

# Ispitivanje utjecaja ultrazvučne pobude tekućeg sredstva za gašenje na deformacije kaljenog valjka od čelika C45

---

**Kušar, Dominik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*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:235:076465>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**

*Repository / Repozitorij:*

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





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske 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:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dominik Kušar**

Mat. br.: 0035180769

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje utjecaja ultrazvučne pobude tekućeg sredstva za gašenje na deformacije kaljenog valjka od čelika C45**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing the influence of ultrasonic excitation of liquid quenchant on deformations in hardened cylinder made from steel grade C45**

Opis zadatka:

Pri kaljenju čelika mogu se pojaviti toplinska naprezanja tijekom austenitizacije, te toplinska i transformacijska naprezanja pri gašenju. Faza gašenja kritična je za postizanje traženih svojstava čelika uz najveću opasnost od pojave zaostalih naprezanja, deformacija i loma kaljenog predmeta. Mehaničkom ili ultrazvučnom pobudom sredstva za gašenje moguće je u određenoj mjeri utjecati na njegove karakteristike ohlađivanja i svojstva kaljenog predmeta.

U radu treba opisati djelovanje utjecajnih čimbenika na krivulju ohlađivanja tekućih sredstva za gašenje (vode, ulja za kaljenje, vodenih otopina polimera) i mogućnosti promjene dinamike ohlađivanja djelovanjem ultrazvučne pobude.

U eksperimentalnom dijelu rada treba:

- Snimiti krivulje ohlađivanja vode i ulja za kaljenje, s i bez djelovanja ultrazvučne pobude, različite snage ultrazvučnog vala;
- Planirati i provesti pokuse kaljenja dugačkih valjaka s utorom od čelika C45, u vodi i ulju, s i bez djelovanja ultrazvučne pobude;
- Izmjeriti tvrdoću i deformacije kaljenih valjaka prije i poslije pokusa kaljenja.

Na temelju analize i diskusije rezultata ispitivanja vrednovati utjecaj ultrazvučne pobude na parametre krivulje ohlađivanja, te prokaljenost i deformacije kaljenih valjaka.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

7. svibnja 2015.

9. srpnja 2015.

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Darko Landek

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Dominik Kušar**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Dominik Kušar

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku na odličnoj suradnji i bezrezervnoj pomoći. Također se zahvaljujem asistentu Josipu Županu mag. ing. na pomoći pri eksperimentalnom dijelu rada.

Dominik Kušar

## Sadržaj

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
1. UVOD .....	1
2. KALJENJE.....	3
2.1. Fazne pretvorbe čelika.....	3
3. ISPITIVANJE KARAKTERISTIKA SREDSTVA ZA GAŠENJE.....	8
3.1. Temperaturene probe .....	8
3.2. Krivulja ohlađivanja i parametri ohlađivanja .....	13
3.3. Utjecajni čimbenici na krivulju ohlađivanja tekućeg sredstva za gašenje.....	18
3.3.1. Leidenfrost-ov efekt .....	18
3.3.2. Kinematika kvašenja .....	19
3.3.3. Efekt inverzne topivosti polimera u vodi .....	23
3.4. Sistematizacija utjecajnih čimbenika na krivulju hlađenja temperaturene probe.....	24
3.5. Utjecaj faktora okoliša na krivulju ohlađivanja.....	31
4. ULTRAZVUČNA UZBUDA SREDSTVA ZA GAŠENJE .....	35
4.1. Djelovanje ultrazvuka u kapljevitim medijima za ohlađivanje .....	35
4.2. Utjecaj ultrazvuka na prijenos topline .....	39
5. PRIPREMA I PROVEDBA POKUSA .....	48
5.1. Proba za ispitivanje utjecaja ultrazvučne uzbuđene na deformacije .....	48
5.2. Plan pokusa.....	50
5.3. Provedba pokusa.....	50
6. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULATA.....	54
6.1. Utjecaj ultrazvučne uzbuđene na krivulju gašenja .....	54
6.2. Utjecaj ultrazvučne uzbuđene na tvrdoću kaljenog čelika .....	59
6.3. Utjecaj ultrazvučne uzbuđene na promjenu mjera i oblika .....	67
7. ZAKLJUČAK .....	73
8. LITERATURA.....	74

## Popis slika

Slika 1. Utjecaj brzine hlađenja na fazne pretvorbe podeutektoidnog čelika.....	4
Slika 2. Konstrukcija idealne krivulje gašenja .....	5
Slika 3. TTT dijagram za čelik C45E prema [15] s ucrtanom gornjom kritičnom i idealnom krivuljom gašenja.....	6
Slika 4. Višestruki utjecaji ostvarene krivulje ohlađivanja na svojstva kaljenog čelika .....	6
Slika 5. Presjek temperaturne probe u sredstvu i položaj termopara u zaštitnom materijalu .....	8
Slika 6. Različiti oblici proba za ispitivanje utjecaja oblika na krivulju ohlađivanja .....	10
Slika 7. Zajednički utjecaj oblika i cirkulacije sredstva za gašenje .....	11
Slika 8. Rezultati mjerenja krivulja hlađenja s cilindričnom i polukuglastom probom .....	11
Slika 9. Utjecaj materijala probe na dobivenu krivulju gašenja .....	12
Slika 10. Temperaturna proba ISO 9950: 1995 .....	12
Slika 11. Osnovni parametri gašenja određeni s krivulje ohlađivanja.....	13
Slika 12. Utjecaj veličine probe na koeficijent prijelaza topline .....	16
Slika 13. Aproksimacija koeficijentata prijelaza topline s više linearnih funkcija.....	17
Slika 14. Stadiji gašenja u sredstvima podložnim Leidenfrost-ovom efektu .....	18
Slika 15. Prikaz stadija gašenja tijekom kaljenja u ulju .....	20
Slika 16. Napredovanje fronta kvašenja na čeličnom valjku .....	20
Slika 17. Određivanje kinematike kvašenja pomoću termoparova na različitim visinama predmeta ..	22
Slika 18. Tvrdća površine i vrijeme kvašenja kao funkcija udaljenosti od donjeg dijela čeličnog valjka .....	22
Slika 19. Utjecaj oksidacije površine na trajanje kvašenja .....	23
Slika 20. Pojava inverzne topivosti polimera u vodi .....	24
Slika 21. Identifikacija parametara procesa snimanja krivulje gašenja.....	25
Slika 22. Utjecaj različitih sredstava i temperature medija na hlađenje .....	25
Slika 23. Utjecaj različitih tipova sredstva i koncentracije polimera .....	26

Slika 24. Utjecaj cirkulacije sredstva za gašenje na krivulju gašenja .....	27
Slika 25. Utjecaj strujanja i temperatura medija na Leidenfrost-ovu temperaturu .....	28
Slika 26. Utjecaj temperature medija na brzinu hlađenja i prijelaznu temperaturu .....	29
Slika 27. Shematski prikaz djelovanja ultrazvučne pobude na parni omotač .....	30
Slika 28. Djelovanje ultrazvuka na brzinu hlađenja .....	30
Slika 29. Utjecaj degradacije polimera .....	31
Slika 30. Utjecaj starosti i osiromašenja otopine na brzinu hlađenja .....	32
Slika 31. Utjecaj primjesa vode u ulju za kaljenje .....	32
Slika 32. Utjecaj oksidacije ulja na brzinu gašenja .....	33
Slika 33. Primjena ultrazvuka prema frekvenciji i snazi .....	35
Slika 34. Efekti uslijed propagacije ultrazvuka kroz tekućinu .....	36
Slika 35. Poboljšanje prijenosa topline konvekcijom pomoću ultrazvučnih valova .....	36
Slika 36. Pojašnjenje poboljšanja prijenosa topline akustičkom kavitacijom .....	37
Slika 37. Utjecaj ultrazvuka na pojavu mjehurastog vrenja .....	37
Slika 38. Promjena toplinskog toka u različitim stadijima pri gašenju .....	39
Slika 39. Shematski prikaz opreme za ispitivanje toplinskog toka i vizualizaciju kretanja u mediju ...	40
Slika 40. „Lokalna“ i „globalna“ kavitacija .....	41
Slika 41. Utjecaj ultrazvuka u stadiju konvekcije za $q'' = 1,5 \text{ kW/m}^2$ .....	42
Slika 42. Slike gibanja u stadiju konvekcije.....	43
Slika 43. Djelovanje ultrazvuka u prijelaznoj fazi .....	44
Slika 44. Djelovanje ultrazvuka u fazi mjehurastog vrenja.....	44
Slika 45. Utjecaj gustoće toplinskog toka na ponašanje mjehurića.....	45
Slika 46. Srednja vrijednost amplitude tlaka ultrazvuka mjerena u voltima ovisno o duljini .....	46
Slika 47. Usporedba toplinskih tokova s i bez djelovanja ultrazvuka ovisno o udaljenosti žice.....	46
Slika 48. Ispitni valjak s utorom.....	49
Slika 49. Jominy krivulja prokaljivosti .....	49
Slika 50. Temperaturna proba za ispitivanje krivulja gašenja prema normi ISO 9950.....	50
Slika 51. <i>IVF Smart Quench</i> oprema za ispitivanje krivulja hlađenja kapljevitih sredstava za gašenje	50



---

Slika 52. Obradci za ispitivanje deformacija.....	51
Slika 53. Dijagram postupka kaljenja obradaka od čelika C45E.....	51
Slika 54. Ultrazvučni uređaj SONOPLUS HD 3400.....	52
Slika 55. Položaj opreme pri gašenju .....	52
Slika 56. Gašenje obradaka u vodi i ulju za kaljenje.....	53
Slika 57. Krivulje gašenja ISO temperaturne probe od Inconela 600 u vodi temperature 20°C s i bez djelovanja ultrazvučne uzbude .....	55
Slika 58. Krivulje gašenja ISO temperaturne probe od Inconela 600 u ulju temperature 20°C s i bez djelovanja ultrazvučne uzbude .....	56
Slika 59. Ovisnost temperature gašenja o vrsti rashladnog medija i dodatnoj ultrazvučnoj uzbudi .....	57
Slika 60. Ovisnost specifičnih vremena gašenja o vrsti rashladnog medija i dodatnoj ultrazvučnoj uzbudi .....	57
Slika 61. Ovisnost brzine gašenja o vrsti rashladnog medija i dodatnoj ultrazvučnoj uzbudi .....	58
Slika 62. Točke mjerenja tvrdoće po duljini uzoraka .....	60
Slika 63. Raspodjela površinske tvrdoće ispitnih uzoraka od čelika C45E gašenih u vodi s i bez ultrazvučne uzbude:.....	61
Slika 64. Raspodjela površinske tvrdoće ispitnih uzoraka od čelika C45E gašenih u ulju s i bez ultrazvučne uzbude:.....	62
Slika 65. Raspodjela površinske tvrdoće ispitnih uzoraka od čelika C45E gašenih u vodi i ulju za kaljenje (INA Kalenol 15) s i bez ultrazvučne uzbude.....	63
Slika 66. Točke mjerenja tvrdoće po poprečnom presjeku .....	64
Slika 67. Raspodjela tvrdoća po poprečnom presjeku uzorka gašenog u mirnoj vodi .....	64
Slika 68. Raspodjela tvrdoća po poprečnom presjeku uzorka gašenog u mirnom ulju.....	65
Slika 69. Raspodjela tvrdoća po poprečnom presjeku uzorka gašenog u vodi uz ultrazvučnu uzbudu 100 W .....	65
Slika 70. Raspodjela tvrdoća po poprečnom presjeku uzorka gašenog u ulju uz ultrazvučnu uzbudu 100W .....	66
Slika 71. Pozicije mjerenja odstupanja od nazivnog promjera.....	67

Slika 72. Promjena promjera po duljini valjaka od čelika C45E gašenih u vodi s i bez djelovanja ultrazvučne uzbude.....	68
Slika 73. Promjena promjera po duljini valjaka od čelika C45E gašenih u ulju s i bez djelovanja ultrazvučne uzbude.....	68
Slika 74. Položaji mjerenja duljine na donjem čelu uzorka .....	69
Slika 75. Srednja promjena duljine uzoraka od čelika C45E gašenih u vodi ili ulju s i bez ultrazvučne uzbude .....	70
Slika 76. Promjena pravocrtnosti uzoraka od čelika C45E gašenih u vodi s i bez ultrazvučne uzbude.....	71
Slika 77. Promjena pravocrtnosti uzoraka od čelika C45E gašenih u ulju s i bez ultrazvučne uzbude.....	72

## **Popis tablica**

Tablica 1. Usporedba različitih normi za ispitivanje krivulja gašenja .....	9
Tablica 2. Fizikalna svojstva referentnog ulja za kaljenje .....	9
Tablica 3. Djelovanje utjecajnih čimbenika na krivulju gašenja tekućih medija za gašenje ..	34
Tablica 4. Kemijski sastav čelika C45E.....	49
Tablica 5. Plan pokusa gašenja .....	50

## Popis oznaka

<i>Oznaka ili kratica</i>	<i>Jedinica</i>	<i>Naziv veličine ili značenje kratice</i>
$\vartheta$	°C	temperatura
$\vartheta_A$	K	temperatura austenitizacije
$\vartheta_i$	K	temperatura minimalnog trajanja inkubacije
$t_{i \min}$	s	minimalno vrijeme inkubacije pothlađenog austenita
$v_{kg}$	°C /s , K/s	gornja kritična brzina gašenja
$v_{kd}$	°C /s , K/s	donja kritična brzina gašenja
A		austenit
$A_p$		pothlađeni austenit
B		bainit
M		martenzit
P		perlit
F		ferit
$A_{c1}$	°C	temperatura eutektoidne pretvorbe
$A_{c3}$	°C	temperatura pretvorbe austenita
$T$	K	apsolutna temperatura
$\lambda$	W/(mK)	koeficijent toplinske vodljivosti
$\alpha$	W/(m <sup>2</sup> K)	koeficijent prijelaza topline
$\Phi$	W	toplinski tok
$q$	W/m <sup>2</sup>	gustoća toplinskog toka
$A$	m <sup>2</sup>	površina
$a$	m <sup>2</sup> /s	toplinska difuznost
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$C_p$	J/K	toplinski kapacitet
$i$	A	jakost struje
$R$	$\Omega$	električni otpor
$L$	m	duljina
$D$	m	promjer
$Bi$		Biotov broj

## **SAŽETAK**

U radu su analizirani utjecajni čimbenici na krivulju ohlađivanja i deformacije pri gašenju. Provedeni su pokusi gašenja uzoraka s utorom od čelika C45E na kojima su ispitane promjene dimenzija te tvrdoća.

Ključne riječi: kaljenje, krivulje gašenja, deformacije, ultrazvuk, čelik C45E

## **SUMMARY**

The paper analyzes the factors influencing the cooling curve and deformations in quenching process. Quenching experiments were conducted on a keyway containing samples made of the steel C45E. Changes in size and hardness after quenching were examined.

Key words: quenching, cooling curves, deformations, ultrasound, steel C45E

## 1. Uvod

Česta upotreba i velika važnost kaljivih čelika u strojarstvu temelji se na mogućnosti promjene njegovih mehaničkih, triboloških i ostalih svojstva provedbom toplinske obrade. Pri tome je nužno izabrati odgovarajući režim ugrijavanja, temperaturu i trajanje austenitizacije, zaštitnu atmosferu te sredstvo za gašenje i parametre gašenja. Izborom prikladnog sredstva za gašenje i parametara gašenja cilj je postići nadkrično gašenje u čitavom volumenu obratka, odnosno gašenje uz postizanje najmanje 50 % martenzitne mikrostrukture u jezgi obratka. Navedene uvjete nadkričnog gašenja posebno je teško postići kod čelika zakaljivih u tekućim sredstvima za gašenje s vrelištem nižim od temperature austenitizacije čelika (voda, ulje, vodene otopine polimera) zbog pojave Leidenfrost-ovog fenomena. Ovaj fenomen značajno utječe na utječe na tijek krivulje ohlađivanja, a preko nje na mikrostrukturu i svojstva kaljenog čelika, što će se detaljno opisati u radu. Također će se analizirati i pokusima ispitati mogućnosti vanjskog utjecaja na krivulju hlađenja vode i ulja za kaljenje primjenom ultrazvučne uzbude te posljedice ovog djelovanja na deformacije kaljenih valjaka od srednjeugličnog nelegiranog čelika C45E.

# **TEORIJSKI DIO**



## 2. Kaljenje

Kaljenje je postupak toplinske obrade čelika koji se sastoji od ugrijavanja čelika u temperaturno područje austenitne mikrostrukture i potom intenzivnog (nadkritičnog) gašenja. Kaljenjem se čelik nastoji zakaliti, tj. postići što višu tvrdoću na površini i prokaliti tj. postići što jednoličniju tvrdoću po presjeku obratka.

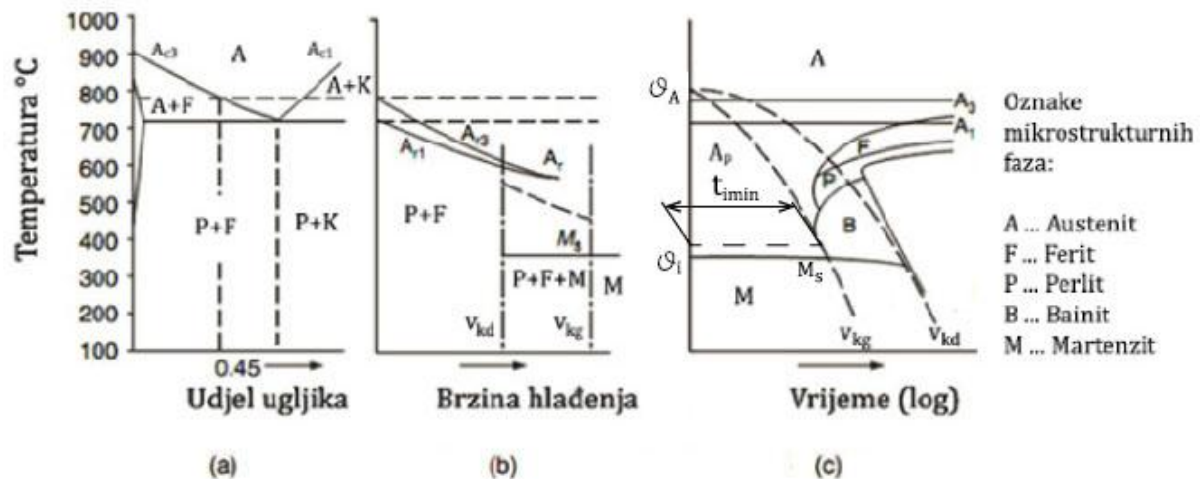
Zakaljivost čelika ovisi o sadržaju ugljika u čeliku (min. 0,35 %) uz ispunjenje i ostala tri uvjeta: mogućnost pretvorbe feritne strukture u austenitnu i obrnuto, ugrijavanje čelika na temperaturu austenitizacije i nadkritično gašenje. Prokaljivost ovisi o kemijskom sastavu čelika (sadržaju ugljika i legiranih elemenata) i veličini austenitnog zrna. Prokaljenost (stanje čelika nakon kaljenja) ovisi o prokaljivosti čelika, obliku i debljini obratka te vrsti sredstva i parametrima gašenja. Za prokaljenje je potrebno postići određenu intenzivnost gašenja koja će omogućiti postizanje martenzitne mikrostrukture ne samo na površini nego i u jezgri obratka.

