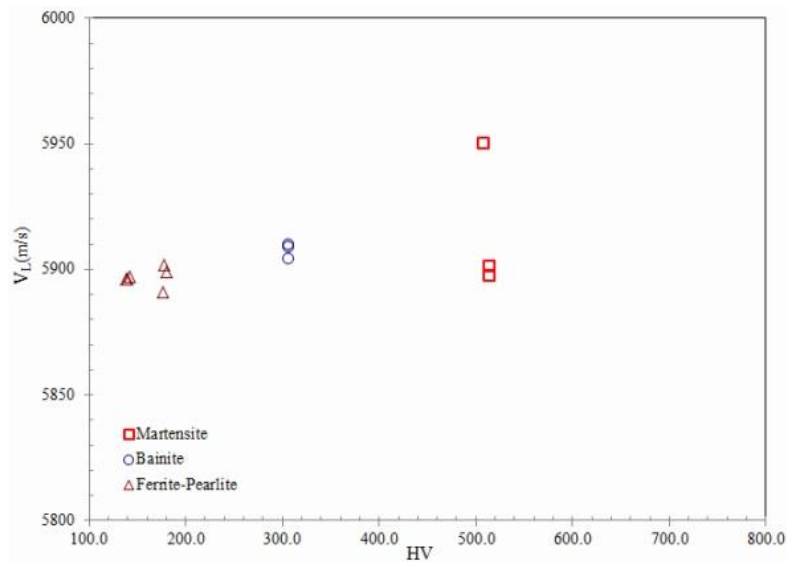
**Tablica 3. Brzina, tvrdoća i mikrostruktura L80-HT čelika**

Uzorci	$v_L$ , m/s	$v_{T1}$ , m/s	$v_{T2}$ , m/s	Tvrdoća, HV	Mikrostruktura
Hlađenje vodom	5916	3215	3215	513	M
Hlađenje u ulju (200°C)	5908	3235	3249	306	B
Hlađenje na zraku	5897	3261	3276	178	F + P
Hlađenje u peći	5896	3254	3266	140	F + P

M – martenzit, B – bainit, P – perlit, F – ferit

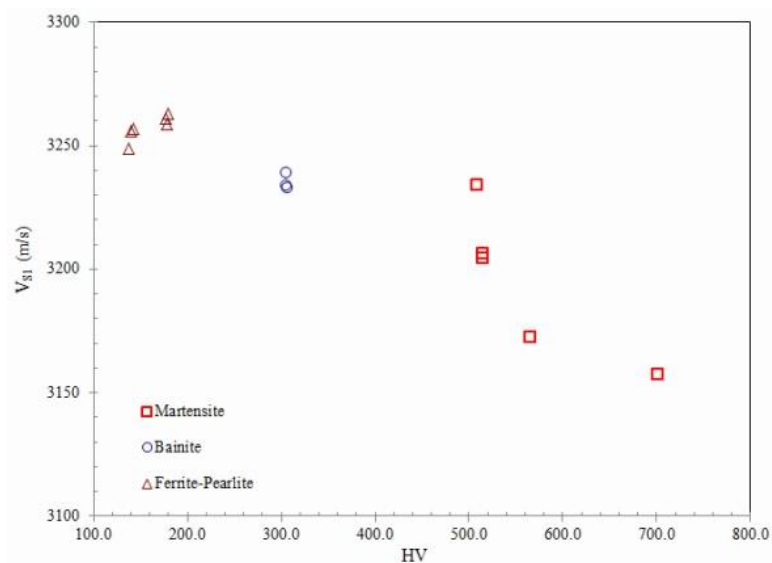


Iz ovih rezultata slijedi kako vrijednosti  $v_{T2}$  (kao i  $v_{T1}$ ) opadaju s povećanjem tvrdoće i povećanjem udjela karbida, dok je  $v_L$  manje osjetljiva na promjenu tvrdoće i kod martenzitne strukture neovisna o udjelu karbida. U istraživanju je zaključeno [3] da je brzina transverzalnih valova je bolji indikator za određivanje mikrostrukture kod ovog čelika.



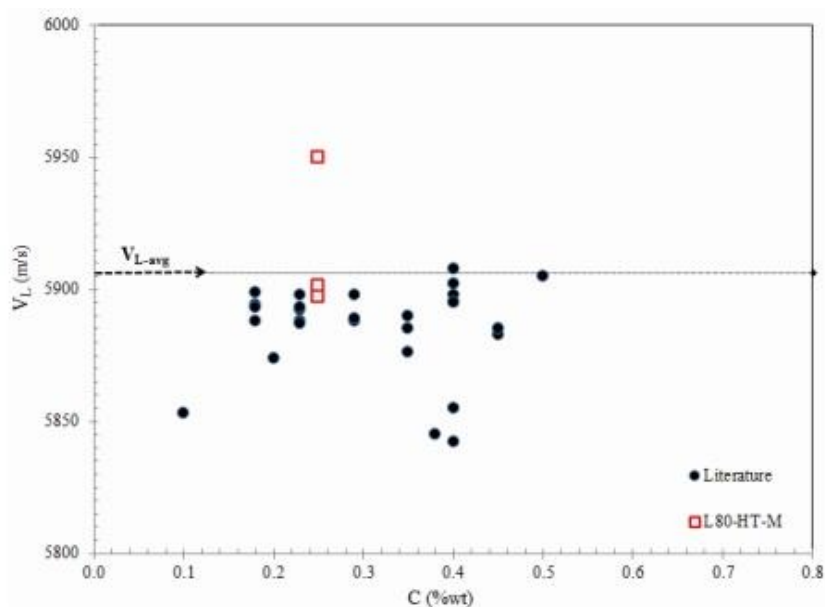
Slika 13. Ovisnost  $v_L$  za L80-HT o tvrdoći [3]

Uočeno je da brzina transverzalnog vala u bainitnoj fazi leži između vrijednosti brzina martenzitne i feritno-perlitne mikrostrukture, što je u suglasju s tvrdoćom bainita, koja je između tvrdoća tih dviju mikrostrukturnih faza.

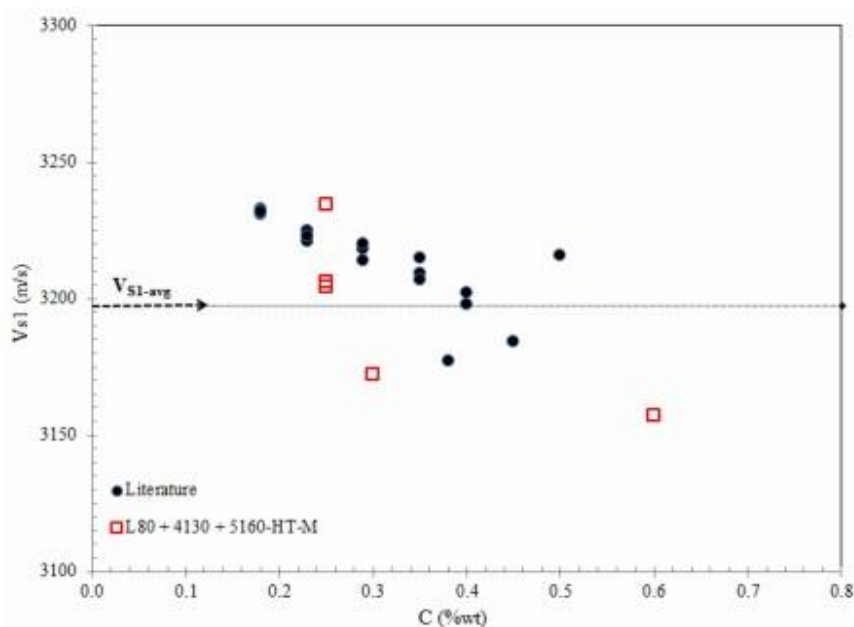


Slika 14. Ovisnost  $v_T$  za L80-HT o tvrdoći [3]

Dokazana je i poveznica između podataka iz literature i izmjerenih vrijednosti brzine.