U daljnjem će tekstu biti opisan način određivanja potrebne gornje kritične brzine gašenja te ispitivanje sredstva za gašenje i mogućnosti utjecaja na njihovu krivulju ohlađivanja. Cilj vanjskih djelovanja na dinamiku gašenja je postizanje potrebne brzine gašenja čelika uz minimalne deformacije kaljenog obratka.

### 2.1. Fazne pretvorbe čelika

Na primjeru podutektoidnog ugljičnog čelika s 0.45% ugljika, C45E, mogu se prikazati fazne pretvorbe uobičajene za kaljivi konstrukcijski čelik nastale uz različite brzine hlađenja. Razmotrit će se dva krajnja slučaja, vrlo sporo i vrlo brzo ohlađivanje. Polazna mikrostruktura čelika u oba slučaja je austenit, u opisanom primjeru, homogeniziran ugrijavanjem na temperaturu 850°C (slika 1a). Vrlo sporim hlađenjem (slika 1a) (na  $A_{c3}$  temperaturi 785°C) iz austenita se počinje izlučivati ferit. Na temperaturi  $A_{c1}=723^{\circ}\text{C}$  se austenit koji se nije pretvorio u ferit, pretvara u perlit. Daljnjim hlađenjem do sobne temperature ferit i perlit ostaju u nepromijenjenom omjeru u metastabilnoj ravnoteži. Povećanjem brzine hlađenja dolazi do snižavanja graničnih temperatura  $A_{c3}$  i  $A_{c1}$  pri čemu se temperatura  $A_{c3}$  snižava brže pa time i temperaturno područje Fe-C u kojem se izlučuje ferit postaje sve uže. Austenit u ovom metastabilnom stanju naziva se pothlađeni austenit. Pri određenoj brzini gašenja temperature  $A_{c3}$  i  $A_{c1}$  se spajaju u jednu temperaturu  $A_r$ , čime je volumni udio ferita potpuno nestao, a volumni udio perlita se povećao (slika 1b). Ukoliko se brzina gašenja i dalje

povećava, doseže se donja kritična brzina gašenja ( $v_{kd}$ ). Ohlađivanje pothlađenog austenita donjom kritičnom brzinom gašenja smanjuje difuziju ugljika iz austenitnih zrna i te uz feritno-perlitnu mikrostrukturu nastaje mikrostrukturna faza bainit. Daljnje povećanje brzine ohlađivanja do iznosa gornje kritične brzine gašenja ( $v_{kg}$ ) praktički zaustavlja difuzijske pretvorbe austenita i na temperaturi  $M_s$  započinje bezdifuzijska pretvorba pothlađenog austenita u martenzit (slika 1c). Martenzitna mikrostruktura posjeduje najveću vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i tvrdoću koju čelik određenog kemijskog sastava može postići.



Slika 1. Utjecaj brzine hlađenja na fazne pretvorbe podeutektoidnog čelika [1]

Gornja kritična brzina gašenja je ona najmanja brzina ohlađivanja kod koje iz pothlađenog austenita nastaje potpuno martenzitna mikrostruktura, a uobičajeno se računa prema izrazu[6]:

$$v_{kg} = \frac{\vartheta_A - \vartheta_i}{t_{i \min}}, \quad \text{K/S} \quad (2.1)$$

gdje su :

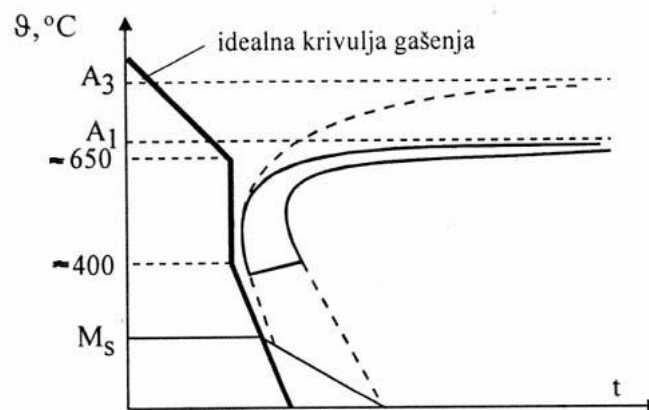
$\vartheta_A$  – temperatura austenitizacije, K

$\vartheta_i$  – temperatura inkubacije, K

$t_{i \min}$  – minimalno vrijeme inkubacije pothlađenog austenita, s

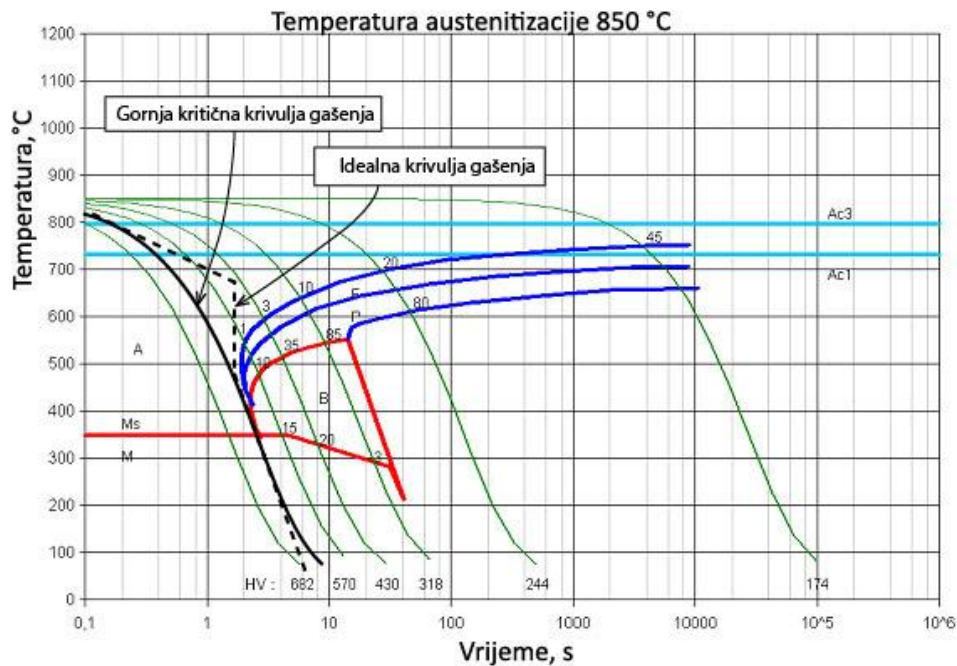
Na visokim temperaturama, oko temperature  $A_1$ , poželjno je sporije ohlađivanje čelika, kako bi se smanjila opasnost od pojave velikih temperaturnih gradijenata po presjeku obradka i time velikih toplinskih naprežanja. Na visokim temperaturama čelik je u stanju snižene granice tečenja i povišene duktilnosti pogodne za nastanak plastičnih deformacija i pukotina. Snižanjem temperature pothlađenog austenita u temperaturno područje minimalnog vremena inkubacije, prema kontinuiranom TTT dijagramu (slika 1c) nužno je postići vrlo brzo ohlađivanje i time omogućiti bezdifuzijsku martenzitnu pretvobu, bez pojave perlita ili

bainita. Brzim pothlađenjem austenita do temperature  $M_s$ , ostvareni su uvjeti za vremenski neovisnu martenzitnu pretvorbu, čija kinetika ovisi samo o temperaturi pothlađenja austenita ispod  $M_s$  temperature, ali ne i o brzini gašenja. Brzina gašenja čelika u temperaturnom području između temperature početka ( $M_s$ ) i završetka martenzitne pretvorbe  $M_f$  bi trebala biti manja od nadkritične brzine gašenja, tim više što je obradak debljeg poprečnog presjeka i čelik osjetljiviji na pukotine. U području martenzitne pretvorbe uz već postojeća toplinska naprezanja neizbježno nastaju transformacijska naprezanja, kao posljedica stvaranja martenzita i povećanja specifičnog volumena kaljenog čelika. Stoga je, u području oko i ispod  $M_s$  temperature uvijek preporučljivo smanjiti brzinu gašenja i postići što manje iznose toplinskih naprezanja. Opisana kinetika ohađivanja sa zahtjevima na tijek krivulje gašenja može se prikazati tzv. idealnom krivuljom gašenja (slika 2).



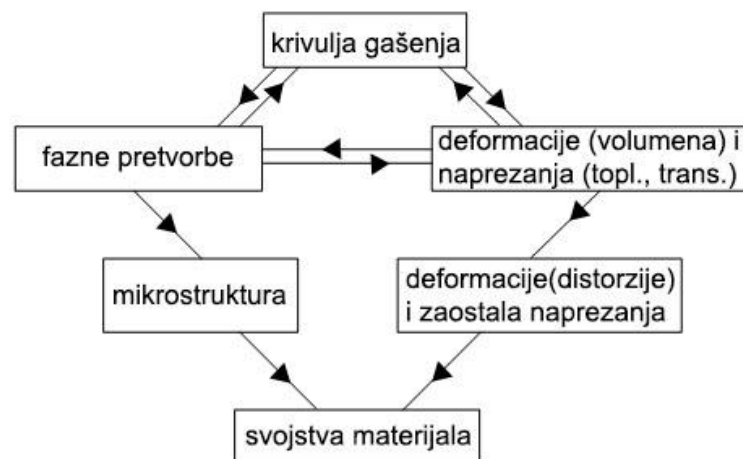
Slika 2. Konstrukcija idealne krivulje gašenja [6]

Idealna krivulja gašenja može se konstruirati za svaki kaljivi čelik na temelju njegovog kontinuiranog TTT dijagrama. Odnos idealne i gornje kritične krivulje gašenja za ugljični čelik C45E prikazan je na slici 3. Iz tijeka idealne krivulje gašenja mogu se očitati karakteristične temperature i vremena gašenja u kojima treba promijeniti brzinu hlađenja. Iz tijeka gornje kritične krivulje gašenja određuje se brzina gašenja  $v_{kg}$  koju je preporučljivo ostvariti u temperaturnom intervalu između 650 do 400 °C, odnosno nužno na temperaturi  $\Theta_i$ , gdje je vrijeme inkubacije pothlađenog austenita minimalno.



**Slika 3. TTT dijagram za čelik C45E prema [15] s ucrtanom gornjom kritičnom i idealnom krivuljom gašenja**

Tijek krivulja hlađenja u konkretnom čeličnom obratku u pravilu se razlikuje od idealne i gornje kritične krivulje gašenja zbog niza utjecajnih čimbenika (oblik i geometrija obratka, toplinska svojstva čelika, koeficijent prijelaza topline, vrsta sredstva za gašenje, parametri gašenja itd.), no u praksi se teži ostvarenju gašenja prema ovim krivuljama. Utjecaj tijeka i dinamike gašenja na mikrostrukturu i svojstva kaljenog čelika shematski je prikazan na slici 4.



**Slika 4. Višestruki utjecaji ostvarene krivulje ohlađivanja na svojstva kaljenog čelika [1]**

Kao što je već napomenuto brzo gašenje čelika ne rezultira samo željenim mehaničkim svojstvima već i toplinskim i transformacijskim naprezanjima kao nuspojavom. Ta naprezanja uzrokuju promjene dimenzija i oblika, a mogu dovesti do loma obratka. Slika 4 prikazuje

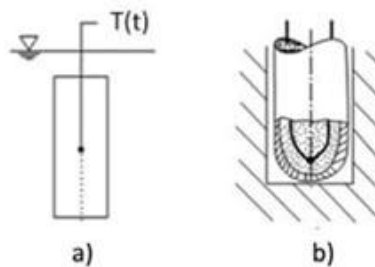
povezanost i međusobne utjecaje brzine gašenja, mikrostrukture i unutarnjih naprezanja.

Brzina gašenja utječe na fazne transformacije čelika, a istovremeno se zbog mikrostrukturnih promjena javlja latentna toplina koja utječe na krivulju gašenja. Fazne transformacije austenita tijekom hlađenja uzrokuju povećanje volumena. Istovremeno čelik lokalno kontrahira smanjenjem temperature. Kao posljedica lokalne promjene temperature i mikrostrukture nastaju nejednolike promjene volumena u obratku koje uzrokuje toplinska i transformacijska i naprezanja. Stvorena naprezanja utječu na tijek faznih transformacija i povećanje volumena. Iz povezanosti različitih pojava pri gašenju proizlazi potreba za optimizacijom krivulje ohlađivanja i potreba za djelovanjem vanjske pobudom na dinamiku ohlađivanja jer na sobnoj temperaturi sve ove pojave rezultiraju određenim svojstvima materijala [1].

### 3. Ispitivanje karakteristika sredstva za gašenje

#### 3.1. Temperaturne probe

Kako bi se predvidjelo da li će neko tekuće sredstvo za gašenje osigurati potreban intenzitet gašenja uobičajeno se provodi ispitivanje krivulje hlađenja temperaturnim probama, s jednim ili više termoelemenata. Uobičajeni položaj temperaturne probe u ispitivanom sredstvu za gašenje prikazan je na slici 5a, a uobičajena izvedba termoelementa s zaštitom od visokotemperaturne oksidacije prikazana je slikom 5b.



**Slika 5. Presjek temperaturne probe u sredstvu i položaj termopara u zaštitnom materijalu [1]**

U literaturi su opisane različite vrste temperaturnih proba za ispitivanje krivulja gašenja, temperaturne probe u obliku valjka ili kugle od niskougličnog ili nehrđajućeg čelika te od srebra ili aluminija [14]. Međunarodnom normom ISO 9950 je propisana temperaturna proba od legure Inconel 600. Također su u primjeni temperaturne probe od srebra prema japanskoj normi JIS K 2242 te francuskoj normi AFNOR NFT-60778 i dr. ( tablica 1, tablica 2).

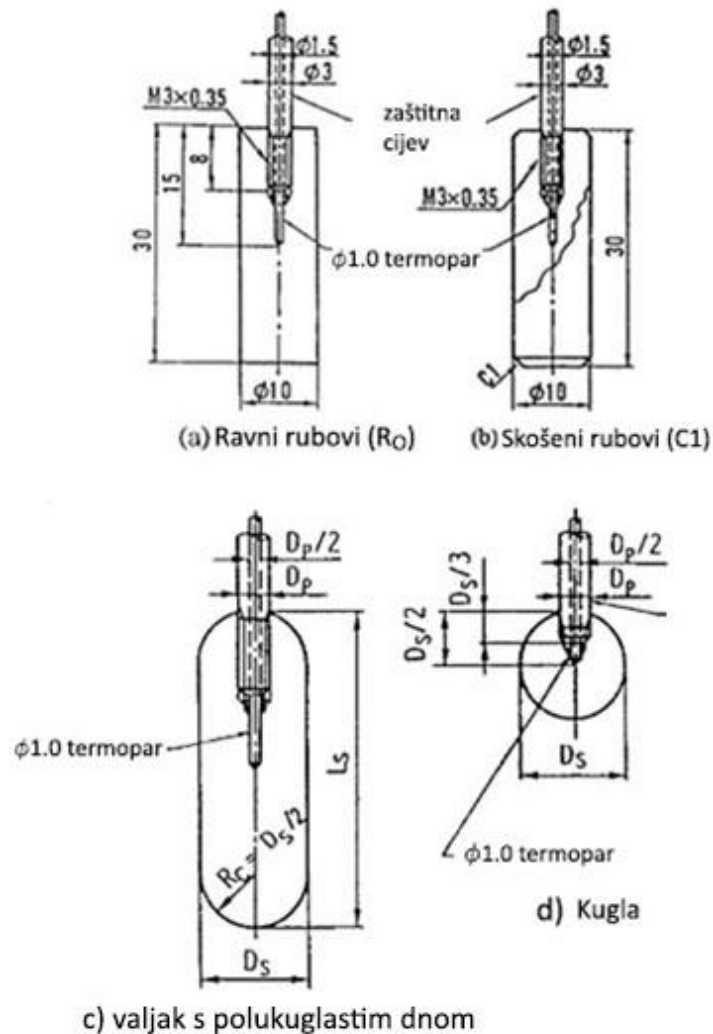
Istraživanja konstrukcije optimalne temperaturne probe za snimanje krivulja hlađenja još nisu u potpunosti završena. Uvid u složenost problematike konstrukcije temperaturne probe prikazuje slika 6 na primjeru JIS probe izrađene od srebra. Na slici 6 prikazane su četiri konstrukcijske varijante ove probe, a na slikama 7 do 9 krivulje hlađenja snimljene u istom sredstvu za gašenje s različitim probama.

**Tablica 1. Usporedba različitih normi za ispitivanje krivulja gašenja [14]**

Svojstvo	ISO 9950 (međunarodna)	AFNOR NFT-60778 (francuska)	JIS K 2242 (japanska)	ZB E 45003-88 (kineska)	ASTM (SAD)
Materijal	Inconel 600	Srebro, 99,999 %	Srebro, 99,99 %	Srebro, 99,96 %	Inconel 600
Dimenzija, promjer x duljina, mm	12,5 x 60	16 x 48	10 x 30	10 x 30	12,5 x 60
Referentno ulje	<i>Pogledati tablicu 2</i>	Pogledati tablicu 2	Diocetyl phthalate	Diocetyl phthalate	<i>Pogledati tablicu 2</i>
Dimenzije posude	Ø115±5 mm	Ø 99x138 mm	300 ml	300 ml	Ø115±5mm
Volumen ulja, ml	2000	800	250	250	2000
Temperatura ulja, °C	40±2	50±2	80, 120, 160	80±2	40±2
Temp. probe, °C	850±5	800±5	810±5	810±5	850±5

**Tablica 2. Fizikalna svojstva referentnog ulja za kaljenje [14]**

Fizikalno svojstvo	Najmanja vrijednost	Najveća vrijednost
Kinematička viskoznost na 40°C, eSt*	19,0	23,0
Kinematička viskoznost na 100°C, eSt*	3,9	4,4
Index kinematičke viskoznosti	95	105
Gustoća na 15 °C, kg/l	0,855	0,870
Točka zapaljenja, °C	190	210
*1eSt = 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s		

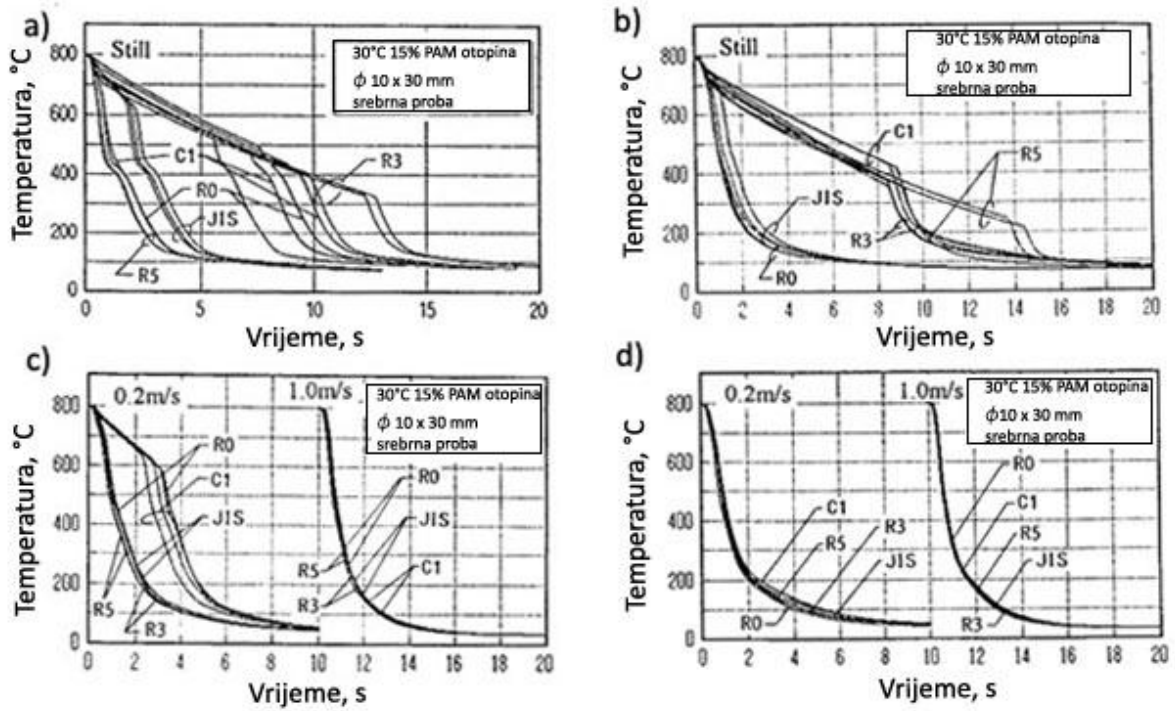


**Slika 6. Različiti oblici proba za ispitivanje utjecaja oblika na krivulju ohlađivanja [10]**

Na slici 7 je prikazan utjecaj oblika probe na krivulju hlađenja 15%-tne vodene otopine polimera PAM. Iz slike 7a i b je vidljivo rasipavanje krivulja gašenja je kod mirnog sredstva za gašenje. Pretpostavlja se da je rezultat tome smanjena stabilnost parnog omotača na oštrim rubovima probe, a ista pojava je uočena i kod gašenja u vodi. Pojava slabe ponovljivosti rezultata snimanja krivulja hlađenja u radu [10] objašnjena je utjecajem oštih rubova probe koji prekidaju kontinuitet parnog omotača. No čak i temperaturne probe s zaobljenim rubovima kod ispitivanja bez pokretanja medija ponekad daju slabu ponovljivost rezultata.

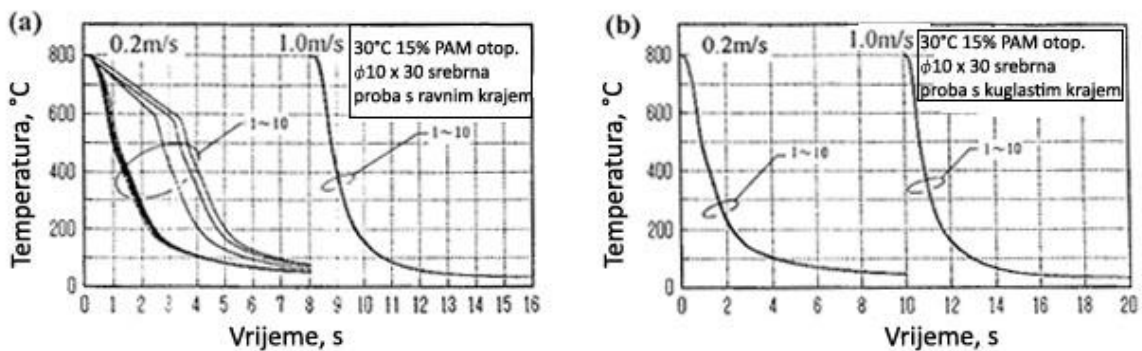
Na slici 7c i d vidljivo je da se razlike u krivuljama dobivenim različitim probama smanjuju s povećanjem brzine cirkulacije sredstva za gašenje čime se smanjuje utjecaj parnog omotača. Ovdje je vidljivo simultano djelovanje različitih parametara (oblik probe i svojstva vezana za medij) na dobivene rezultate mjerenja.





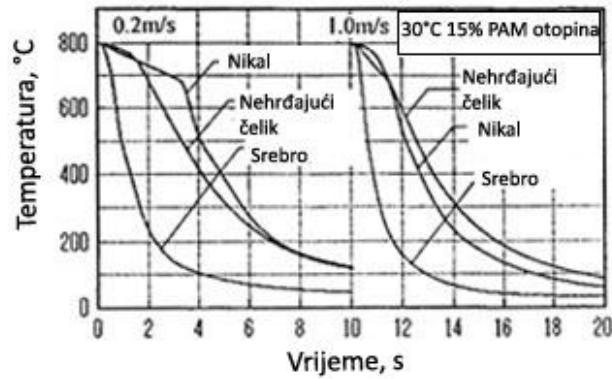
Slika 7. Zajednički utjecaj oblika i cirkulacije sredstva za gašenje [10]

Na slici 8 vidljivo je da je ponovljivost mjerenja puno manja na probi s ravim dnom (slika 8a) u odnosu na kuglastu probu (slika 8b).



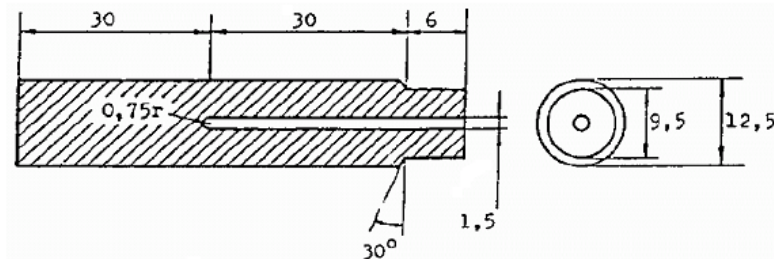
Slika 8. Rezultati mjerenja krivulja hlađenja s cilindričnom i polukuglastom probom [10]

Na slici 9 vidljiv je utjecaj materijala probe na rezultate mjerenja. Također, ovdje postaje jasno da se rezultati mjerenja u jednakim uvjetima ali s različitim materijalom probe ne smiju jednostavno uspoređivati.



Slika 9. Utjecaj materijala probe na dobivenu krivulju gašenja [10]

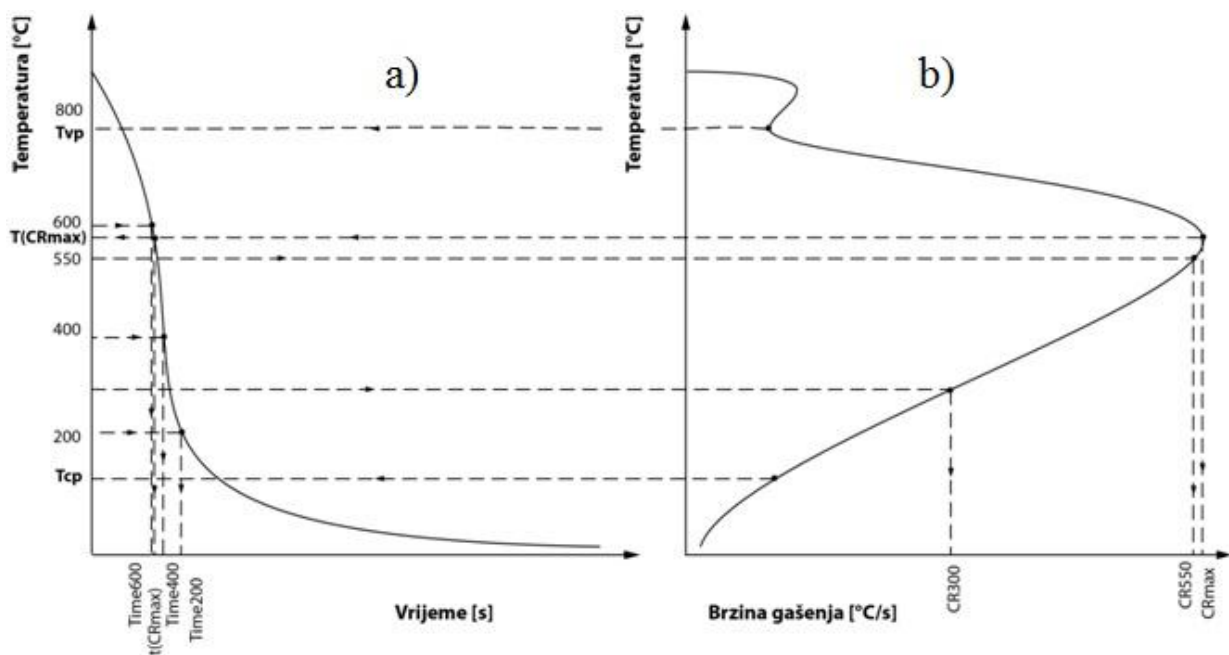
U radu će se za sve pokuse snimanja krivulje hlađenja koristiti ISO Inconel 600 proba prikazana na slici 10 i postupak ispitivanja propisan normom ISO 9950. Temperaturna proba prema normi ISO 9950 ima promjer 12,5 mm i dužinu 60 mm i izrađena je od niklove legure INCONEL 600. U središtu sonde nalazi se termoelement tipa K, (NiCr/NiAl). Termoelement je spojen na uređaj za prikupljanje i obradu mjernog signala (promjene napona termoelementa u ovisnosti o vremenu snimanja).



Slika 10. Temperaturna proba ISO 9950: 1995 [8]

### 3.2. Krivulja ohlađivanja i parametri ohlađivanja

Snimanjem promjene napona termoelementa u središtu ISO Inconel 600 temperaturne probe u ovisnosti o vremenu ohlađivanja i obradom rezultata mjerenja konstruira se krivulja ohlađivanja ispitivanog sredstva u koordinatnom sustavu „vrijeme hlađenja – temperatura“ (slika 11a). Numeričkom derivacijom snimljene krivulje „temperatura – vrijeme“ konstruira se krivulja „temperatura – brzina hlađenja“ (slika 11b). Obje krivulje se uobičajeno prikazuju i analiziraju zajedno. Pri tome postoji niz metoda za njihovu analizu i tumačenje. Mnoge od tih metoda uključuju određivanje maksimalne brzine gašenja ( $v_{max}$  ili  $CR_{max}$ ) i njoj pripadajuće temperature i vremena ( $T(CR_{max})$ ), trajanje faze parnog omotača i vrijeme potrebno da se temperatura smanji unutar nekog zadanog intervala, na primjer od 800 do 500°C ( $t_{8/5}$ ) i dr..



Slika 11. Osnovni parametri gašenja određeni s krivulje ohlađivanja

U literaturi se iz krivulja ohlađivanja (gašenja) uobičajeno koriste slijedeći osnovni parametri gašenja karakteristični za ispitivano sredstvo za gašenje [7]:

**CR<sub>max</sub>**: Najveća brzina hlađenja. Najveća brzina hlađenja i temperatura na kojoj se pojavljuje moraju biti dovoljno visoke da se izbjegne pretvorba austenita u ferit i perlit,

**T(CR<sub>max</sub>)**: Temperatura na kojoj nastaje najveća brzina hlađenja,

**t(CR<sub>max</sub>)**: Vrijeme do postizanja najveće brzine hlađenja,

**T<sub>vp</sub>**: Temperatura pri kojoj dolazi do prijelaza iz parne faze u fazu vrenja,

**T<sub>cp</sub>**: Temperatura pri kojoj dolazi do prijelaza iz faze vrenja u fazu konvekcije,

**Theta 1**: Temperatura pri kojoj dolazi do prijelaza iz parne faze u fazu vrenja prema francuskoj normi NFT 60178,

**Theta 2**: Temperatura pri kojoj dolazi do prijelaza iz faze vrenja u fazu konvekcije prema francuskoj normi NFT 60178,

**CR300**: Brzina hlađenja pri 300°C,

**CR550**: Brzina hlađenja pri 550°C,

**Time600**: Vrijeme potrebno za dostizanje temperature 600°C ,

**Time400**: Vrijeme potrebno za dostizanje temperature 400°C ,

**Time200**: Vrijeme potrebno za dostizanje temperature 200°C ,

Najvažnije od navedenih vrijednosti označene su na slici 11.

Osim navedenih osnovnih parametara gašenja iz krivulje gašenja se može odrediti i srednja vrijednost koeficijenta prijelaza topline, odnosno njegova ovisnost o temperaturi površine probe. Proračun koeficijenta prijelaza topline moguće je, ovisno o vrsti temperaturne probe, provesti na dva načina :

- direktnim proračunom provođenja topline, za temperaturne probe koje se u ispitivanom sredstvu ponašaju kao toplinski dobro vodljiva tijela (npr. temperaturne probe od srebra), odnosno
- inverznim proračunom provođenja topline za temperaturne probe kod kojih se ne može zanemariti raspodjela temperature po presjeku probe uslijed slabije toplinske vodljivosti (npr. ISO Inconel 600 proba).

Kriterij za razlikovanje toplinski dobo vodljivih temperaturnih proba od onih slabije vodljivih je kriterij Biotovog broja. Biotov broj računa se prema izrazu (3.2) : [16]

$$Bi = \frac{\alpha \left( \frac{V}{A} \right)}{\lambda}, \quad (3.1)$$

gdje je  $\alpha$  koeficijent prijelaza topline (W/m<sup>2</sup>K),  $\frac{V}{A}$  omjer volumena i površine obratka (m),  $\lambda$  koeficijent toplinske vodljivosti (W/mK).

Ako je  $Bi \leq 0,25$  riječ je o termodinamički tankom predmetu, a inače ( $Bi > 0,25$ ) tijelo se smatra termodinamički masivnim (debelim).

Direktni proračun koeficijenta prijelaza topline je moguć uz pretpostavku jednolične raspodjele temperature po cijelom presjeku probe (a to je u slučaju  $Bi \leq 0,25$ ). Što je promjer

probe manji, a njena toplinska vodljivost veća to je vjerojatnija jednolična raspodjela temperature. Srebro je izvrstan vodič topline, a promjer srebrne probe je mali tako da je kod nje dopušten direktan proračun prema sljedećem izrazu [10] :

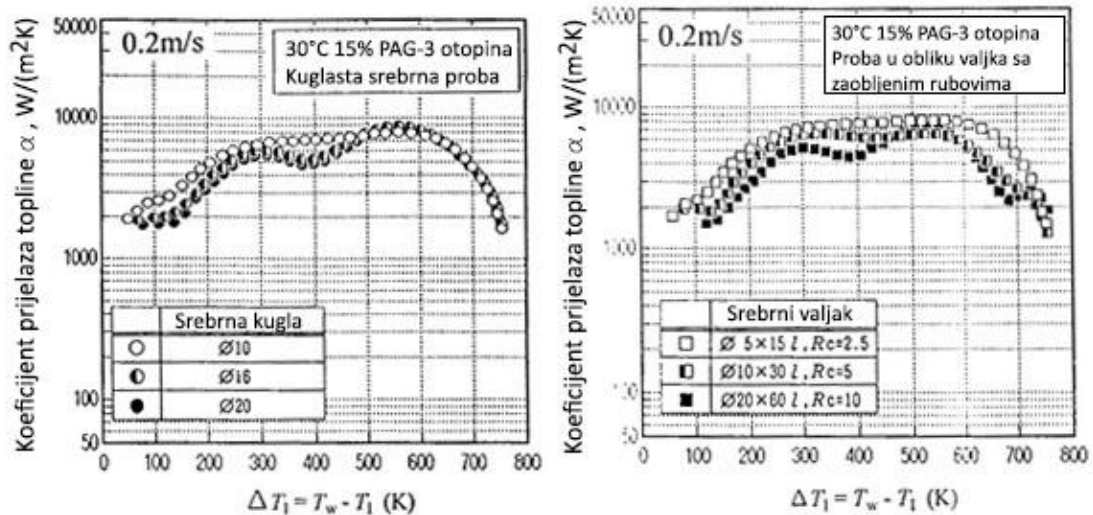
$$\phi = \alpha A (T - T_1) = -c \rho V \frac{dT}{dt}, [\text{W}] \quad (1)$$

gdje je  $\alpha$  koeficijent prijelaza topline,  $A$  ploština probe,  $T$  temperatura probe,  $T_1$  temperatura medija,  $c$  specifični toplinski kapacitet,  $\rho$  gustoća probe,  $V$  volumen probe, a  $dT/dt$  je brzina hlađenja probe.