Slika 15.  $v_L$  za L80-HT (martenzit) i vrijednosti iz literature [3]



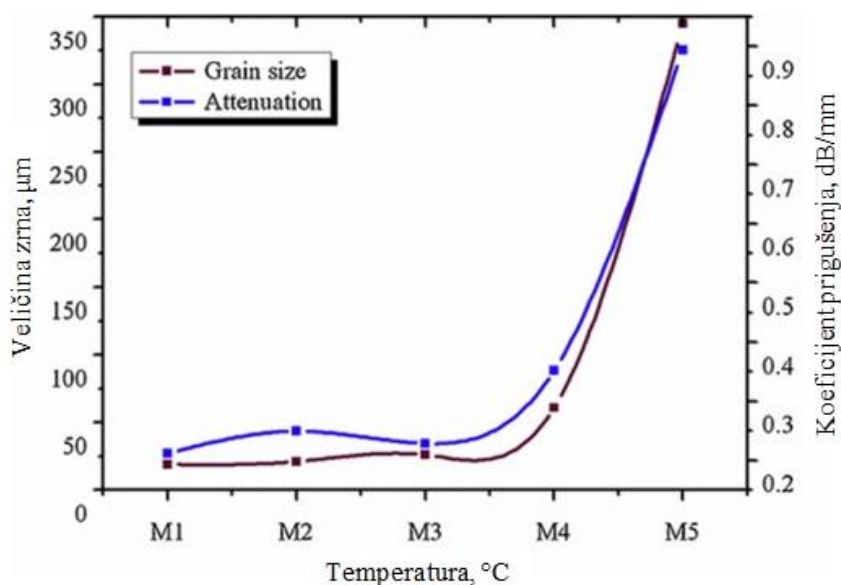
Slika 16.  $v_T$  za L80-HT+4130+5160 (martenzit) i vrijednosti iz literature [3]

## 2.4. Utjecaj veličine zrna na koeficijent prigušenja te mikrostrukturnih faza i udjela faza na brzinu i tvrdoću

Dok veličina zrna i udio ferita značajno utječu na brzinu ultrazvuka i tvrdoću, prigušenje ultrazvuka ovisno je samo o veličini zrna [4]. Veće zrno više prigušuje ultrazvučne impulse (slika 17).

Akustički parametar koji izražava iznos prigušenja ultrazvuka po jedinici prijednog puta i ovisi o svojstvima materijala, valnoj duljini i vrsti vala je koeficijent prigušenja i izražava se u dB/m.

Članak [4] prikazuje utjecaj različitih mikrostrukturnih faza, a time i veličina zrna, kao posljedica toplinske obrade SAF 2205 duplex nehrđajućeg čelika na brzinu ultrazvučnih impulsa. Mjerenja brzine ultrazvučnih valova provedena su sondom frekvencije 5 MHz tehnikom odjeka. Fokusirajući svoje istraživanje na ovisnost koeficijenta prigušenja o veličini zrna, napravljen je slijedeći grafički prikaz:

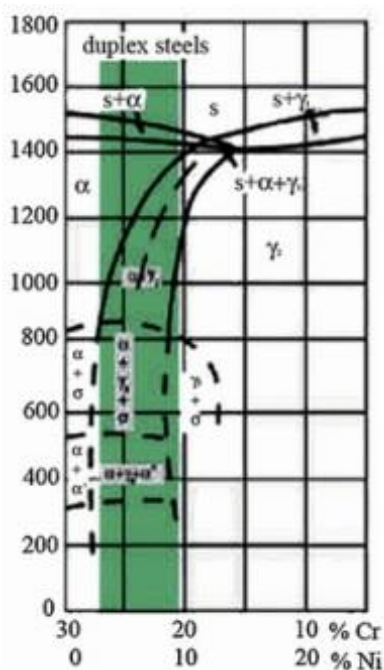


Slika 17. Promjena veličine zrna i koeficijenta prigušenja pri različitim toplinskim obradama [4]

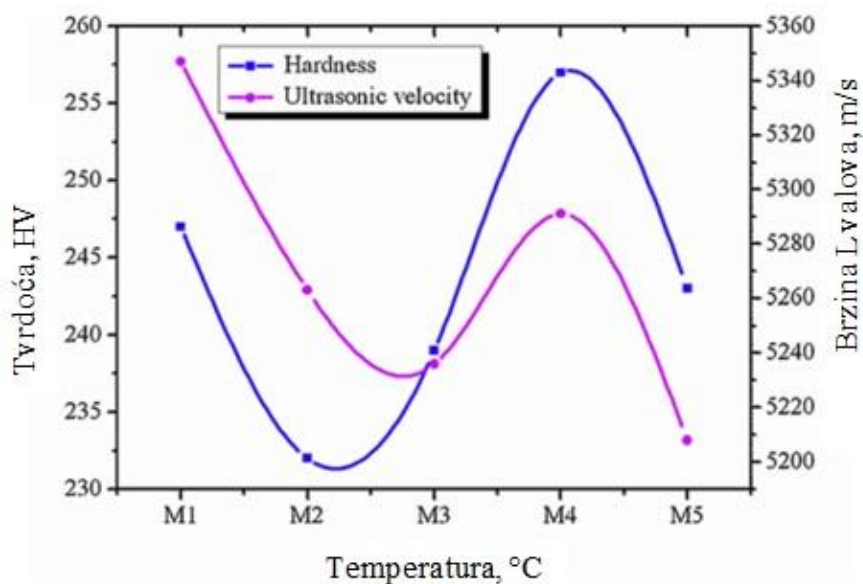
(M1 – bez toplinske obrade, M2 - 1100°C/30min/gašenje u vodi, M3 - 1200°C/30min/gašenje u vodi, M4 - 1300°C/30min/gašenje u vodi, M5 - 1350°C/30min/gašenje u vodi)

Iz pseudobinarnog dijagrama 70% Fe-Cr-Ni (slika 18) vidljivo je objašnjenje razlike longitudinalne i transverzalne brzine pri pojedinim temperaturama zbog različitih mikrostrukturnih faza i veličina zrna. Zbog približno istog udjela ferita i austenita pri

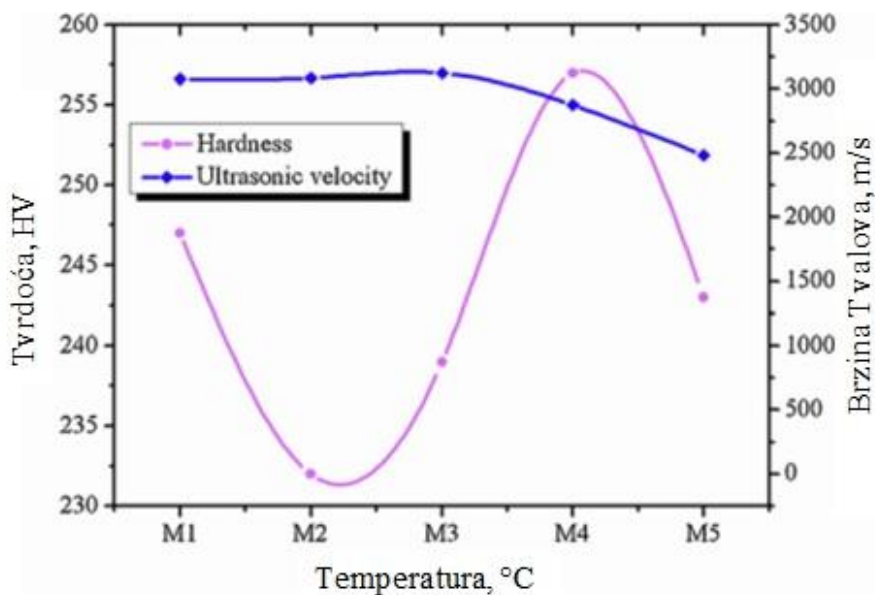
temperaturama od 1100°C i 1200°C, veličina zrna je približno ista, stoga je u dvofaznom području koeficijent prigušenja približno konstantan. Povećanjem temperature (1300°C) uz povećanje veličine zrne (pri 1350°C), veći je udio ferita (tvrde faze). Povećanjem temperature iznad linije solidusa (jednofazno područje) i najmanja promjena temperature utječe na stvaranje krupnog zrna.