Uz pretpostavku jednolične temperature u probi i uvažavanje temperaturno ovisne promjene specifičnog toplinskog kapaciteta probe  $c(T)$  sada se koeficijent prijelaza topline i/ili gustoća toplinskog toka mogu izračunati prema izrazu [10]:

$$q = \alpha (T_c - T_1) = -c(T) \rho V \frac{dT_c}{dt}, [\text{W}/\text{m}^2] \quad (2)$$

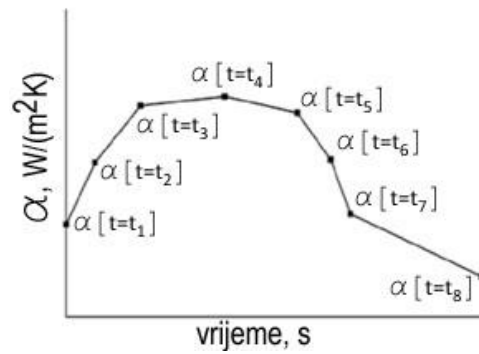
gdje je  $T_c$  temperatura u jezgri probe a  $dT_c/dt$  brzina gašenja određena iz krivulje gašenja metodom najmanjih kvadrata odstupanja [10]. Primjer direktnog proračuna koeficijenta prijelaza topline za temperaturne probe od srebra različitog oblika i promjera ohlađivane u istom sredstvu za gašenje i istim uvjetima gašenja prikazan je na slici 12. Iz nje se uočava da su koeficijenti prijelaza topline za probe manjeg promjera (kugla promjera od 10 i 20 mm te valjak promjera od 5 mm) gotovo identični. Za probe većeg promjera vrijednosti koeficijenta prijelaza topline nešto su niže od onih određenih kod manjih proba, što je očekivano obzirom da je koeficijent prijelaza topline ovisan između ostalog i o obliku i promjeru probe. Kod proba većeg promjera također dolazi do izražaja kašnjenje u odzivu termoelementa na promjene temperature na površini probe zbog pojave raspodjele temperature po presjeku probe. Raspodjela temperature po presjeku probe još više dolazi do izražaja kod ISO Inconel 600 probe zbog značajno manje toplinske vodljivosti legure Inconel 600 u odnosu na tehnički čisto srebro. Stoga se proračun koeficijenta prijelaza topline kod ISO Inconel 600 probe uobičajeno provodi rješavanjem inverznog problema provođenja topline.



Slika 12. Utjecaj veličine probe na koeficijent prijelaza topline [10]

( $T_w$  – temperatura probe,  $T_1$  – temperatura sredstva)

U radu je za proračun koeficijenta prijelaza topline korišten računalni program *ivf SQintegra*. Proračun koeficijenta prijelaza topline (ovisnog o temperaturi) u ovom računalnom programu temelji se na inverznom problemu provođenja topline. Osnovni ulazni podatak za predviđanje koeficijenta prijelaza topline na površini temperature probe je krivulja hlađenja (temperatura-vrijeme krivulja) snimljena termoparom u jezgri probe. Suprotno od izravnog (direktnog) proračuna provođenja topline ovdje je potrebno odrediti uzrok poznavajući posljedice. Uzrok nastanka određene krivulje hlađenja  $T(t)$  je promjena vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ovisnog o temperaturi,  $\alpha(T)$ . Računalni program *IVF SQintegra* u sebi sadrži ugrađen algoritam proračun površinske temperature probe i o njoj ovisnog koeficijenta prijelaza topline inverznom metodom. Za rješavanje inverznog problema provođenja topline u temperaturnoj probi pretpostavlja se da se promjena koeficijenta prijelaza topline ovisnog o površinskoj temperaturi, odnosno vremenu hlađenja  $\alpha(t)$ , može aproksimirati određenim brojem linearnih funkcija spojenih u poligon, slika 13.



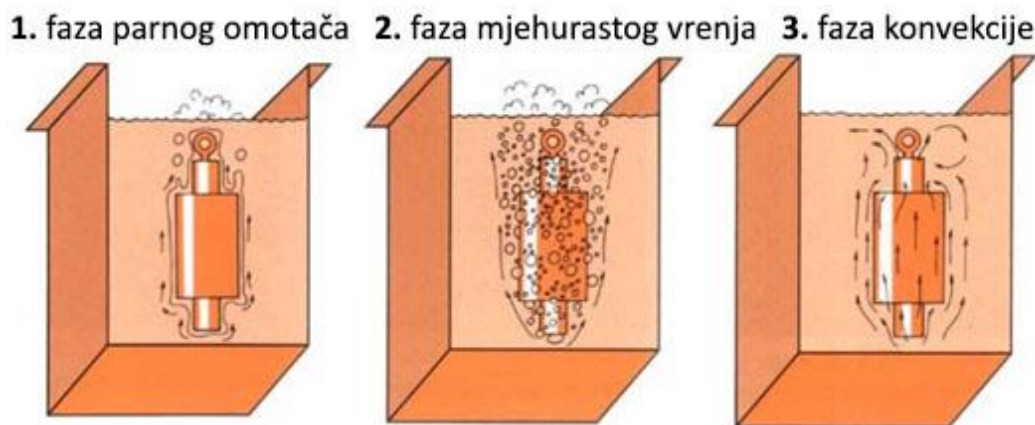
**Slika 13. Aproximacija koeficijenta prijelaza topline s više linearnih funkcija**

Vrijednosti koeficijenta prijelaza topline u čvorovima aproksimacijskog poligona određuju se numeričkim iteracijskim rješavanjem diferencijalne jednačbe provođenja topline kroz presjek probe. Pri tome se numeričkim iteracijama traži oblik aproksimacijskog poligona  $\alpha(t)$  koji će za rješenje diferencijalne jednačbe provođenja topline dati upravo snimljenu krivulju hlađenja u središtu temperaturne probe. Ovo iteracijsko usklađivanje nepoznatog rubnog uvjeta ( $\alpha(t)$ ) i poznate krivulje hlađenja obavlja se istovremeno za određeni broj zadanih točaka aproksimacijskog poligona, odnosno za određeni zadani vremenski korak dok se ne postigne zadano minimalno odstupanje snimljene i računanim programom predviđene krivulje hlađenja u centru probe.

### 3.3. Utjecajni čimbenici na krivulju ohlađivanja tekućeg sredstva za gašenje

#### 3.3.1. Leidenfrost-ov efekt

Tekuća sredstva za gašenje (isparive kapljevine: ulja za kaljenje, voda, vodene otopine polimera, nanofluidi na bazi vode ili ulja) podložna su Leidenfrostovom efektu, koji u značajnoj mjeri određuje tijek krivulje gašenja. Leidenfrostov efekt se sastoji u pojavi najmanje tri različiti stadiji (faze) hlađenja nakon uranjanja vrućeg obradka u sredstvo za gašenje: faza parnog omotača, faza mjehurastog vrenja i faza konvekcije (slika 14). Navedna tri stadija gašenja uobičajeno se pojavljuju tijekom gašenja u kapljevitim sredstvima kojima je temperatura vrelišta niža od temperature austenitizacije obradka.



Slika 14. Stadiji gašenja u sredstvima podložnim Leidenfrost-ovom efektu [11]

U prvoj fazi hlađenja oko obradka formira se parni omotač. Hlađenje je relativno sporo, a prijelaz topline odvija se zračenjem i provođenjem kroz parni omotač. Faza parnog omotača je posebno problematična jer uzrokuje znatno usporenje ohlađivanja. Tome je tako jer je u početku gašenja temperatura površine obradka viša od temperature sredstva za gašenje što uzrokuje formiranje stabilnog parnog omotača (filma) oko obradka. Film ima svojstvo izolatora što naravno uzrokuje navedeno usporenje hlađenja. Zbog takvog usporenog hlađenja moguće je da u obradku nastane nepredviđena mikrostruktura. Temperatura iznad koje je prisutan stabilan parni omotač zove se Leidenfrost-ova temperatura [1].

U drugoj fazi parni omotač se raspada, a medij za gašenje dolazi u dodir s vrućom površinom obradka što rezultira mjehurastim vrenjem i intenzivnim odvođenjem topline.

U trećoj fazi mjehurasto vrenje prestaje, a toplina se konvekcijom sporo odvodi u medij.

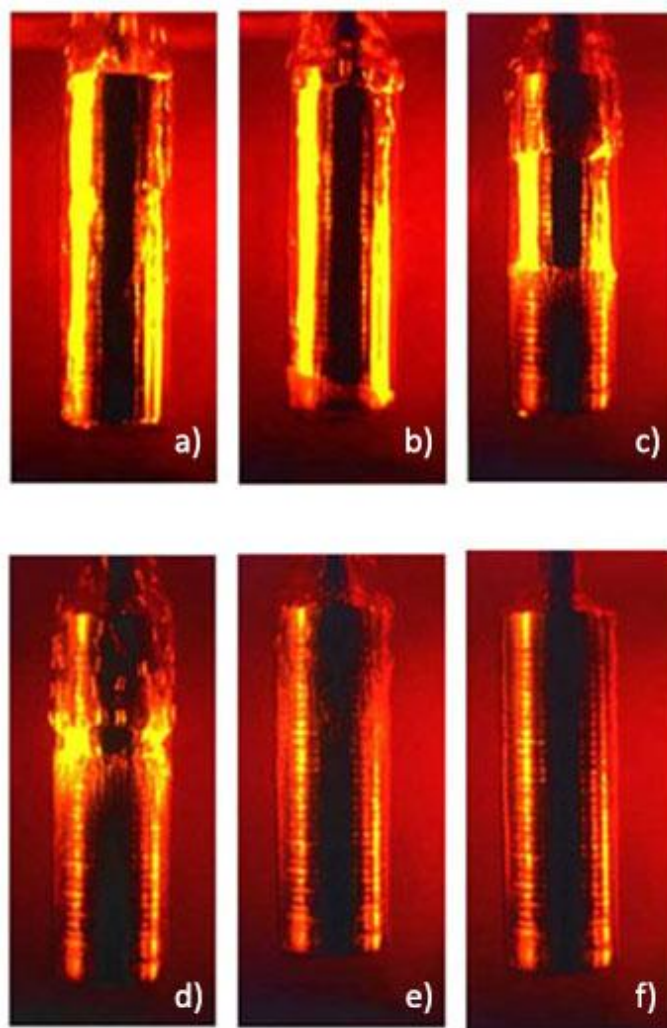


### 3.3.2. Kinematika kvašenja

Pri gašenju uranjanjem u bazen sa sredstvom podložnom Leidenfrostovom efektu faze gašenja se pojavljuju istodobno na različitim dijelovima površine obratka (slika 15). Pri tome je na dinamiku ohlađivanja obratka, odnosno temperaturene probe, najznačajniji utjecaj gibanja granice između faze parnog omotača i mjehurastog vrenja, tzv. fronta kvašenja.

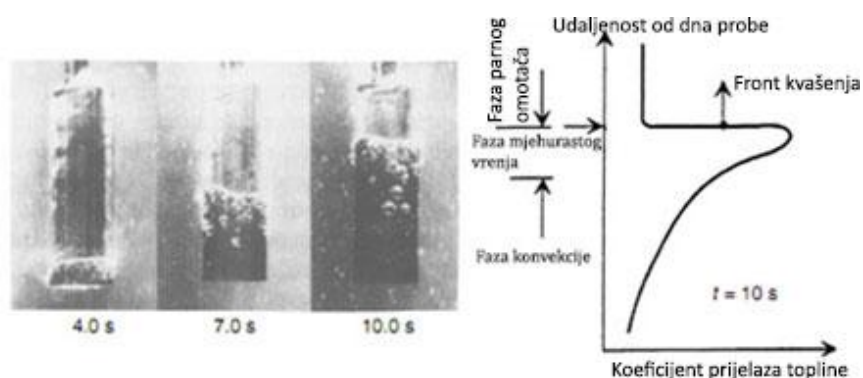
Front kvašenja kreće se od dna bazena ili kupke za gašenje prema vrhu. Ovo znači da će na obradku u isto vrijeme biti prisutno vrlo sporo ohlađivanje (parni omotač) i vrlo brzo ohlađivanje (mjehurasto vrenje) i što upućuje na nastanak naprezanja i deformacije unutar obradka. Na slici 15 vidljivi su slijedeći trenuci gašenja temperaturene probe:

- a) trenutak uranjanja i parni omotač oko obradka (prva faza),
- b) nakon pet sekundi na rubovima obradka počinje mjehurasto vrenje (druga faza),
- c) nakon deset sekundi front kvašenja napreduje prema vrhu obradka,
- d) nakon petnaest sekundi prisutni su parni omotač, mjehurasto vrenje i konvekcija,
- e) nakon trideset sekundi faza konvekcije (treća faza),
- f) nakon šesdeset sekundi završetak faze konvekcije.



Slika 15. Prikaz stadija gašenja tijekom kaljenja u ulju [11]

Analiza pojave i napredovanja fronta kvašenja prikazana je na slici 16, uz kvalitativni prikaz promjene koeficijenta prijelaza topline po kvašenoj površini temperaturne probe.



Slika 16. Napredovanje fronta kvašenja na čeličnom valjku [1]

Pomoću slike 16 i izraza (1), (2), (3) i (4) jasnija je veza između različitih stadija kvašenja i

temperатурне расподјеле у гашеном тијелу. Коэффициент пријелаза топлине с тијела на rashladno sredstvo математички је описан изразом [2]:

$$a = \frac{\Phi}{A(T_1 - T_2)}, \quad \frac{W}{m^2 K} \quad (3)$$

gdje je  $\Phi$  toplinski tok u W,  $A$  površina u  $m^2$ ,  $T_1$  temperatura tijela i  $T_2$  temperatura sredstva u K. Fourierovim zakonom dana je veza između toplinskog toka i raspodjele temperature u tijelu [2]:

$$\Phi = -\lambda \frac{dT}{dn} A, \quad W \quad (4)$$

gdje je  $\lambda$  toplinska provodnost u W/(m K), a  $n$  oznaka za koordinatu o kojoj ovisi temperatura. Vremenski temperaturni gradijent u krutom tijelu bez unutrašnjih toplinskih izvora je [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) \quad (5)$$

gdje je  $t$  vrijeme u s,  $a$  toplinska difuznost u  $m^2/s$ , a  $x$ ,  $y$  i  $z$  su lokalne koordinate.

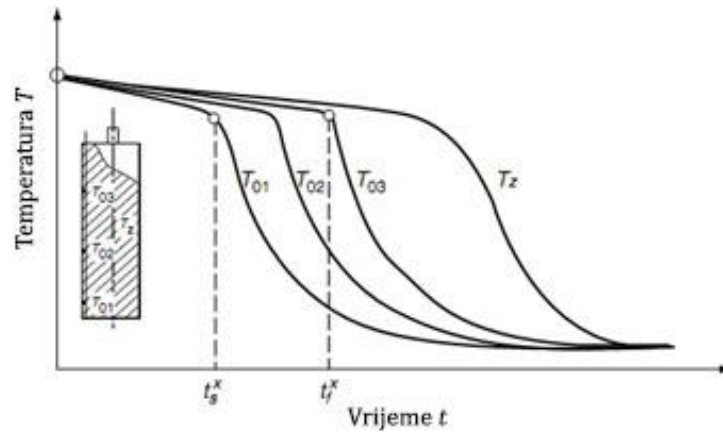
Prema izrazu (5) raspodjela temperatura u tijelu ne ovisi samo o lokalnim temperaturnim gradijentima već i o toplinskoj difuznosti :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}, \quad \frac{m^2}{s}. \quad (6)$$

Vremenski interval istovremene prisutnosti stadija parnog omotača i mjehurastog vrenja treba biti što manji, dakle brzina napredovanja fronta kvašenja mora biti velika. Na navedeno se može znatno utjecati sljedećim parametrima [1]:

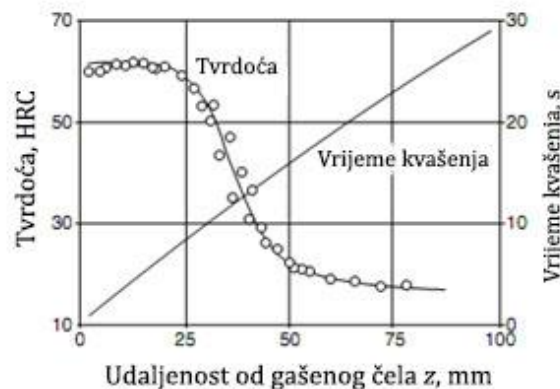
1. vrstom rashladnog medija (temperatura vrelišta, viskoznost, specifični toplinski kapacitet, površinska napetost),
2. dodacima u medij (i promjenom koncentracije istih),
3. temperaturom i brzinom mješanja medija,
4. toplinskim karakteristikama obradka,
5. hrapavošću i stanjem površine obradka,
6. geometrijom obradka.

Zbog postojanja određene brzine napredovanja fronta kvašenja djelovi na različitim visinama na površini predmeta postižu istu temperaturu u različitom vremenu, slično kao što je slučaj s površinom i jezgrom gdje je isto prisutno kašnjenje zbog toplinske vodljivosti materijala (slika 17).



**Slika 17. Određivanje kinematike kvašenja pomoću termoparova na različitim visinama predmeta [1]**

Za očekivati je da će sporo kvašenje rezultirati razlikama u tvrdoći po visini predmeta, dok će brzo kvašenje dati jednoličnu tvrdoću, minimizirati deformacije i vjerojatnost loma. Utjecaj vremena kvašenja na tvrdoću površine s obzirom na visinu čeličnog valjka prikazan je slikom 18.

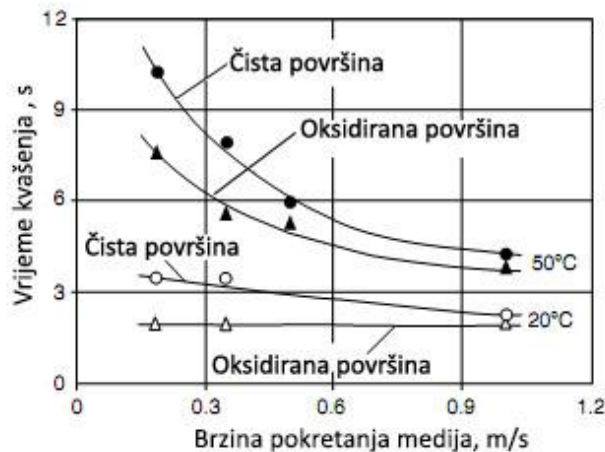


**Slika 18. Tvrdoća površine i vrijeme kvašenja kao funkcija udaljenosti od donjeg dijela čeličnog valjka\* [1]**

(\*čelik C45E, promjer 25 mm , duljina 100 mm , gašen s 850°C na 30°C, brzina gašenja 0,5m/s)

Brže kvašenje može se postići na primjer dodacima polimera u vodi te drugim metodama od kojih su neke ukratko opisane dalje u tekstu. Mogućnost djelovanja ultrazvuka na kinematiku kvašenja opisana je u eksperimentalnom dijelu rada. Nastoji se ostvariti gašenje prikazano shematski na slici 2 gdje je prikazana idealna krivulja gašenja.

Površinska hrapavost i oksidiranost površine probe ili obradka također značajno utječe na tijek hlađenja. Oksidni slojevi stvaraju površinsku hrapavost i imaju manju toplinsku vodljivost. Na slici 19 je prikazano vrijeme kvašenja austenitnog čelika ( $\phi 15 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ ) koji je ugrijan u peći sa zaštitnom atmosferom (spriječena oksidacija) i žaren u oksidirajućoj atmosferi 20 sati na  $820 \text{ }^\circ\text{C}$  (oksidirana površina) [1]. Očito je da čestice oksida na površini destabiliziraju parni omotač, pogotovo pri višim temperaturama medija i blažem pokretanju.

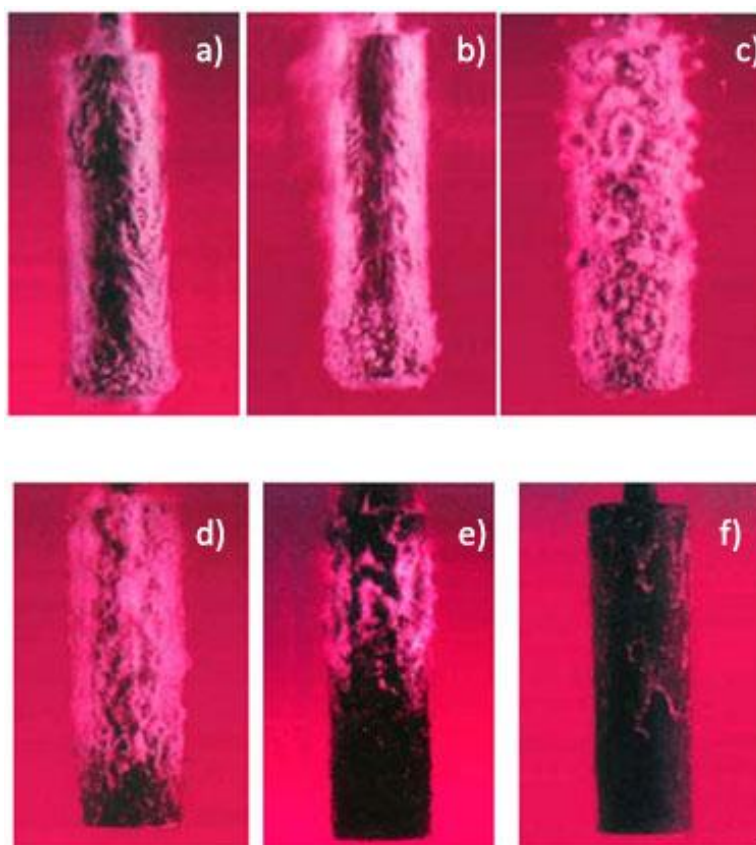


Slika 19. Utjecaj oksidacije površine na trajanje kvašenja [1]

### 3.3.3. Efekt inverzne topivosti polimera u vodi

Kod uporabe polimera pojavljuje se i dodatan efekt inverzne topivosti polimera u vodi kad se temperatura otopine snizi do određene temperature (oko  $85^\circ\text{C}$ ). Dakle odmah nakon uranjanja obradka u otopinu polimer koji je bio otopljen u vodi izlučuje se oko obradka i stabilizira parni omotač. To usporava hlađenje jer se produljuje faza parnog omotača, ali prednost je što jako ubrzava napredovanje fronta kvašenja, i tako istovremena prisutnost dvije različite faze ne traje dugo. Dodavanjem različitih količina polimera u vodu dobiva se određena mogućnost upravljanja krivuljom hlađenja, smanjuje se intenzitet hlađenja u odnosu na samu vodu pa su i manje deformacije nakon kaljenja. Na slici 20 vidljivo je:

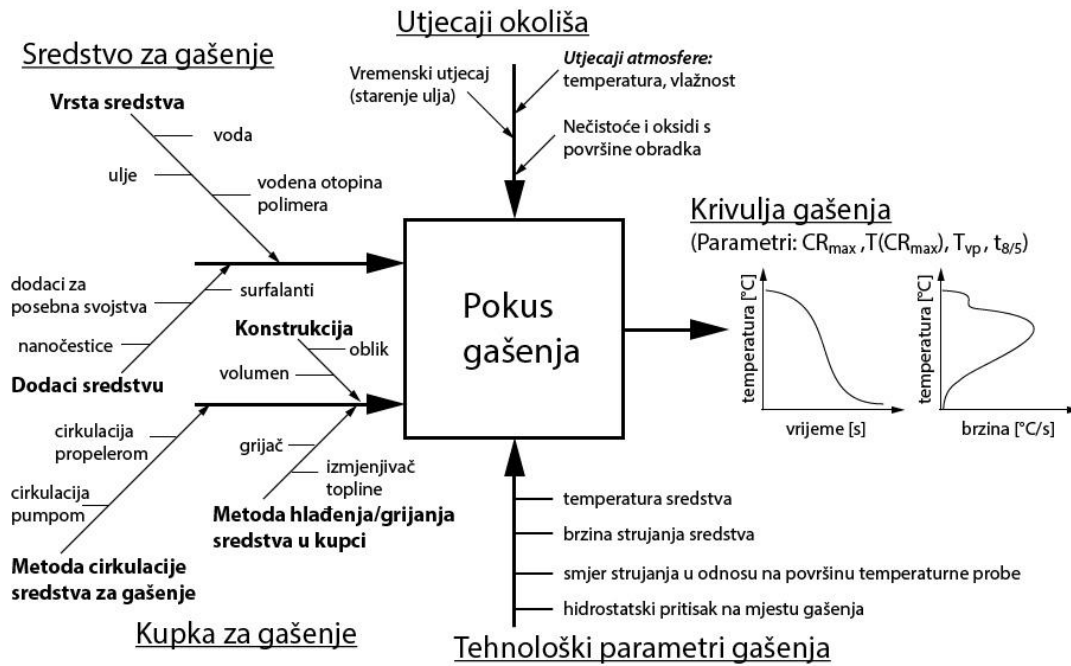
- u trenutaku uranjanja tanak film polimera stvara se na površini obradka,
- nakon 15 sekundi polimerni film se aktivira,
- nakon 25 sekundi na cijeloj površini javlja se mjehurasto vrenje,
- nakon 35 sekundi mjehurasto vrenje prestaje i faza konvekcije započinje,
- nakon 60 sekundi polimer se (ponovo) počinje otapati u otopini,
- nakon 75 sekundi polimerni sloj je potpuno nestao i toplina se odvodi konvekcijom.



Slika 20. Pojava inverzne topivosti polimera u vodi [11]

### 3.4. Sistematizacija utjecajnih čimbenika na krivulju hlađenja temperaturene probe

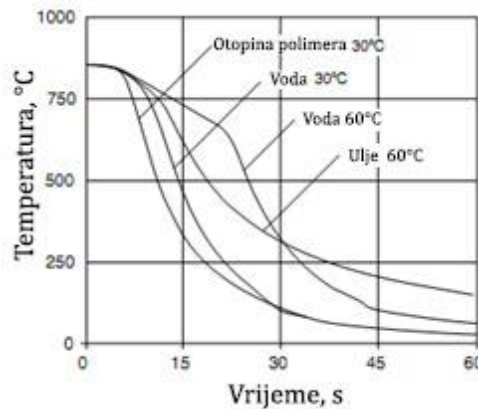
Na temelju dosadašnjih razmatranja uočeni su glavni utjecajni čimbenici na krivulju gašenja konkretnog ispitivanog sredstva za gašenje: vrsta sredstva cirkulacija odnosno gibanje sredstva za gašenje, temperatura sredstva, dodaci sredstvu, te oblik, veličina i materijal temperaturene probe. Identifikacija utjecajnih čimbenika na krivulju hlađenju ispitivanog sredstva za gašenje prikazana je na slici 21. Na nekoliko slijedećih primjera pokazat će se djelovanje navedenih utjecajnih čimbenika.



Slika 21. Identifikacija parametara procesa snimanja krivulje gašenja

### Utjecaj vrste sredstva za gašenje

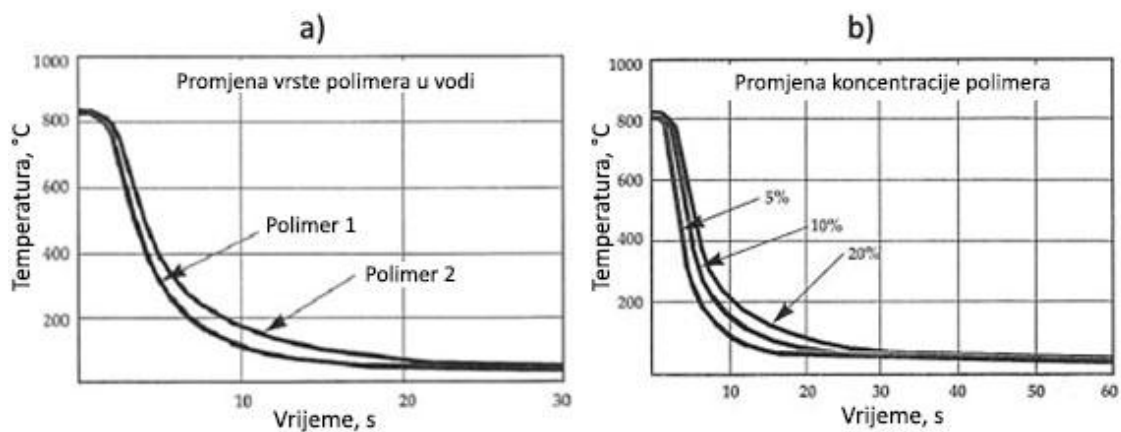
Krivulja ohlađivanja čelika u prvom redu ovisi o samom rashladnom mediju. Na slici 22 prikazan je utjecaj različitih vrsta medija na ohlađivanje čelične probe promjera 25 mm pri brzini hlađenja 0,6 m/s. Za jednake uvjete zabilježene su različite krivulje ohlađivanja.



Slika 22. Utjecaj različitih sredstava i temperature medija na hlađenje [10]

Naravno, unutar same vrste medija (ulje, polimer) postoje značajne razlike. Na primjer molekularne mase različitih polimera utječu na viskoznost polimernog omotača nastalog na visokim temperaturama, slika 23a. Povećanje viskoznosti znači i smanjenje brzine ohlađivanja. Nadalje, povećanje udjela polimera utječe na povećane debljine polimernog

omotača i također smanjuje brzinu ohlađivanja, slika 23b.

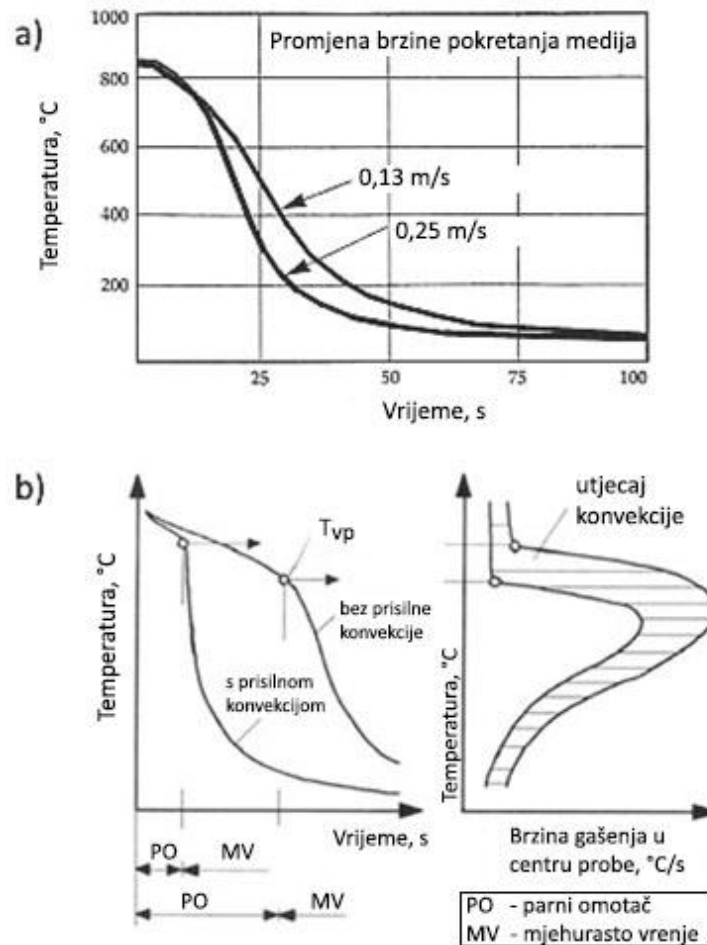


Slika 23. Utjecaj različitih tipova sredstva i koncentracije polimera [10]

### Utjecaj cirkulacije i miješanja sredstva za gašenje

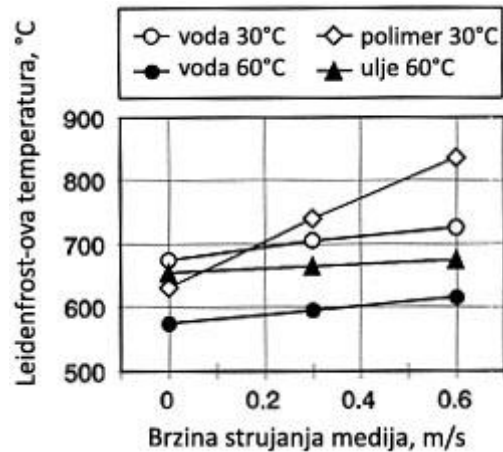
Pokretanje medija utječe na brzinu hlađenja obradaka u mediju za hlađenje. Koeficijent prijelaza topline raste s jačim pokretanjem (prisilna konvekcija), slika 24. Jača prisilna konvekcija smanjuje stabilnost parnog omotača tako što ga fizički para te tako sprečava istovremenu prisutnost parnog omotača i mjehurastog vrenja. [12]





Slika 24. Utjecaj cirkulacije sredstva za gašenje na krivulju gašenja [10]

Sa slike 25 vidljivo je da jače strujanje medija uzrokuje skraćenje prisutnosti parnog omotača i pomicanje Leidenfrost-ove temperature ( $T_{VP}$ ) u područje viših temperatura. Utjecaj pokretanja je najveći na vodenu otopinu polimera (10% polimera). Pri brzini 0,6 m/s polimer ne pokazuje prisutnost stabilnog parnog omotača. Zagrijavanjem vode s 30 na 60°C uzrokuje pad Leidenfrost-ove temperature za oko 100°C jer je temperatura vode bliže vrelištu vode, slika 25.

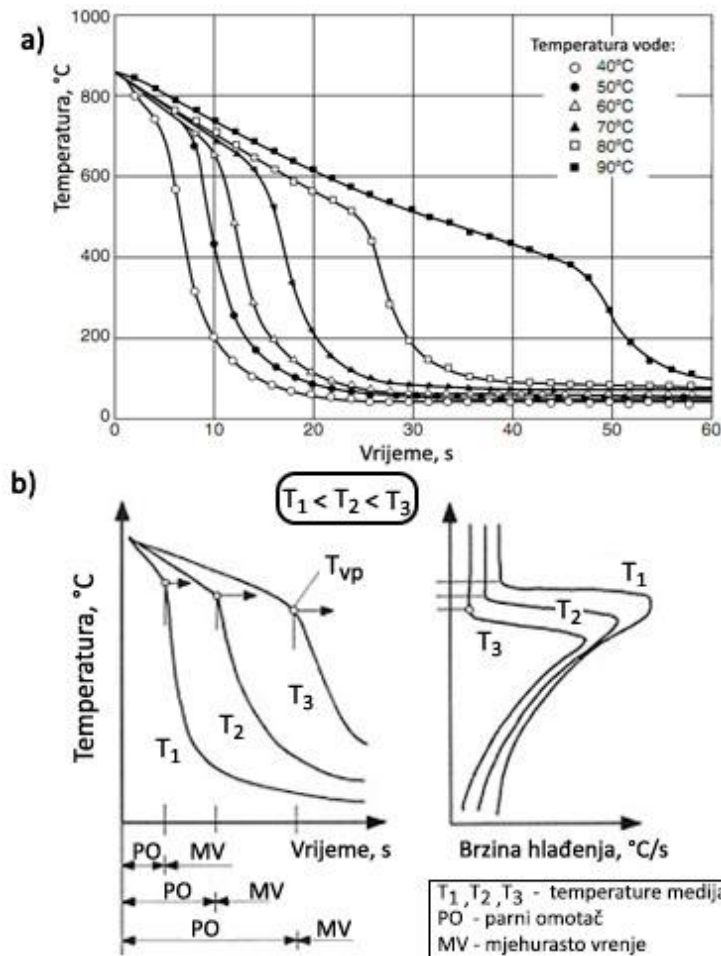


Slika 25. Utjecaj strujanja i temperatura medija na Leidenfrost-ovu temperaturu [12]

### Utjecaj temperature medija

Utjecaj temperature rashladnog medija ovisi o vrsti medija. Dok sposobnost hlađenja ulja ne ovisi značajno o temperaturi, za vodu i vodene otopine polimera vrijedi suprotno, slika 26. Porastom temperature medija energija potrebna za stvaranje pare je smanjena, a odvođenje topline smanjeno. Debljina parnog omotača je povećana, a povećano je i njegovo trajanje s obzirom da je prijelazna (Leidenfrost-ova) temperatura pomaknuta prema nižim temperaturama.