Slika 18. Pseudobinarni dijagram 70% Fe-Cr-Ni [4]

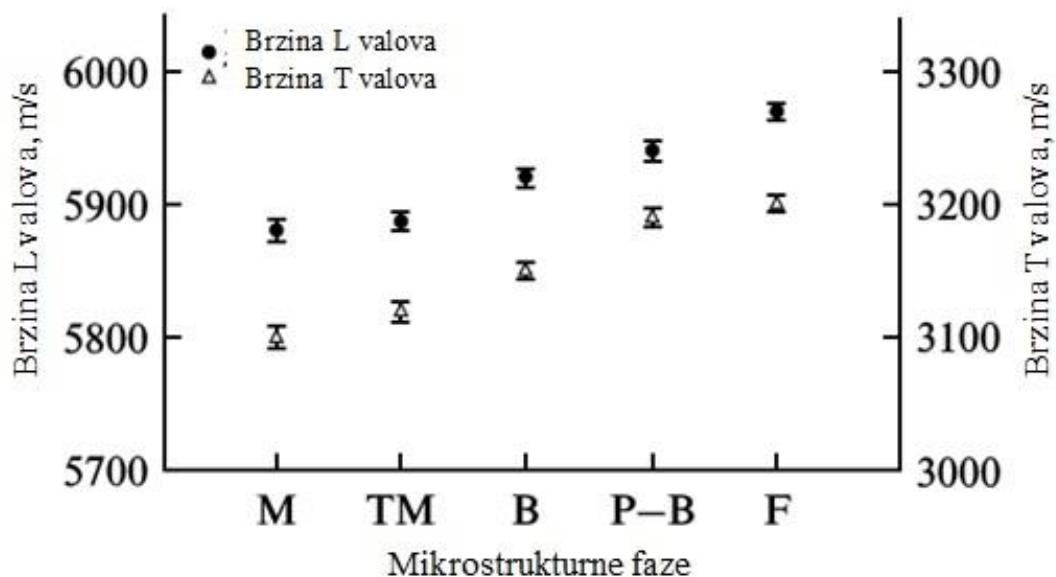


Slika 19. Tvrdća i brzina L valova u ovisnosti o toplinskoj obradi [4]

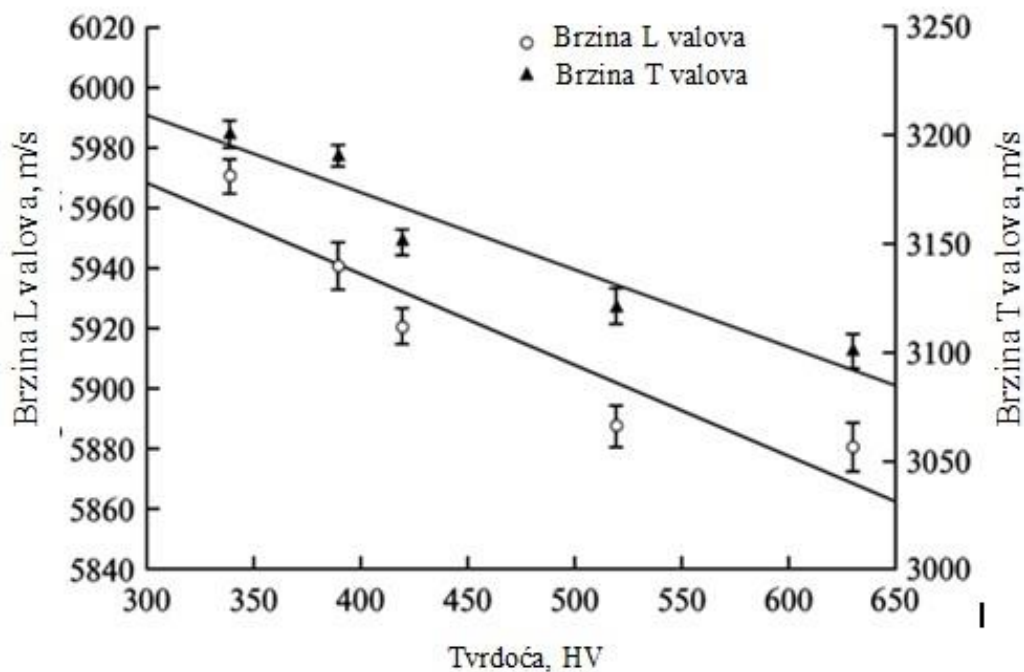


Slika 20. Tvrdoća i brzina T valova u ovisnosti o toplinskoj obradi [4]

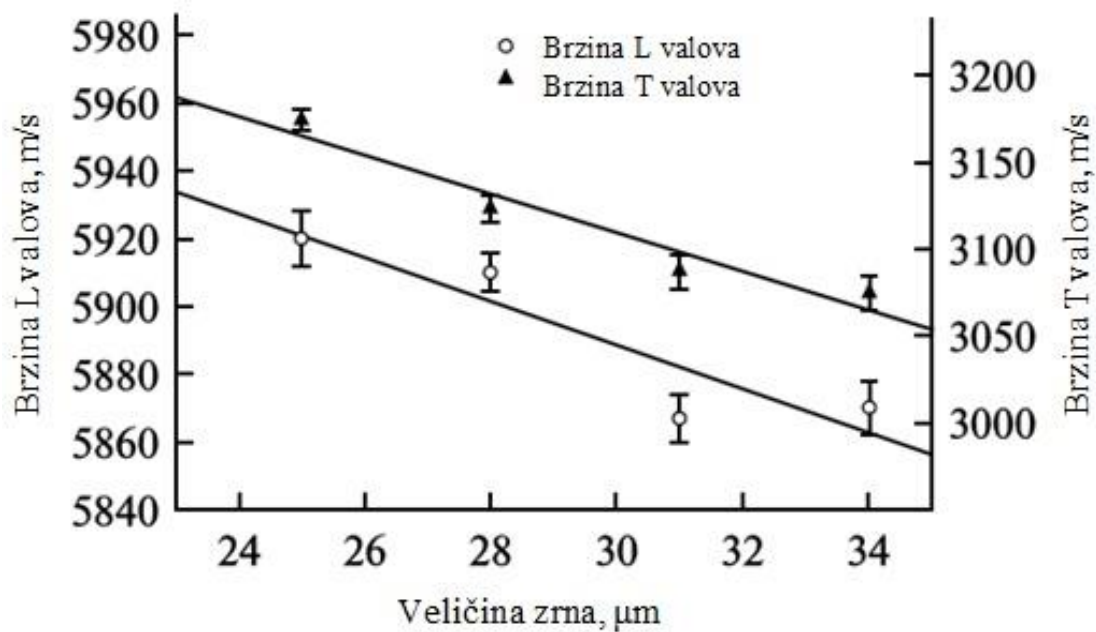
Ispitivanjem alatnog čelika H13 [5] došlo se do sličnih zaključaka, ali ovoga puta u ovisnosti o mikrostrukturnim fazama, a ne udjelom pojedine faze.