Utjecaj temperature vode na krivulju ohlađivanja Inconel 600 probe prikazan je slika 26a. Povećanjem temperature vode trajanje stadija parnog omotača se povećava. Prijelaz sa sporog na brzo hlađenje je odgođen, a brzine gašenja u sva tri stadija su smanjene. To je vidljivo i na slika 26b.



Slika 26. Utjecaj temperature medija na brzinu hlađenja i prijelaznu temperaturu [10]

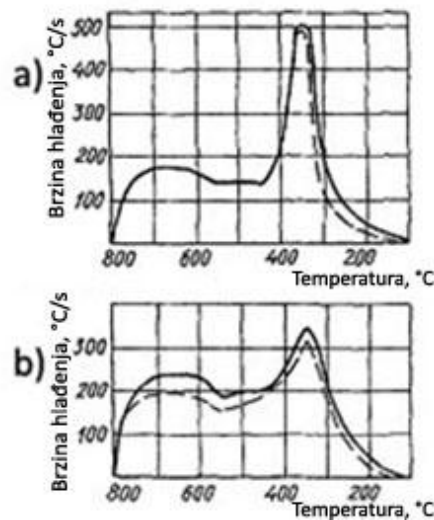
### Ultrazvučna uzbuda

Kako bi se postigla potrebna tvrdoća i minimalne deformacije čelik se na višim temperaturama (650-550°C) mora hladiti brzo, a na nižim (300°C) gdje nastaje martenzit sporije. Ulja (mineralna i biljna) u donjem temperaturnom području hlade sporije i deformacije su manje. Nedostatak ulja je preblago hlađenje u gornjem temperaturnom području gdje je poželjno brzo hladiti da se izbjegne nastanak manje tvrdoće od očekivane. Zato je važno da se tu poveća sposobnost hlađenja ulja. Jedan od mogućih načina je djelovanjem ultrazvuka, slika 27.



Slika 27. Shematski prikaz djelovanja ultrazvučne pobude na parni omotač [13]

Na slici 28 vidljiv je utjecaj ultrazvuka na tijek kaljenja cilindra promjera 10 mm i duljine 15 mm zagrijanih u električnoj peći na 800°C i hlađenih u transformatorskom ulju različitih temperatura. Ultrazvučna sonda je postavljena s donje strane medija. Na slikama 28a i b vidljivo je da na višim temperaturama ulja (160°C) za gašenje ultrazvuk jače dolazi do izražaja.

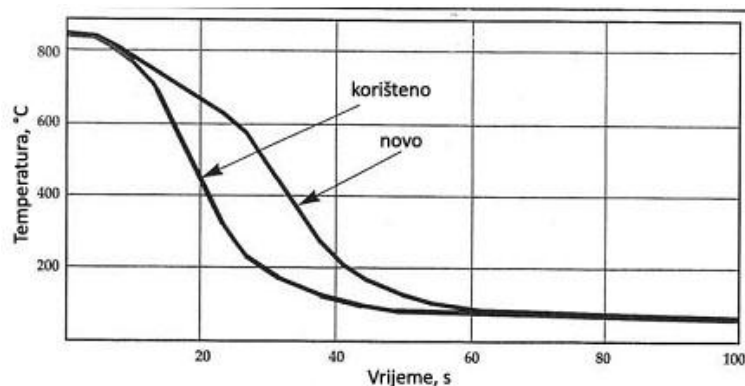


Slika 28. Djelovanje ultrazvuka na brzinu hlađenja [13]

- a) krivulja gašenja u centru srebrne probe u ulju 25°C  
 b) krivulja gašenja u centru srebrne probe u ulju 160°C  
 - - - bez ultrazvuka , — ultrazvuk

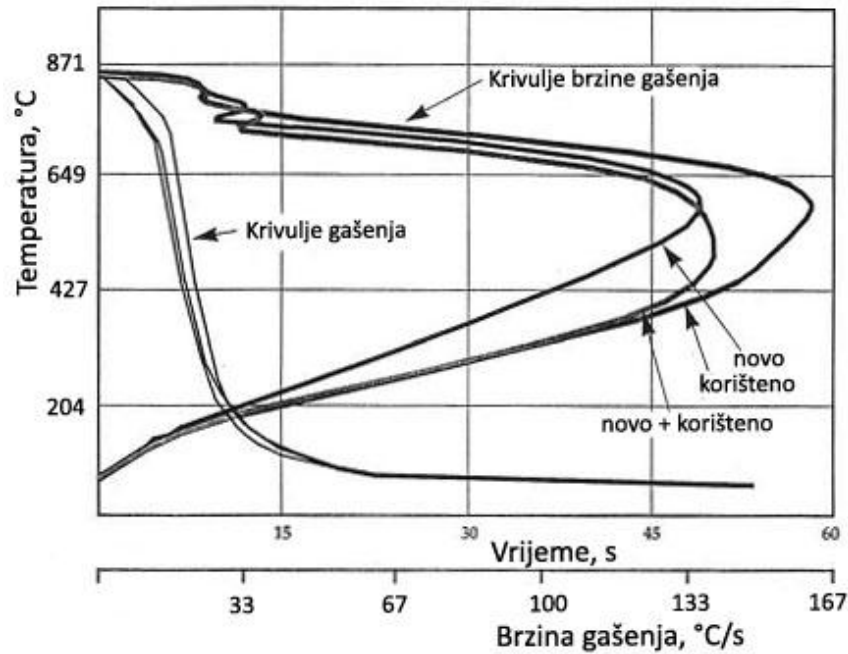
### 3.5. Utjecaj faktora okoliša na krivulju ohlađivanja

Prilikom analize krivulje gašenja treba biti na oprezu, jer krivulja gašenja samo potvrđuje da postoje razlike u prijenosu topline, međutim ona nema odgovor zašto je došlo do promjene u prijenosu topline. U sustav za provedbu kaljenja može se uključiti i neki faktori koje nismo predvidjeli, a koji mogu uzrokovati pogrešno tumačenje oblika krivulje. Na primjer ako tijekom uporabe dođe do značajne degradacije polimera, smanjit će se njegova molekularna masa, a kao posljedica toga će se brzina hlađenja povećati, slika 29. Ako se na umu nema mogućnost degradacije i molekularna masa se ne drži konstantnom (tako da se s vremenom stari medij izmjeni novim) može doći do velikih pogrešaka u tumačenju.



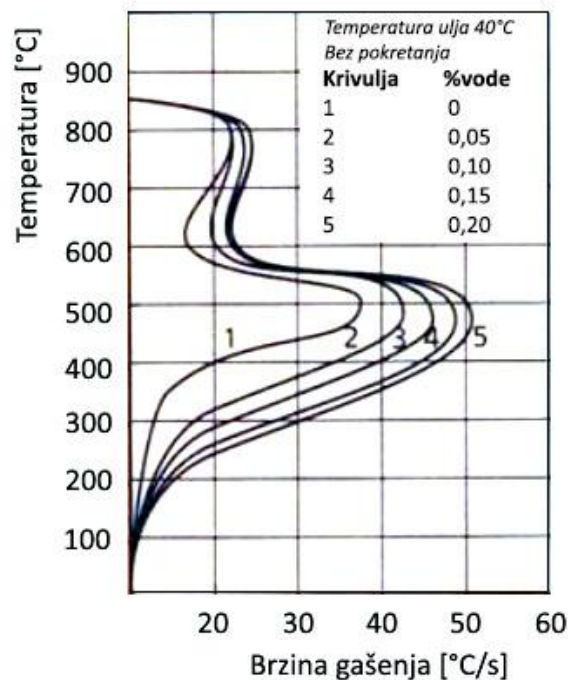
Slika 29. Utjecaj degradacije polimera [10]

Osim degradacije može doći i do osiromašenja otopine jer ponekad dio polimera prijanja na površinu uzorka i izlazi iz medija. Da bi se ovi i slični faktori utvrdili potrebno je izvršiti kemijska i fizikalna ispitivanja medija koja osim degradacije polimera uključuju ispitivanje viskoznosti, koncentracije inhibitora korozije, temperature odvajanje polimera, kontaminacije bakterijama i gljivicama [10]. A nakon toga moguće je zamjeniti dio medija novim, slika 30.



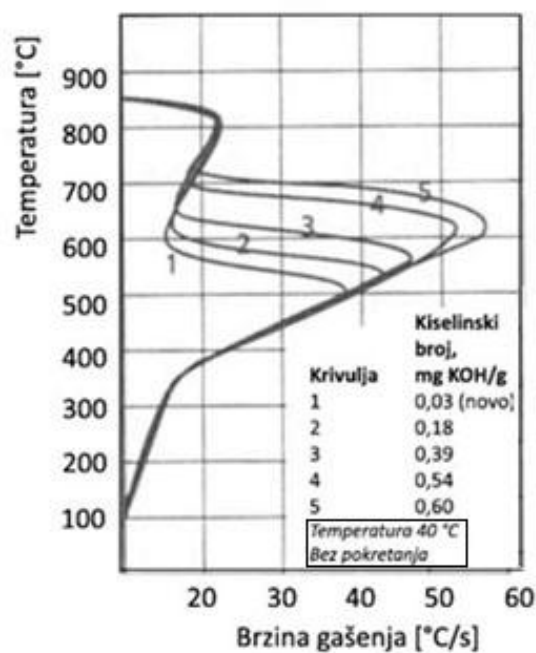
Slika 30. Utjecaj starosti i osiromašenja otopine na brzinu hlađenja [10]

Svojstva ulja za kaljenje se također mijenjaju zbog oksidacije, kotaminacije ili osiromašenja aditiva iz ulja. Promjene u viskoznosti ulja znače oksidaciju, toplinsku degradaciju ili prisutnost nečistoća. Prisutnost vode u ulju za kaljenje mora se obavezno izbjeći. Samo mala prisutnost vode (0,05%) utječe značajno na tijek hlađenja (slika 31), a može uzrokovati prisutnost mekih lokacija na obratku nakon kaljenja, deformacije i lom. Više od 0,5% vode uzrokuje pjenjenje i znatno povećava mogućnost požara.



Slika 31. Utjecaj primjese vode u ulju za kaljenje [11]

Na slici 32 prikazano je kako oksidacija ulja za gašenje utječe na krivulju hlađenja. Kako ulje oksidira stvaraju se organske kiseline koje se mogu izmjeriti. Oksidacija ulja destabilizira parni omotač i povećava brzinu hlađenja.



Slika 32. Utjecaj oksidacije ulja na brzinu gašenja [11]

Slično, temperatura medija mora se tokom cijelog provođenja ispitivanja držati konstantnom, jer u suprotnom bi porast temperature okoline mogao utjecati na rezultate ispitivanja.

U tablici 3 kvalitativno je uspoređeno djelovanje navedenih utjecajnih čimbenika na krivulju gašenja, odnosno parametre gašenja.

**Tablica 3. Djelovanje utjecajnih čimbenika na krivulju gašenja tekućih medija za gašenje**

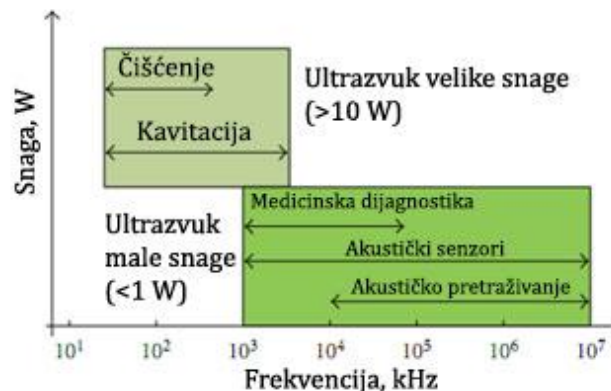
Utjecajni čimbenik		Parametri krivulje ohlađivanja			
		Trajanje faze parnog omotača, [s]	CRmax, [°C/s]	T(CRmax) , [°C]	t8/5, [s]
Sredstvo za gašenje	Vrsta sredstva				
	Dodaci				
Mjerna proba	Promjer	↑	↓	↓	↑
	Materijal				
	Oksidiranost	↓	↑		
Parametri postupka	Pokretanje	↓	↑	↑	↓
	Temperatura	↑	↓	↓	↑
Utjecaj okoliša	Degradacija				
	Oksidacija				
	Primjese				



## 4. Ultrazvučna uzbuda sredstva za gašenje

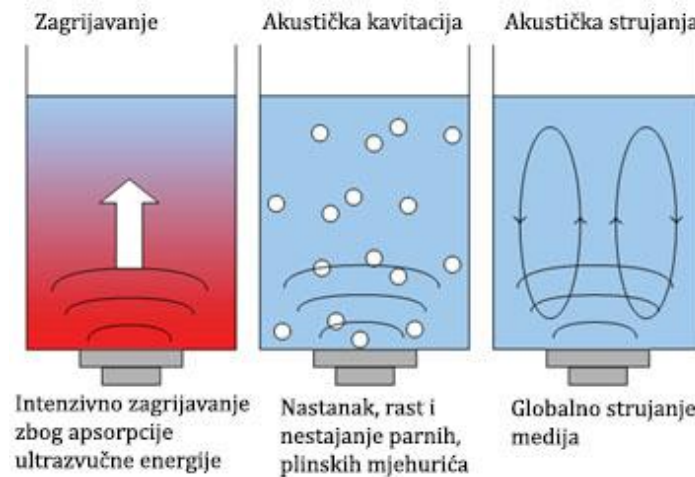
### 4.1. Djelovanje ultrazvuka u kapljevitim medijima za ohlađivanje

Akustički valovi čije frekvencije su više od gornje granice ljudskog čujnog područja (oko 20 kHz) nazivaju se ultrazvuk [3]. Ultrazvuk se dalje dijeli prema frekvenciji i snazi (slika 33). Ultrazvuk frekvencije 20 do 100 kHz naziva se “nisko frekvencijski ultrazvuk” ili “ultrazvuk visoke snage” jer se odašilje na visokom nivou snage, nekoliko desetaka vati. Ultrazvuk visoke snage sposoban je utjecati na svojstva medija u kojem propagira te uzrokovati kavitaciju ili akustičke struje u mediju. Ova dva efekta imaju pozitivan utjecaj na prijenos topline i mase. Ultrazvuk se u tehnici uspješno primjenjuje za poboljšanje učinkovitosti proizvodnih procesa. Neki od mnogih primjera su ubrzanje kemijskih reakcija, poboljšanje zavarivanja, sušenje u prehrambenoj industriji, čišćenje. Visoka snaga ultrazvuka uobičajeno se koristi za čišćenje, zavarivanje polimera te u medicinskoj terapiji i ultrazvučnoj kemiji. Visokofrekvencijski ultrazvuk smješten je u području iznad 1MHz i male je snage pa ne utječe na medij u kojem propagira. Koristi se za dijagnostiku i nerazorna ispitivanja. Unatoč navedenom primjena ultrazvuka za poboljšanje prijenosa topline relativno se malo primjenjuje izvan laboratorija, zbog visoke cijene ultrazvučnih uređaja i složenosti primjene.



Slika 33. Primjena ultrazvuka prema frekvenciji i snazi [3]

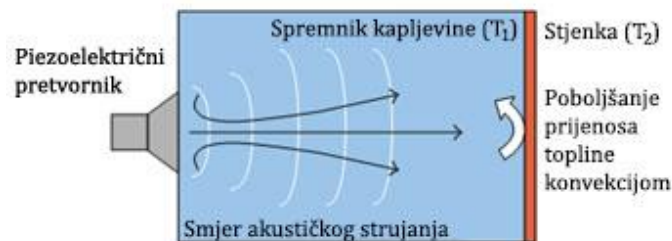
Mnogi efekti mogu se pojaviti zbog propagacije ultrazvuka kroz medij, ali za prijenos topline značajni su već spomenuti kavitacija i akustičke struje prikazani skicom na slici 34. Jedan od ostalih efekata je zagrijavanje medija zbog disipacije mehaničke energije.



Slika 34. Efekti uslijed propagacije ultrazvuka kroz tekućinu [3]

### Akustička strujanja

Akustička strujanja nastaju zbog disipacije akustičke energije što uzrokuje lokalne momente u mediju, a time i strujanja kapljevine. Strujanja u mediju omogućuju veći koeficijent prijelaza topline konvekcijom na granici medija i tijela, a ponekad i turbulentno strujanje što naravno utječe na prijenos topline, slika 35. Brzina akustičkog strujanja obično se kreće od 1 do 100 cm/s.

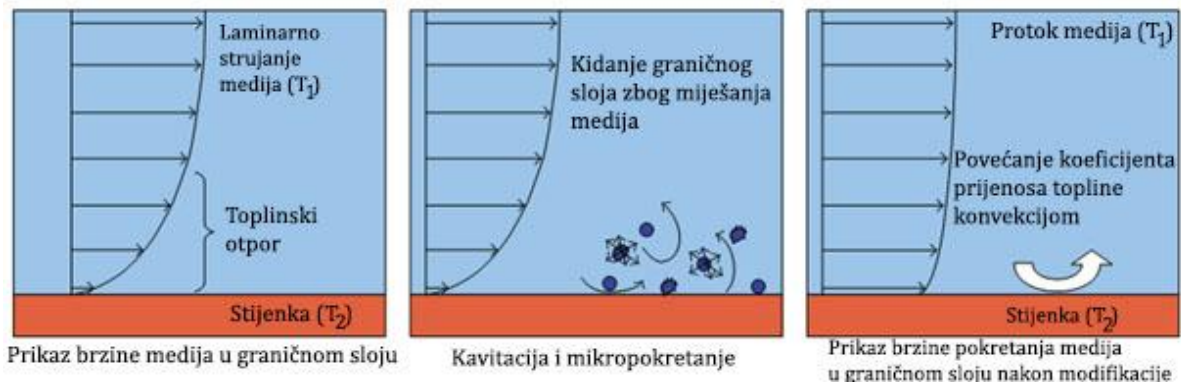


Slika 35. Poboljšanje prijenosa topline konvekcijom pomoću ultrazvučnih valova [3]

### Akustička kavitacija

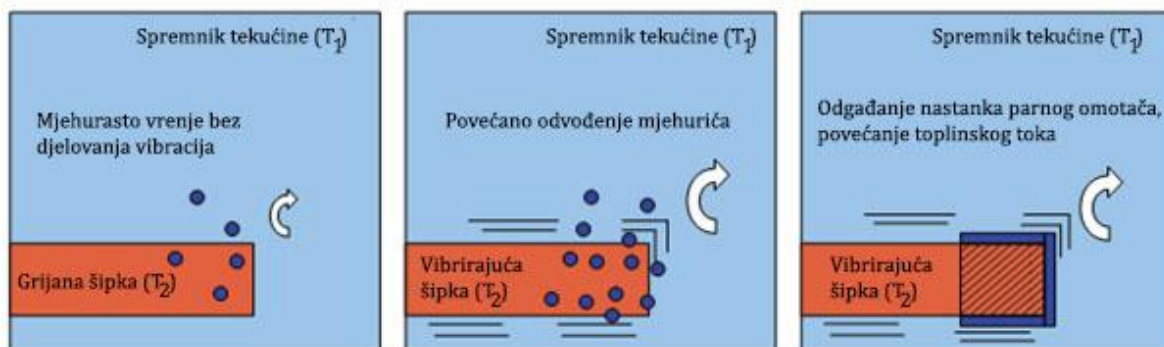
Najznačajniji efekt koji se može pojaviti kod napredovanja ultrazvuka u vodi je akustička kavitacija. Ova pojava javlja se u oscilirajućem polju tlaka uzrokovanim akustičkim valovima. Kad se lokalni tlak snizi dovoljno ispod tlaka isparavanja (zbog karakterističnog periodičnog razrijeđivanja uslijed ultrazvučnog vala) statički tlak i kohezivne sile bivaju nadjačane te se stvaraju parni mjehurići koji osciliraju, rastu i na kraju se snažno razbijaju (unutar  $10^{-7}$  s) i

dostižu tlakove do 193 MPa [3]. Ovako snažne reakcije temelj su poboljšanja prijenosa topline ultrazvukom. Implozija mjehurića zraka blizu površine stvoriti će mikroturbulencije u vodi te tako poboljšati prijenos topline (slika 36).



Slika 36. Pojašnjenje poboljšanja prijenosa topline akustičkom kavitacijom [3]

Područje istraživanja utjecaja ultrazvuka na prijenos topline uslijed mjehurastog vrenja danas je vrlo aktivno. Na slici 37 vidljiva je šipka uronjena u rashladi medij. Prvi mjehurići koji se pojavljuju na površini šipke odnešeni su djelovanjem vibracija uzrokovanih ultrazvučnim valom. Na taj je način pojava parnog omotača odgođena, a kada se pojavi intenzivnija je i postiže se jači toplinski tok. Ovo se prema nekim istraživanjima događa zbog akustičke kavitacije koja olakšava nastanak i rast mjehurića dok njihove oscilacije omogućavaju mikro strujanja i lokalno pokretanje medija blizu površine, nakon čega se mjehurići udaljavaju od površine [3].



Slika 37. Utjecaj ultrazvuka na pojavu mjehurastog vrenja [3]

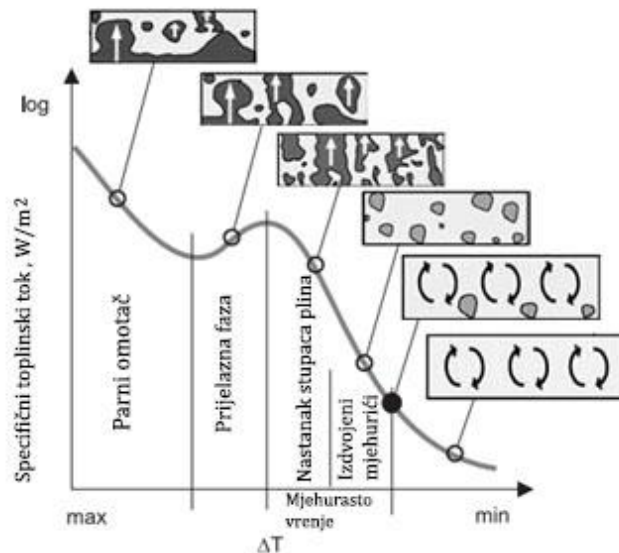
Unatoč mnogim istraživanjima do jednoznačnih i u praksi primjenjivih rješenja teže se dolazi. Tako su zabilježena poboljšanja prijenosa topline u jednom mediju, a korištenjem istog medija više temperature ne dobivaju se značajni rezultati. Zato se u posljednje vrijeme

sve više istražuje s različitim kombinacijama utjecajnih faktora: razne otopine, temperature, pokretanje te promjenom amplituda i frekvencija ultrazvuka i mnogim drugim. Jasno je da zbog brojnih utjecaja potreban velik trud da se dođe do saznanja kakav utjecaj ima samo jedan faktor. Isto tako, teško da će uvjeti koji su provedeni u laboratoriju odgovarati onima u primjeni. Na koji način se utvrđuje djelovanje ultrazvuka na prijenos topline i koji su od utjecajnih čimbenika prisutni prikazani su sljedećim tekstom.

## 4.2. Utjecaj ultrazvuka na prijenos topline

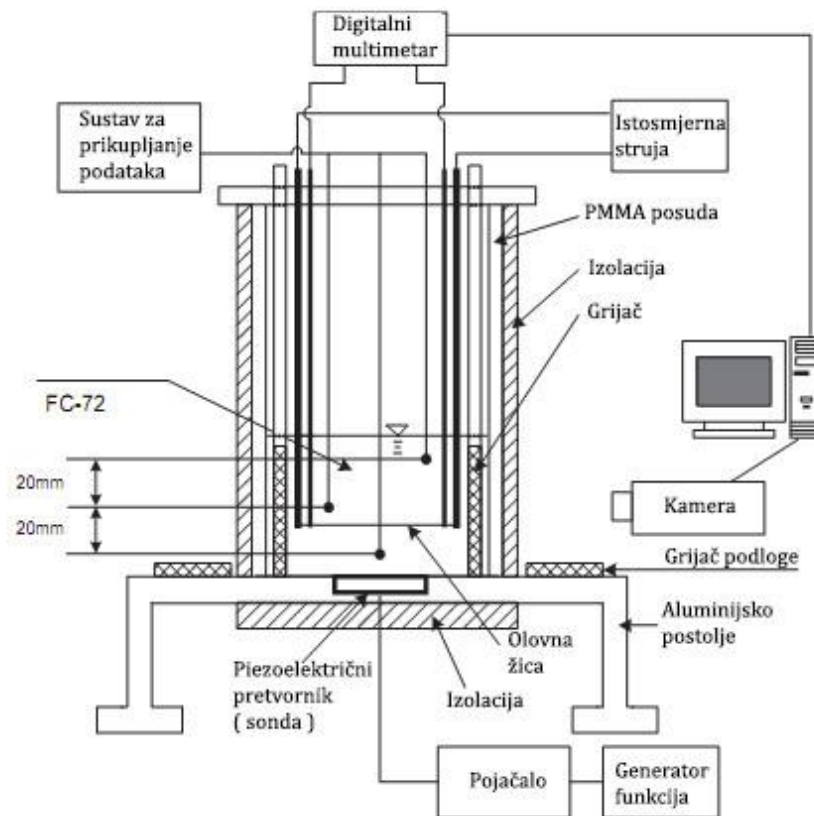
Nije teško zamisliti kakve bi koristi u tehnici nastale kad bi se pronašao funkcionalan način dodatnog poboljšanja toplinskog toka ultrazvukom. Iako su neka ispitivanja na ovom području provedena već sredinom prošlog stoljeća do značajnih se rezultata još uvijek nastoji doći. Neka saznanja iz literature [5] prikazana su u ovom odjeljku.

U postupku kaljenja prisutni su različiti režimi prijenosa topline (slika 38), jer promjenom razlike temperature između obradka i tekućeg medija mijenja se i koeficijent prijenosa topline. Ovisno o kojem je režimu riječ moguće je korištenjem ultrazvučnih valova postići određena poboljšanja u prijenosu topline. Ovo ovisi i o svojstvima medija, udaljenosti od izvora ultrazvučnog vala, dimenzijama ispitivanog tijela i posudi u kojoj se provodi ispitivanje.



Slika 38. Promjena toplinskog toka u različitim stadijima pri gašenju [4]

Ultrazvučni impuls propagacijom kroz medij uzrokuje kavitaciju i akustička strujanja što djeluje kao pokretanje medija. Ova pokretanja mogu se snimiti „visokobrzinskom“ kamerom te pomoći pri tumačenju promjena vrijednosti toplinskog toka koje se dešavaju u različitim uvjetima grijanja ili hlađenja. Za eksperimentalno dobivanje podataka o toplinskom toku može se koristiti oprema prikazana slikom 39.



**Slika 39. Shematski prikaz opreme za ispitivanje toplinskog toka i vizualizaciju kretanja u mediju [5]**

Na dno polimerne posude (od optički prozirnog poliplasta PMMA) koja sadrži 60 mm medija FC-72 pričvršćena je piezoelektrična sonda spojena na pojačalo i generator funkcija. Žica promjera 0,2 mm izrađena od platine koristi se istovremeno kao grijač i senzor promjene temperature. Za homogenizaciju i regulaciju temperature koriste se dodatni grijači na rubu posude. Tri termopara uronjena su u medij s ciljem mjerenja srednje temperature tekućine. Na žicu se dovodi struja preko bakrenih šipki. Digitalnim multimetrom mjeri se napon u žici, a poznavajući dovedenu struju u svakom je trenutku poznat otpor žice. Pomoću otpora određenim metodama dolazi se do podatka o temperaturi žice. Do gustoće toplinskog toka dolazi se pomoću izraza [5]:

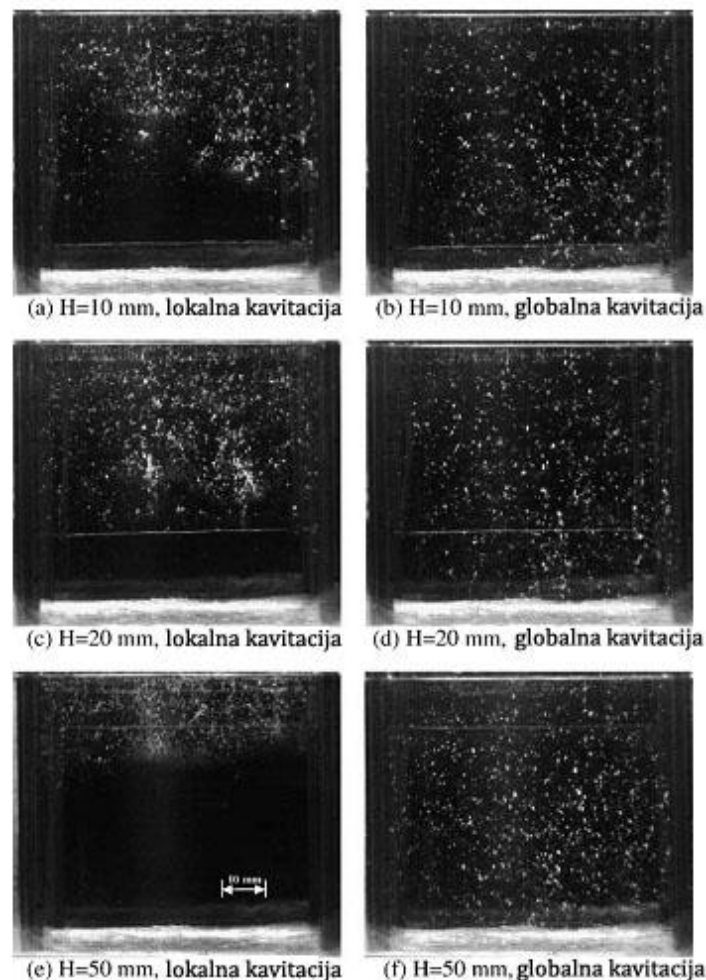
$$q'' = \frac{i^2 R}{\pi D L}, \text{ W/m}^2 \quad (4.1)$$

gdje je  $i$  jakost struje,  $R$  električni otpor,  $D$  promjer žice, a  $L$  duljina žice.

S obzirom da je izračunata gustoća toplinskog toka, temperatura žice poznata preko otpora  $R$ , a prosječna temperatura tekućine  $T_f$  izmjerena pomoću tri termopara može se izračunati koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{q''}{T_s - T_f}, \quad \text{W/(m}^2\text{K)}. \quad (4.2)$$

Ispitivanjem je otkriveno da djelovanjem ultrazvuka u vodi koja je prokuhana 30 minuta i naknadno ohlađena (i bez ikakvih uronjenih objekata) ne dolazi do kavitacije jer je takva voda odplinjena i u njoj nema klica kavitacije ispunjenih plinom [5]. Ipak, uranjanjem žice i držača koji na površini sadrže šupljine doći će do stvaranja kavitacije između žice i slobodne površine vode. Takva pojava naziva se „lokalna kavitacija“. U tekućinama koje nisu prokuhane djelovanjem ultrazvuka pojavljuje se kavitacija u cijelom volumenu vode, i tu je riječ o takozvanoj „globalnoj kavitaciji“. Globalna i lokalna kavitacija prikazane su slikom 40.



**Slika 40. „Lokalna“ i „globalna“ kavitacija [5]**

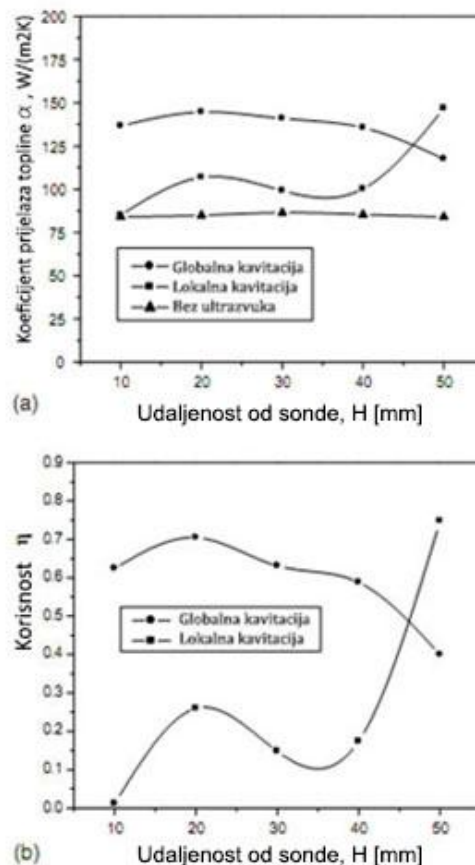
Za obje pojave prikazan je utjecaj udaljenosti izvora ultrazvuka na koeficijente prijelaza topline i to za različite režime: konvekcija, prijelazna faza i mjehurasto vrenje. Povećanje koeficijenta prijelaza topline (korisnost) definira se izrazom:

$$\eta = \frac{\alpha_v - \alpha_0}{\alpha_0} \quad (4.3)$$

gdje je  $\alpha_v$  koeficijent prijelaza topline uslijed djelovanja ultrazvuka,  $\alpha_0$  koeficijent prijelaza topline bez djelovanja ultrazvuka, a  $\eta$  je korisnost.

### Utjecaj ultrazvuka u stadiju konvekcije

Na slici 41 vidljiv je koeficijent prijenosa topline u tri stanja: bez ultrazvuka i s djelovanjem ultrazvuka u globalnoj i lokalnoj kavitaciji. Globalna kavitacija poboljšava prijenos topline u većoj mjeri nego lokalna sve do udaljenosti od sonde  $H = 40$  mm. Ovo se može objasniti slikom 42. Kod lokalne kavitacije oko žice nepredvidivo se kreću mjehurići i miješaju medij dovodeći hladnu tekućinu na vruću žicu što poboljšava prijenos topline. Globalnom kavitacijom mjehurići su prisutni u cijelom volumenu medija i djeluju na jednak način ali gustoća mjehurića oko žice je veća pa je jače miješanje (i poboljšanje prijenosa topline).



Slika 41. Utjecaj ultrazvuka u stadiju konvekcije za  $q'' = 1,5 \text{ kW/m}^2$  [5]

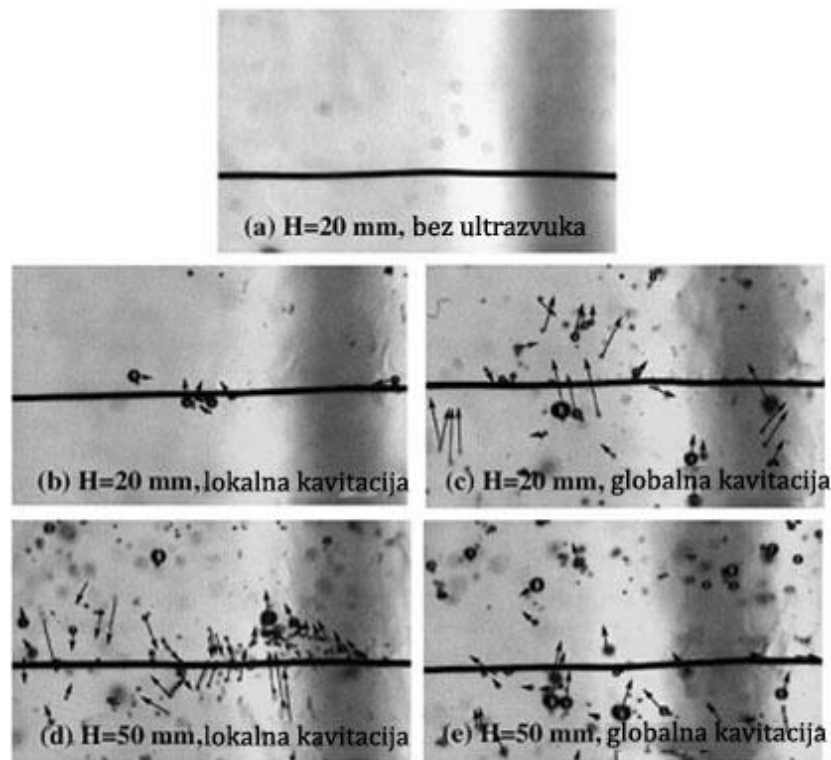
a) dijagram  $\alpha - H$ ,

b) dijagram  $\eta - H$

Na udaljenosti od 50 mm od sonde lokalna kavitacija povećava se u većoj mjeri, a zbog



gibanja mjehurića u oba smjera (slika 42d), za razliku od globalne (slika 42e). Razlog ovakvom gibanju je što se val emitiran s dna posude odbija od slobodne površine tekućine (na vrhu) i ulazi ponovno u medij i preusmjerava mjehuriće prema dolje. Zbog velike količine mjehurića takvo je ponašanje kod globalne kavitacije onemogućeno.