Slika 21. Brzina L i T valova za pojedine mikrostrukturne faze [5]



Slika 22. Ovisnost tvrdoće o brzini L i T valova [5]



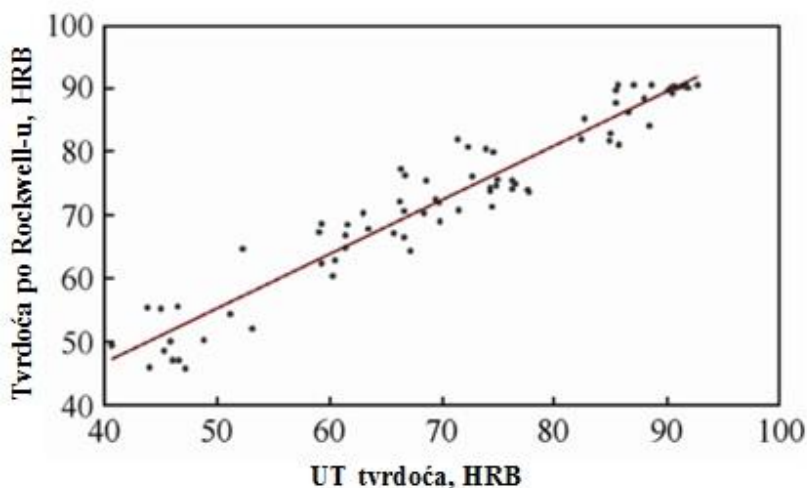
Slika 23. Ovisnost brzina L i T valova o veličini zrna [5]

## 2.5. Utvrđivanje tvrdoće mjerenjem brzine ultrazvuka zavarenih spojeva – anizotropija

Članak [6] prikazuje istraživanje tvrdoće dobivene ultrazvučnim ispitivanjem zavarenih spojeva i usporedbu s konvencionalnom, Rockwellovom metodom, u ovisnosti o sadržaju karbida i anizotropiji uzrokovanom zavarivanjem u području zavora.

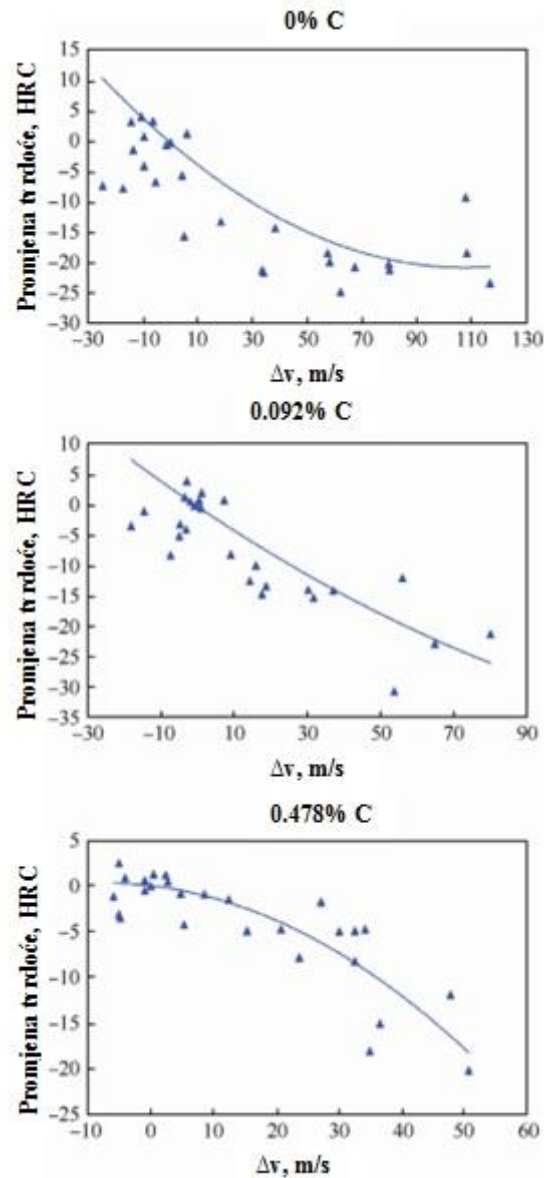
Zavarivanju su podvrgnuti uzorci tri, prethodno kaljena, čelika različitih udjela karbida (bez karbida, niski i srednji udio karbida). Nakon zavarivanja, metodom odjeka mjerene su vrijednosti brzine ultrazvučnih impulsa pri određenim temperaturama u procesu kaljenja.

Brzina ultrazvučnih impulsa obrnuto je proporcionalna tvrdoći. Uzimajući u razmatranje izotropni materijal postoji linearna ovisnost tvrdoća dobivenih Rockwellovom i ultrazvučnom metodom.



Slika 24. Usporedba izmjerene i procijenjene tvrdoće na izotropnom uzorku [6]

Utjecaj karbida vidljiv je na krivuljama promjene tvrdoće u ovisnosti o promjeni brzine (slika 25). Ovisno o udjelu karbida mijenja se oblik krivulje iz konveksne za čelik bez karbida, do konkavne prisutnošću i povećanjem udjela karbida. Konkavna krivulja dobivena je i za martenzitne čelike [2] čime je potvrđena nelinearna ovisnost tvrdoće i brzine, aproksimirana krivuljom drugog reda.

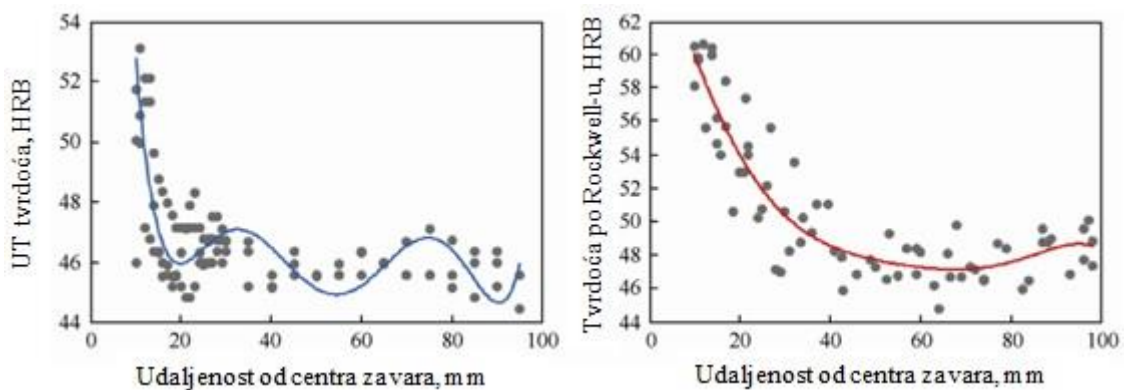


Slika 25. Utjecaj udjela karbida na promjenu tvrdoće i promjenu brzine ultrazvučnih valova [6]

Zbog grube površine, uzrokovane zavarivanjem, ispitivanje se provodi 10 mm od središta zavarenog spoja. Procesi naglog zagrijavanja i hlađenja pri zavarivanju uzrokuju zone veće tvrdoće i dovode do nemogućnosti održavanja izotropne mikrostrukture te nastaju nehomogenosti u materijalu, koje se odražavaju na tvrdoći dobivenoj mjerenjem brzine ultrazvučnih signala.

Na primjeru IF čelika (*interstitial free*) s udjelom karbida od 0%, prikazana je razlika tvrdoća dobivenih metodom odjeka i Rockwellovom metodom.





**Slika 26. Raspodjela UT tvrdoće (lijevo) i tvrdoće prema Rockwellu (desno) udaljavanjem od središta zavara [6]**

Zbog anizotropije u području oko zavara značajna je razlika između vrijednosti tvrdoća dobivenih ispitivanjem ultrazvukom i Rockwellovom metodom. Ispitivanje Rockwellom, koje je provedeno na površini pored lica zavarenog spoja zbog grube površine na mjestu samog zavara, prikazuje veće vrijednosti tvrdoće. Idući prema osnovnom materijalu tvrdoća se stabilizira na određenu vrijednost, zbog pretpostavke o izotropnom osnovnom materijalu.

Iako su obje metode podobne za određivanje tvrdoće oko zavara, zbog različitih prosječnih i površinskih vrijednosti tvrdoće ne mogu jedna drugu zamijeniti [6].

### 3. MJERENJA

Ultrazvučno mjerenje debljine tehnikom odjeka zasniva se na principu mjerenja vremena proleta ( $t_{TOF}$ ), koje je potrebno da ultrazvučni impuls, generiran od strane sonde, prođe kroz debljinu mjerene komponente  $n$  broj puta, pod pretpostavkom da je brzina ultrazvuka u materijalu konstantna:

$$d = \frac{v \cdot t_{TOF}}{n} \quad (2)$$

gdje je:

$d$  – debljina mjerene komponente izmjerena ultrazvukom, mm,

$v$  – brzina ultrazvuka u materijalu mjerene komponente, m/s,

$t_{TOF}$  – vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa od sonde do zadnje stijenke, s,

$n$  – broj prolaza ultrazvučnog impulsa kroz mjerenu komponentu.

Na tri etalonske pločice tvrdoće (198 HV, 487 HV i 680 HV) i odabranom čeličnom uzorku tehnikom odjeka provedeno je mjerenje brzine ultrazvuka, to jest mjerenje vremena proleta pomoću kojega se, poznavajući debljinu uzorka, izračunava vrijednost brzine ultrazvuka prema jednadžbi (3):

$$v = \frac{s}{t} \quad (3)$$

gdje je:

$v$  – brzina ultrazvuka, m,

$s$  – put koji prewali zvučni signal, m,

$t$  – vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa, s.

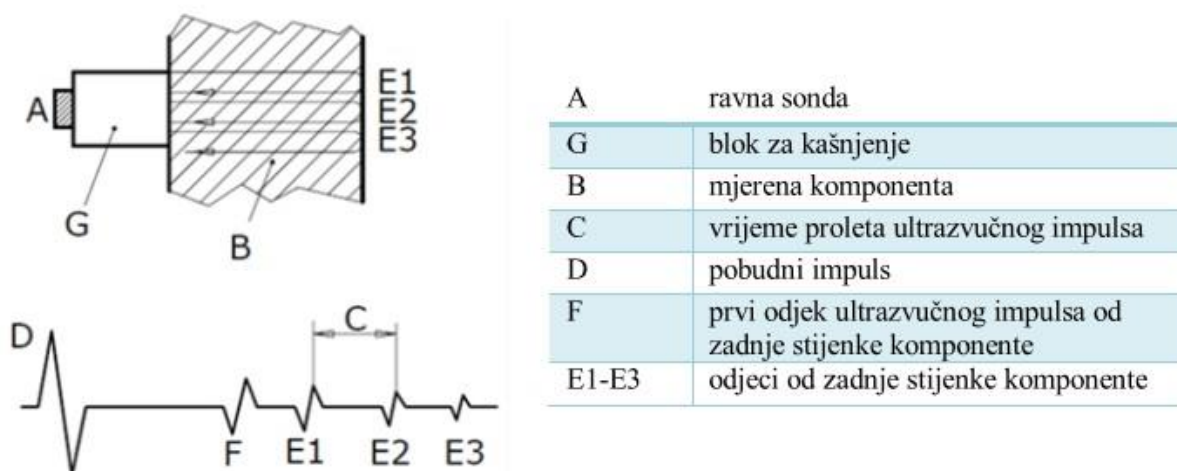


Slika 27. Etalonske pločice tvrdoće

### 3.1. Tehnički zahtjevi za ultrazvučno mjerenje debljine

Normom EN 14127 [8] definirana su 4 osnovna principa ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke, koji ujedno i predstavljaju modove mjerenja. Prikazan je mod 3, korišten u eksperimentu provedenom u ovome radu.

Mod 3. Mjerenje vremena proleta ultrazvučnog impulsa između dvaju susjednih odjeka od zadnje stijenke mjerene komponente (slika 28).



Slika 28. Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 3 [8]

### 3.2. Mjerenje vremena proleta

Mjerenja TOF-a u eksperimentalnom dijelu ovoga rada provedena su u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja (LNI) sa sljedećim ultrazvučnim sustavom:

- sonda: G5KB,
- ultrazvučni uređaj: USN 60,
- osciloskop: LeCroy 9310AM,
- kontaktno sredstvo: gel,
- tehnika: pulse overlap.

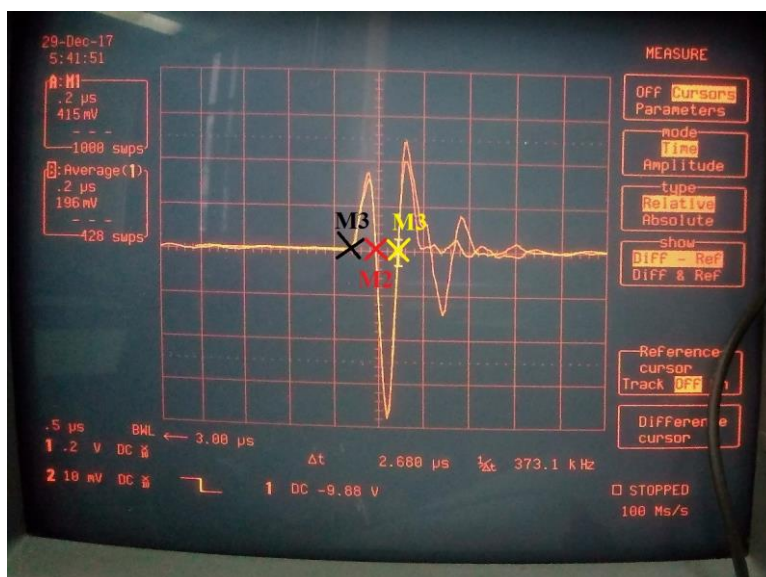
**Tablica 4. Parametri sonde**

Oznaka	Nazivna frekvencija, f	Širina frekvencijskog spektra, B <sub>w</sub>	Promjer sonde, D
G5KB	5 MHz	100 %	10 mm



**Slika 29. Sonda G5KB**

Kod ove tehnike vrijeme proleta mjeri se preklapanjem ultrazvučnih impulsa. Dva signala na zaslonu osciloskopa namještaju se kako bi se što bolje vizualno preklapila. Na tri mjesta preklopa (slika 27) provedena su mjerenja vremenske razlike ( $\Delta t$ ) između istih karakterističnih točaka u dva uzastopna signala odjeka ultrazvučnih impulsa (mjerno mjesto 1 (M1), mjerno mjesto 2 (M2) i mjerno mjesto 3 (M3)).



Slika 30. Mjerna mjesta

Na etalonskim pločicama tvrdoće (pretpostavka je da su homogene) mjerenja su provedena na dva mjesta, jedan od drugog zakrenuti za  $90^\circ$  (prikazano na slici 29). Na svakom mjestu mjerenje je ponovljeno šest puta u dva mjerenja (tri puta po mjerenju) kako bi se dobili što točniji rezultati brzine.



Slika 31. Mjesta mjerenja na etalonskoj pločici tvrdoće 680HV (jednaka kao i na ostalim etalonskim pločicama tvrdoće)



Slika 32. Ultrazvučni sustav

Tablica 5. Rezultati mjerenja vremena proleta (TOF) za etalonsku pločicu tvrdooce HV 198

HV 198				
mjerno mjesto 1			mjerno mjesto 2	
	1. mjerenje: $t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$	2. mjerenje: $t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$	1. mjerenje: $t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$	2. mjerenje: $t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$
M1	2,683	2,683	2,685	2,688
M2	2,682	2,681	2,683	2,682
M3	2,683	2,680	2,686	2,682
$\bar{x}$	2,683	2,681	2,685	2,684

**Tablica 6. Rezultati mjerenja vremena proleta (TOF) za etalonsku pločicu tvrdoće HV 487**

HV 487				
mjerno mjesto 1			mjerno mjesto 2	
	1. mjerenje: $t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$	2. mjerenje: $t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$	1. mjerenje: $t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$	2. mjerenje: $t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$
M1	2,705	2,713	2,711	2,709
M2	2,708	2,707	2,707	2,710
M3	2,709	2,708	2,708	2,717*
$\bar{x}$	2,707	2,709	2,709	2,710

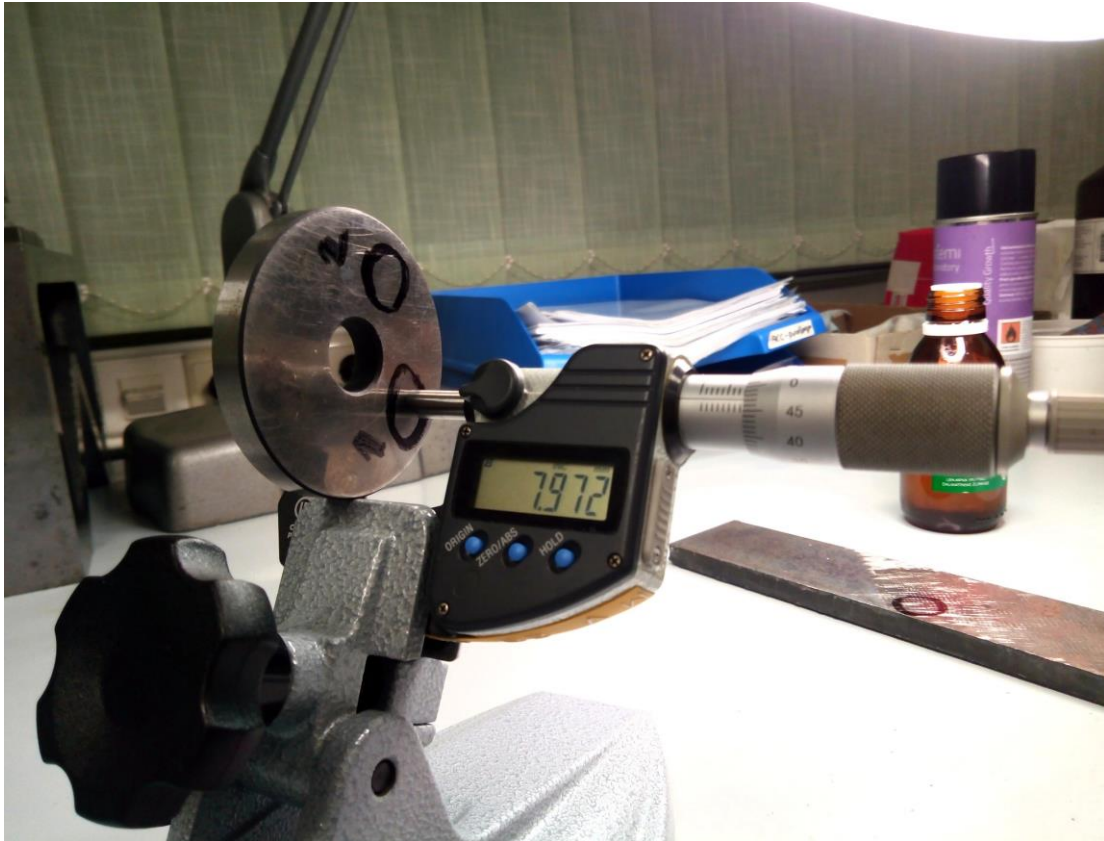
\*izostavljena vrijednost iz proračuna (gruba greška)

**Tablica 7. Rezultati mjerenja vremena proleta (TOF) za etalonsku pločicu tvrdoće HV 680**

HV 680				
mjerno mjesto 1			mjerno mjesto 2	
	1. mjerenje: $t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$	2. mjerenje: $t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$	1. mjerenje: $t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$	2. mjerenje: $t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$
M1	2,699	2,699	2,698	2,697
M2	2,698	2,701	2,699	2,697
M3	2,701	2,702	2,702	2,702
$\bar{x}$	2,699	2,701	2,700	2,699

### 3.3. Mjerenje debljine ispitnih uzoraka

Debljina ispitnih uzoraka mjerena je u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina digitalnim vanjskim mikrometrom MV 28-454 rezolucije 1 $\mu$ m. Prije samog mjerenja površine uzoraka su obrisane pamučnom krpicom i medicinskim benzinom kako bi se uklonile sve nečistoće kao i ostaci kontaktnog sredstva, gela.



Slika 33. Mjerenje debljine etalonske pločice tvrdoće digitalnim vanjskim mikrometrom MV 28-454

Na etalonskim pločicama tvrdoće napravljena su po tri mjerenja za svako mjerno mjesto (1 i 2) te izračunate srednje vrijednosti ( $\bar{x}$ ), koje su korištene u daljnjem proračunu.



**Tablica 8. Rezultati mjerenja debljine etalonskih pločica tvrdoće**

	Mjerno mjesto 1	Mjerno mjesto 2
Debljina etalonske pločice tvrdoće 198 HV, mm	7,972	7,971
	7,972	7,972
	7,972	7,971
	$\bar{x} = 7,972$	$\bar{x} = 7,971$
Debljina etalonske pločice tvrdoće 487 HV, mm	8,094	8,097
	8,094	8,097
	8,096	8,097
	$\bar{x} = 8,095$	$\bar{x} = 8,097$
Debljina etalonske pločice tvrdoće 680 HV, mm	8,048	8,048
	8,048	8,047
	8,047	8,048
	$\bar{x} = 8,048$	$\bar{x} = 8,048$

Kod odabranog čeličnog uzorka, zbog grube površinske obrade, napravljeno je 10 mjerenja i izračunata srednja vrijednost ( $\bar{x}$ ), koja je korištena u daljnjem proračunu.

**Tablica 9. Rezultati mjerenja debljine čeličnog uzorka**

Debljina	10,054	10,020	10,020	10,014
čeličnog	10,042	10,016	10,016	10,024
uzorka, mm	10,030	10,021	10,016	
	$\bar{x} = 10,025$			

### 3.4. Određivanje kemijskog sastava etalonskih pločica tvrdoće - XRF

U Laboratoriju za zaštitu materijala XRF metodom određen je nepoznati kemijski sastav etalonskih pločica tvrdoće. XRF metoda se bazira na pobuđivanju atoma ispitivanog uzorka rendgenskim zračenjem, što rezultira emisijom fluorescentnog zračenja iz materijala, karakterističnog za određeni element. Ispitivanje je provedeno uređajem Olympus, model DS 2000-C, proizvođača Innov-X Systems, Inc. te su dobiveni rezultati dani u tablici 10:

**Tablica 10. Kemijski sastav etalonskih pločica tvrdoće**

Kemijski element (%)	HV 198	HV 487	HV 680
Si	0,9 ± 0,06	1,06 ± 0,06	0,94 ± 0,06
Cr	0,14 ± 0,01	1,11 ± 0,03	1,09 ± 0,03
Mn	0,6 ± 0,03	0,57 ± 0,03	0,67 ± 0,03
Fe	98,21 ± 0,28	97,05 ± 0,29	97,08 ± 0,29
Cu	0,16 ± 0,02	0,16 ± 0,02	0,15 ± 0,02
Mo	<0,01	0,065 ± 0,004	0,07 ± 0,004

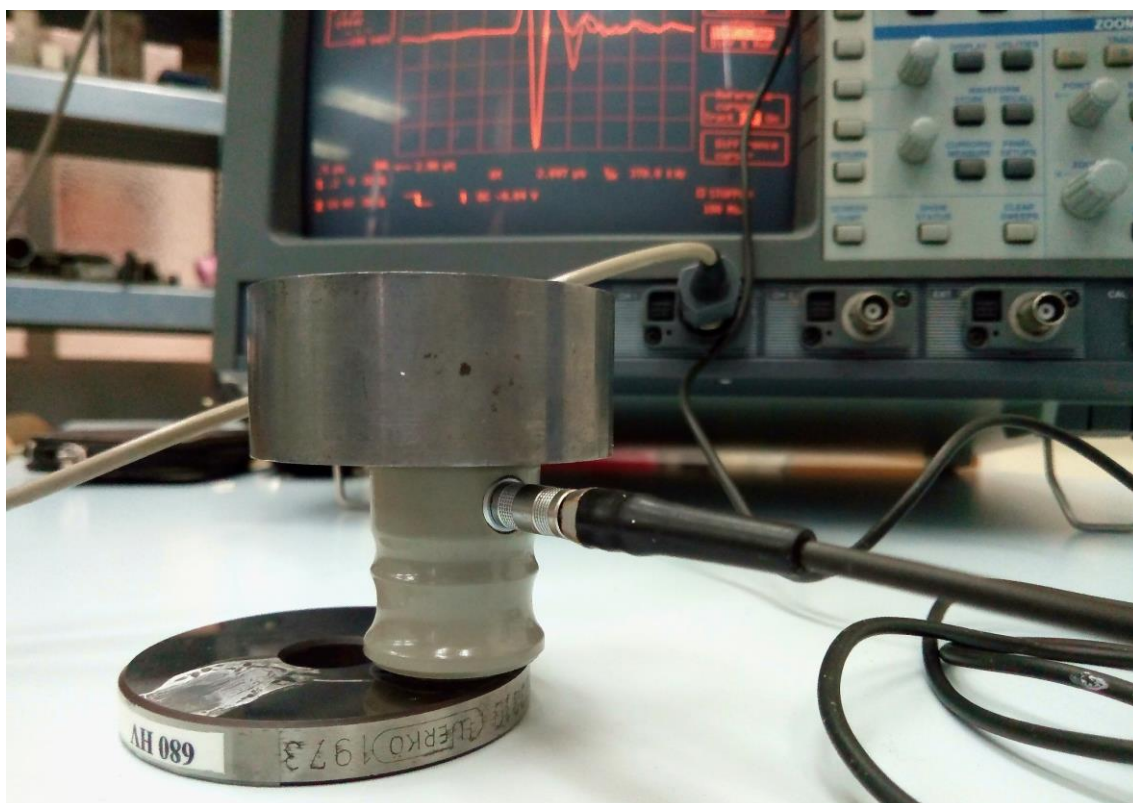
Iz kemijskog sastava etalonskih pločica tvrdoće vidljivo je prilično poklapanje u kemijskom sastavu, osobito etalonskih pločica HV 487 i HV 680, dok HV 198 ima nešto viši udio željeza i niži udio jednog legirajućeg elementa, kroma.



**Slika 34. XRF uređaj Olympus model DS 2000-C**

### 3.5. Obrada rezultata mjerenja

Za izračunavanje brzine ultrazvučnog impulsa potrebno je uzeti dvostruku debljinu mjerenog mjesta za duljinu puta ( $s$ ), jer je dobiveno vrijeme proleta ono vrijeme između prvog i drugog odjeka odnosno od trenutka ulaska impulsa u materijal do povratka reflektiranog signala natrag u sondu. U svrhu izbjegavanja niza drugih utjecaja na mjerenje TOF-a korišten je blok, koji osigurava konstantan pritisak na sondu pri svim mjerenjima.



Slika 35. Eksperimentalni postav za mjerenja vremena proleta

Primjenom jednadžbe (3) dobiveni su sljedeći rezultati:

**Tablica 11. Brzina ultrazvučnih impulsa u etalonskoj pločici tvrdoće HV 198**

<b>HV 198 – mjesto 1</b>		
	<u>1. mjerenje</u>	<u>2. mjerenje</u>
	$t_{TOF}, \mu s$	
$\bar{x}$	2,683	2,681
	$d, mm$	
	7,972	
	$v, m/s$	
	5942,602	5947,035
$\bar{v}$	<b>5944,819</b>	
<b>HV 198 – mjesto 2</b>		
	<u>1. mjerenje</u>	<u>2. mjerenje</u>
$\bar{x}$	2,685	2,684
	$d, mm$	
	7,971	
	$v, m/s$	
	5937,430	5939,642
$\bar{v}$	<b>5938,536</b>	

Tablica 12. Brzina ultrazvučnih impulsa u etalonskoj pločici tvrdoće HV 487

<b>HV 487 – mjerno mjesto 1</b>		
	<u>1. mjerenje</u>	<u>2. mjerenje</u>
	$t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$	
$\bar{x}$	2,707	2,709
	$d$ , mm	
	8,095	
	$v$ , m/s	
	5980,791	5976,375
$\bar{v}$	5978,583	
<b>HV 487 – mjerno mjesto 2</b>		
	<u>1. mjerenje</u>	<u>2. mjerenje</u>
$\bar{x}$	2,709	2,710
	$d$ , mm	
	8,097	
	$v$ , m/s	
	5977,852	5975,646
$\bar{v}$	5976,749	

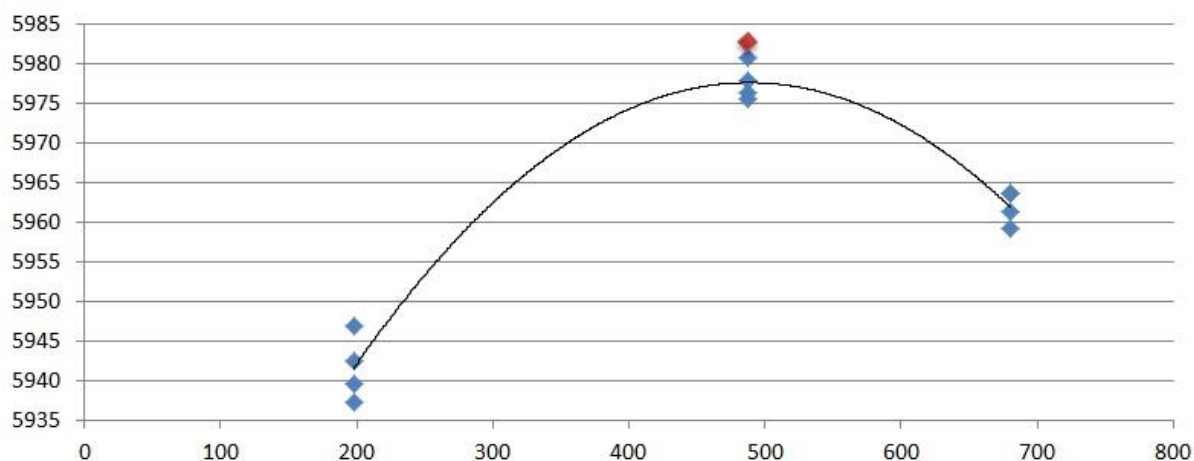
Tablica 13. Brzina ultrazvučnih impulsa u etalonskoj pločici tvrdoće HV 680

HV 680 – mjesto 1		
	<u>1. mjerenje</u>	<u>2. mjerenje</u>
	$t_{TOF}, \mu s$	
$\bar{x}$	2,699	2,701
	$d, mm$	
	8,048	
	$v, m/s$	
	5963,690	5959,274
$\bar{v}$	5961,482	
HV 680 – mjesto 2		
	<u>1. mjerenje</u>	<u>2. mjerenje</u>
$\bar{x}$	2,700	2,699
	$d, mm$	
	8,048	
	$v, m/s$	
	5961,481	5963,690
$\bar{v}$	5962,586	

**Tablica 14. Srednje vrijednosti brzina ultrazvučnih valova u etalonskim pločicama tvrdoće**

HV 198, m/s	HV 482, m/s	HV 680, m/s
5941,676	5977,666	5962,034

Korištenjem srednjih vrijednosti brzina za sva mjerna mjesta i mjerenja dobivena je sljedeća krivulja:

**Slika 36. Promjena brzine ultrazvuka s promjenom tvrdoće**

Na grafu su također prikazani i svi rezultati mjerenja u svrhu prikaza rasipanja mjerenja.

Ovim eksperimentom potvrđena je nelinearna ovisnost, aproksimirana parabolom 2. reda, tvrdoće i brzine ultrazvučnih valova, kao i u članku [2]. Brzina longitudinalnih valova raste porastom tvrdoće do određene vrijednosti tvrdoće kad dostiže određeni maksimum nakon kojega se smanjuje. Kako bi se dobili što bolji prikaz i ovisnost te što preciznije odredilo mjesto prelaska krivulje iz uzlazne u silaznu putanju, trebale bi se uzeti etalonske pločice tvrdoće čije su vrijednosti između onih na kojima je provedeno ispitivanje.

### 3.6. Obrada rezultata mjerenja na odabranom uzorku

Na odabranom uzorku mjerenje je provedeno na jednom mjestu u svrhu provjere hipoteze (istraživanja) temeljem mjerenja na etalonskim pločicama tvrdoće. Rezultati su dani u tablici 15:

**Tablica 15. Rezultati mjerenja osciloskopom na odabranom uzorku i izračun brzine ultrazvuka**

Čelični uzorak				
	$t_{TOF}$ , $\mu\text{s}$	$\bar{x}$ , $\mu\text{s}$	$d$ , mm	$v$ , m/s
M1	3,360	3,356	10,025	<b>5974,374</b>
M2	3,343			
M3	3,364			

Za izračunatu vrijednost brzine ultrazvučnih valova u odabranom uzorku prema pretpostavljenoj ovisnosti prikazanoj na slici 36 ne bismo mogli jednoznačno procijeniti vrijednost tvrdoće, a iz pregleda istraživanja smo vidjeli da je za pouzdanu procjenu isto tako važna i istovrsnost materijala u pogledu kemijskog sastava i mikrostrukture.

#### 3.6.1. Određivanje kemijskog sastava - XRF

U tablici 16 prikazani su dobiveni rezultati određivanja kemijskog sastava:

**Tablica 16. Kemijski sastav odabranog uzorka**

Kemijski element (%)	
Si	0,29 ± 0,04
S	0,058 ± 0,007
Mn	0,45 ± 0,03
Fe	99,18 ± 0,28
Nb	0,031 ± 0,003

Na temelju dobivenih rezultata kemijskog sastava može se zaključiti kako je odabrani uzorak obični meki čelik feritno-perlitne mikrostrukture.



### 3.6.2. Mjerenje tvrdoće po Vickersu

Tvrdoća odabranog uzorka mjerenja je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva (LIMS) na tvrdomjeru 5030TKV tvrtke INENTEC Vickersovom metodom. Indentor je istostrana, četverostrana, dijamantna piramida s kutem između stranica od  $136^\circ$ . Utiskivanjem ovakvog indentora u materijalu ostaje otisak oblika piramide te se tvrdoća zaključuje na temelju veličine otiska.



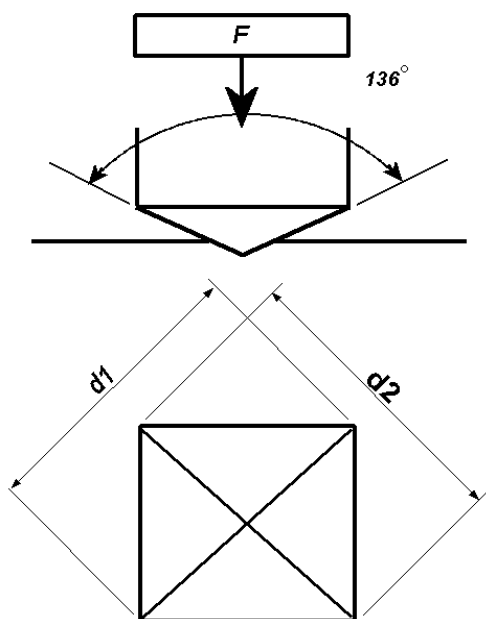
Slika 37. Tvrdomjer 5030TKV tvrtke INENTEC

Po definiciji, tvrdoća po Vickersu dana je izrazom:  $HV = \frac{F}{A}$   
(4)

gdje su:

F – sila opterećivanja, N,

A – površina šuplje piramide otisnute u materijalu,  $\text{mm}^2$ .



Slika 38. Skica penetratora i otiska kod Vickersove metode

Površina šuplje piramide računa se prema formuli:  $A = \frac{d^2}{2\sin(136^\circ/2)}$ , pri čemu je (5)

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (6)$$

Uzorak je opterećen silom od 5N. Dijagonale dobivenog otiska iznose  $d_1 = 0,2187$  i  $d_2 = 0,2402$ . Uvrštavanjem u formule (6), (5) i (4) dobivena vrijednost tvrdoće iznosi 176 HV5.

### 3.6.3. Zaključak

Prema dobivenim rezultatima kemijskog sastava i tvrdoće može se zaključiti kako je odabrani uzorak meki čelik feritno-perlitne mikrostrukture s oko 0,5% C (procijenjeno na temelju tvrdoće od 176 HV5). Budući da je vrijednost tvrdoće odabranog uzorka niža od tvrdoća etalonskih pločica tvrdoće i različitog je kemijskog sastava (manganski čelik) ne zadovoljava kriterij za usporedbu s izračunatim vrijednostima brzina etalonskih pločica tvrdoće.

## 4. ZAKLJUČAK

U teorijskom dijelu rada proučena su istraživanja, i prikazani rezultati, koji se temelje na mjerenjima različitih ultrazvučnih parametara uzimajući u obzir i druge podatke o stanju materijala da bi se dobila kvalitativna i kvantitativna procjena vrijednosti tvrdoće ultrazvučnim ispitivanjem materijala. Opisana je metoda odjeka te postupak izračunavanja brzine ultrazvučnih valova na osnovu vremena proleta mjerenog pomoću osciloskopa.

U eksperimentalnom dijelu rada, po uzoru na metode i parametre provođenja ispitivanja u prije obrađenim člancima, provedeno je ispitivanje na etalonskim pločicama tvrdoće kako bi se eksperimentalno analizirala ovisnost brzine ultrazvučnih valova i tvrdoće. Krivulja 2. reda, koja je uspostavljena temeljem ultrazvučnih mjerenja na etalonskim pločicama tvrdoće, nije bila primjenjiva na odabrani uzorak zbog različitog kemijskog sastava, a posljedično i niže tvrdoće od raspona odabranih etalonskih pločica tvrdoće. Osim o kemijskom sastavu, brzina ultrazvučnih valova, ovisi i o provedenoj toplinskoj obradi, temperaturi, anizotropnosti, orijentiranosti karbida i udjelu faza, stoga određivanje tvrdoće isključivo temeljem mjerenja brzine ultrazvučnih impulsa u materijalu, bez poznavanja ostalih relevantnih informacija o materijalu, nije jednostavno niti jednoznačno određeno, jer postoji priličan broj utjecajnih faktora kada nije riječ o poznatom materijalu.

U cilju obuhvatnijeg razumijevanja svih relevantnih utjecaja i intervala unutar kojih variraju vrijednosti tvrdoće materijala u korelaciji s brzinom ultrazvuka ovim radom nastojali su se prikazati opseg, točnost i primjenjivost njegove upotrebe u proizvodnim postupcima.

## LITERATURA

- [1] A. Badidi Bouda, A. Benchaala, K. Alem: Ultrasonic characterization of material hardness, *Ultrasonics* 38 , 2000.
- [2] T. Lukomski, T. Stepinski: Steel hardness evaluation based on ultrasound velocity measurements, *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2010.
- [3] J.B. Wiskel, J.Kennedy, D. G. Ivey, H. Henein: Ultrasonic Velocity Evaluation of Three Grades of Heat Treated Steel, Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta, Canada
- [4] K. Vijayalakshmi, V. Muthupandi, R. Jayachitra: Influence of heat treatment on the microstructure, ultrasonic attenuation and hardness of SAF 2205 duplex stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, India, 2011.
- [5] E. Oktay, S. Ekinci: Characterisation of microstructure of H13 tool steel using ultrasonic measurements, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015.
- [6] F.Uzun, A. N. Bilge: Application of ultrasonic waves in measurement of hardness of welden carbon steels, *Defence Technology* 11, 2015.
- [7] T. Jayakumar, B.Raj: Influence of Microstructure on Ultrasonic Velocity in Nimonic Alloy PE16, New York, 1991.
- [8] EN 14127:2004, Non-destructive testing – Ultrasonic thickness measurement
- [9] M. Mihaljević: Procjena mjerne nesigurnosti ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, doktorska disertacija, 2015.
- [10] ASTM E494 - 10 Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials, American Society for Testing and Materials
- [11] Non destructive education portal: <http://www.ndt-ed.org>
- [12] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer: The Pulse-Echo Method: Design and Performance of a Pulse-Echo Flaw Detector, Berlin, 1990.
- [13] D.Markučić, predavanja iz kolegija „Nerazorna ispitivanja“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [14] M. Mihaljević, vježbe iz kolegija „Nerazorna ispitivanja“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [15] S. Rešković: Ispitivanje materijala, Metalurški fakultet, Zagreb