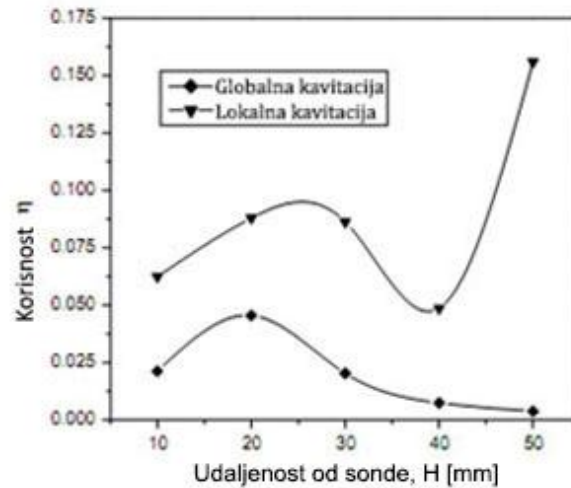


**Slika 42. Slike gibanja u stadiju konvekcije\* [5]**

\*strelice označavaju poziciju mjehurića nakon 10 ms

### Utjecaj ultrazvuka u prijelaznoj fazi

U ovoj fazi kavitacija zbog djelovanja ultrazvuka se još pojavljuje budući da je temperatura niža od vrelišta te ne dolazi do odplinjavanja tekućeg medija. Za razliku od slobodne konvekcije ovdje se na žici pojavljuju mjehurići zbog visoke temperature. Toplinski mjehurići pokreću medij i odnose toplinu od isparavanja [5]. Zato je i koeficijent prijelaza topline bez djelovanja ultrazvuka mnogo veći nego što je u fazi konvekcije (slika 38). Rezultat toga je da neće doći do značajnih poboljšanja kad se djeluje ultrazvukom (slika 43), pogotovo u stanju globalne kavitacije, gdje je razlog slabijeg poboljšanja jednak kao i kod konvekcije, tj. mjehurići se gibaju u samo jednom smjeru.

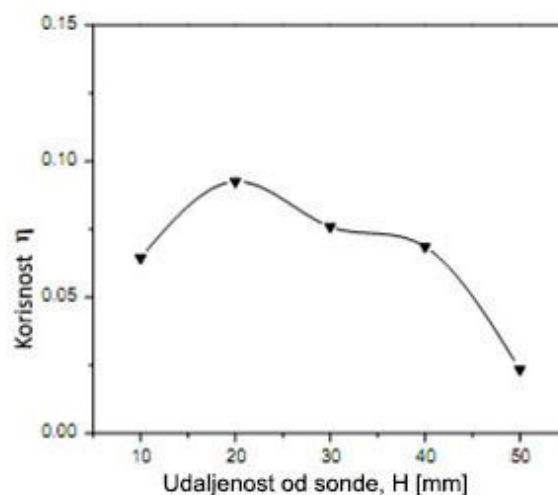


Slika 43. Djelovanje ultrazvuka u prijelaznoj fazi\* [5]

\*  $q'' = 4,4 \text{ kW/m}^2$ ,  $T_f = 37 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_s = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

### Utjecaj ultrazvuka u fazi mjehurastog vrenja

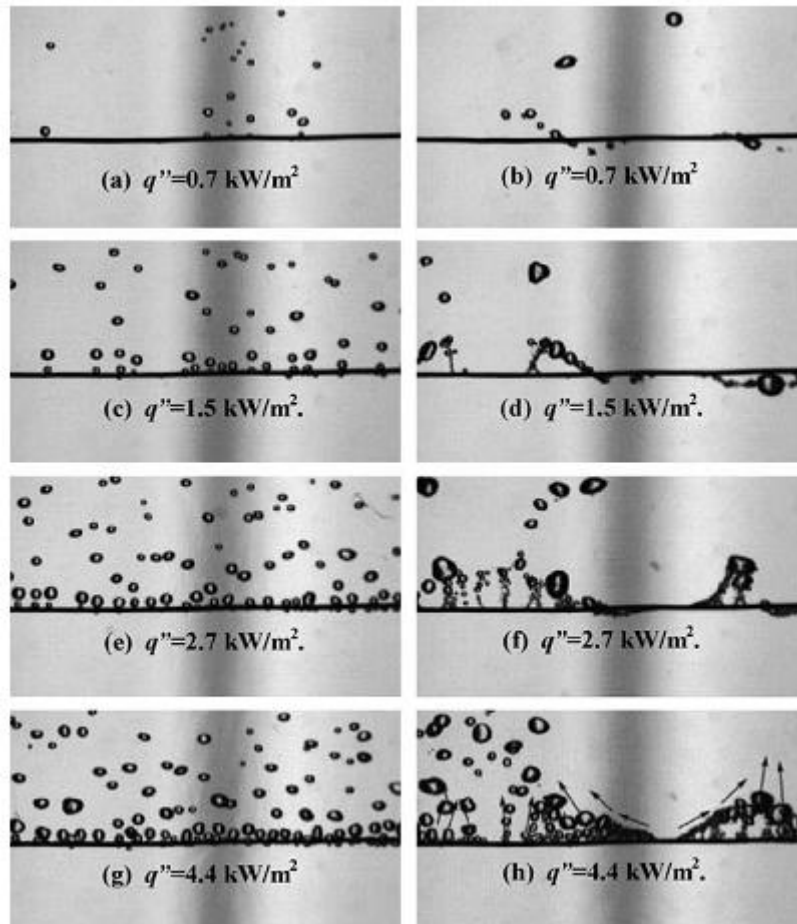
Kad se temperatura tekućine približava vrelištu u tekućini se drastično smanji udio otopljenih plinova. U ovakvom mediju ne može doći do kavitacije, međutim ultrazvučni valovi djeluju na gibanje toplinskih mjehurića. Ovdje je riječ o akustičkim strujanjima. Ova strujanja smanjuju toplinske mjehuriće i raspodjeljuju ih horizontalno po duljini žice (slika 45). Smanjeni mjehurići predstavljaju manji toplinski otpor od žice prema hladnijem mediju i povećanu frekvenciju kretanja mjehurića, što je razlog djelomičnog poboljšanja koeficijenta prijenosa topline (slika 44).



Slika 44. Djelovanje ultrazvuka u fazi mjehurastog vrenja\* [5]

\*  $q'' = 4,4 \text{ kW/m}^2$ ,  $T_s = 96 \text{ }^\circ\text{C}$

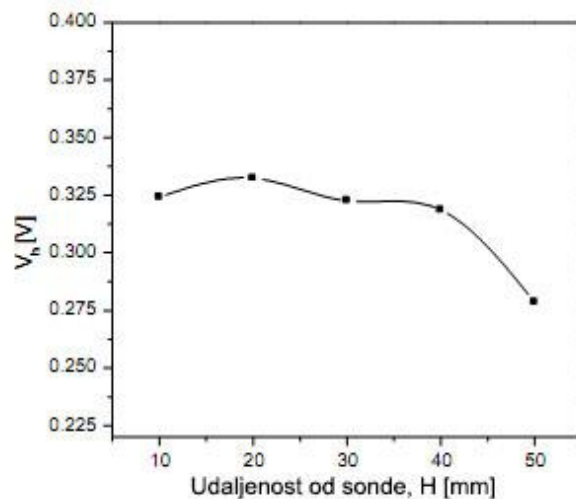
Na slika 45 vidljivo je da jakost toplinskog toka utječe na gustoću mjehurića, a da pri manjim toplinskim tokovima ultrazvuk uzrokuje bolja pokretanje mjehurića. Pri višim toplinskim tokovima pokretanje je snažno i bez djelovanja ultrazvuka.



**Slika 45. Utjecaj gustoće toplinskog toka na ponašanje mjehurića [5]**

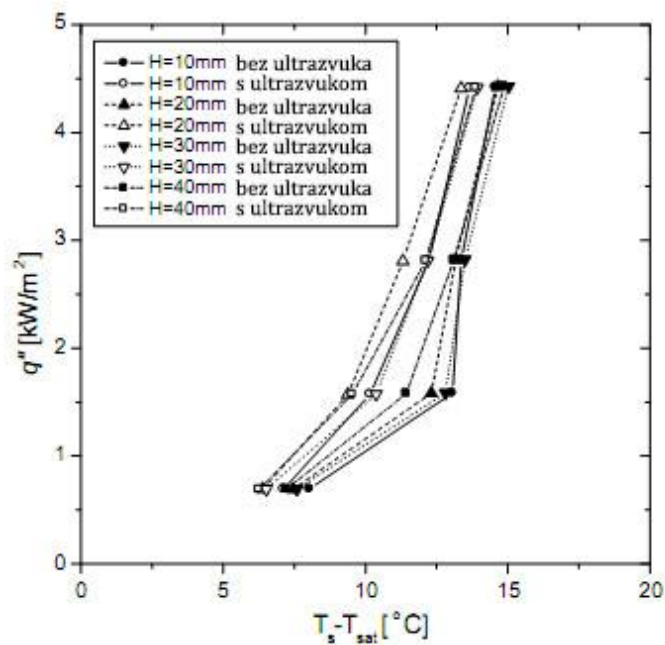
\*slike lijevo- bez ultrazvuka, desno- djelovanjem ultrazvuka

Kao što dokazuje većina slika u ovom poglavlju udaljenost žice od izvora ultrazvuka znatno utječe na stupanj poboljšanja koeficijenta prijenosa topline. Lako se može uočiti veza amplitude tlaka ultrazvuka (slika 46) ovisno o udaljenosti od sonde s karakterističnim oblikom krivulja  $\eta - H$ .



Slika 46. Srednja vrijednost amplitude tlaka ultrazvuka mjerena u voltima ovisno o duljini [5]

Prema slici 47 u području viših amplituda zvučnog tlaka akustička strujanja su jača.



Slika 47. Usporedba toplinskih tokova s i bez djelovanja ultrazvuka ovisno o udaljenosti žice [5]

# **EKSPERIMENTALNI DIO**

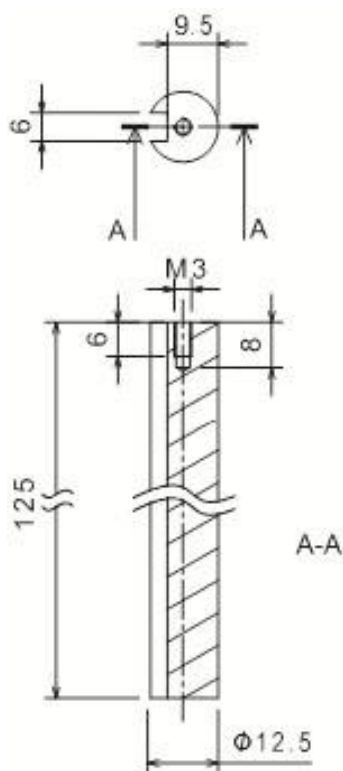
## 5. Priprema i provedba pokusa

S namjerom da se dobije uvid u djelovanje ultrazvučne uzbuđe u tijeku kaljenja na plastične deformacije kaljenih obradaka izrađeni su ispitni uzorci od čelika C45E. Prethodno je ispitano djelovanje ultrazvučne uzbuđe na temperaturnoj probi ISO od legure Inconel 600 (prema normi ISO 9950). ISO temperaturna proba je jednakog promjera kao i uzorci i može poslužiti kao smjernica za uvid na koji način određeni intenzitet ultrazvučne uzbuđe djeluje na krivulje gašenja unutar uzoraka.

Ispitni uzorci izrađeni su strojnom obradom (tokarenjem i glodanjem). Nakon izrade brušeni su finim brusnim papirom po čeonim stranama i po utoru kako bi se smanjili zarezi. Potom je na uzorcima provedeno mjerenje promjera u definiranim točkama, mjerenje duljine i ispitivanje linearnosti. Nakon kaljenja navedena mjerenja su ponovno provedena. Na uzorcima je izmjerena tvrdoća. U radu su dani histogramski prikazi rezultata mjerenja prije i nakon kaljenja i diskusija rezultata. No najprije je opisana oprema i tijek provedbe ispitivanja.

### 5.1. Proba za ispitivanje utjecaja ultrazvučne uzbuđe na deformacije

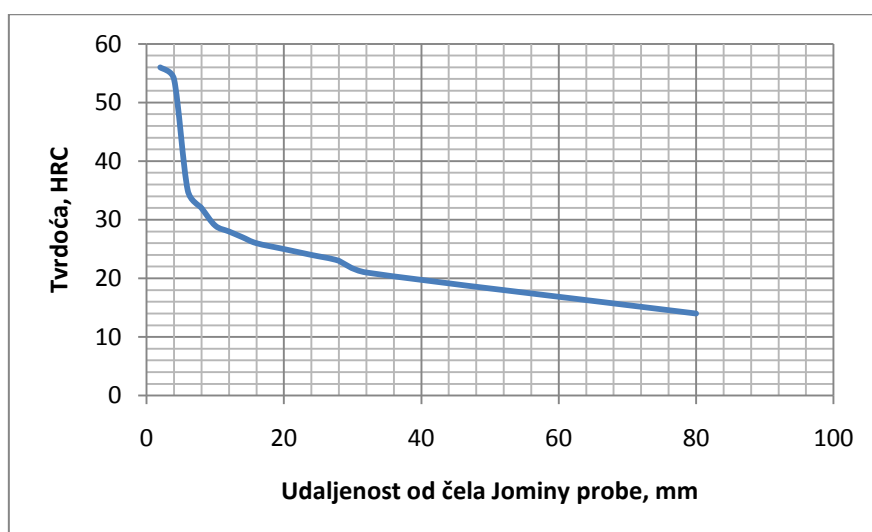
Na slici 48 prikazan je oblik ispitnih uzoraka na kojima će se provesti ispitivanja, a u tablici 4 kemijski sastav čelika C45E. Kao što je vidljivo sa slike 48 uzorci su izrađeni u obliku dugačkih valjaka omjera promjer : duljina = 1 : 10 koji su dodatno namjerno oslabljeni utorom po cijeloj duljini čime je potaknuto stvaranje deformacija. Na slici 49 prikazana je Jominy krivulja prokaljivosti čelika C45E.



Slika 48. Ispitni valjak s utorom

Tablica 4. Kemijski sastav čelika C45E [19]

Oznaka čelika	Kemijski sastav , maseni %				
C45E (DIN: Ck45)	C	Si	Mn	P	S
	0,42-0,50	0,15-0,35	0,50-0,80	≤ 0,035	≤ 0,035



Slika 49. Jominy krivulja prokaljivosti [19]

## 5.2. Plan pokusa

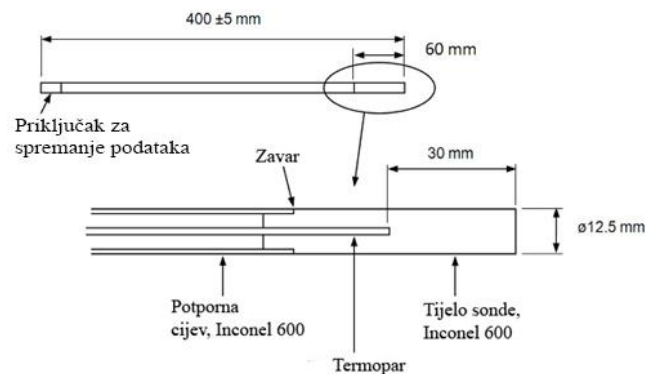
Za potrebe ovog rada ispitivanja su provedena u dva medija za gašenje (voda i ulje), s tri uvjeta gašenja (mirno sredstvo, ultrazvuk snage 60W i ultrazvuk snage 100W), za što je korišteno 6 ispitnih uzoraka označenih prema tablici 5. Za oba sredstva za gašenje i sve ispitivane uvjete gašenja snimljene su krivulje gašenja prema normi ISO 9950.

**Tablica 5. Plan pokusa gašenja**

Oznaka uzorka	Mirno sredstvo	UV 60W	UV 100W
Voda (20°C)	<b>A 1</b> IVF proba	<b>A 2</b> IVF proba	<b>A 3</b> IVF proba
Ulje INA Kalenol 15 (20°C)	<b>B 1</b> IVF proba	<b>B 2</b> IVF proba	<b>B 3</b> IVF proba

## 5.3. Provedba pokusa

Krivulje gašenja vode i ulja za kaljenj (INA Kalenol 15) s i bez ultrazvučne uzbude ispitane su ISO temperaturnom probom primjenom mjernog sustava IVF Smart Quench. Na slici 50 prikazana je temperaturna proba koja je kao i električna peć dio *IVF Smart Quench* opreme (slika 51).



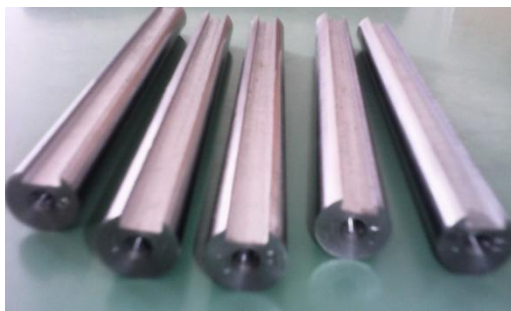
**Slika 50. Temperaturna proba za ispitivanje krivulja gašenja prema normi ISO 9950 [17]**



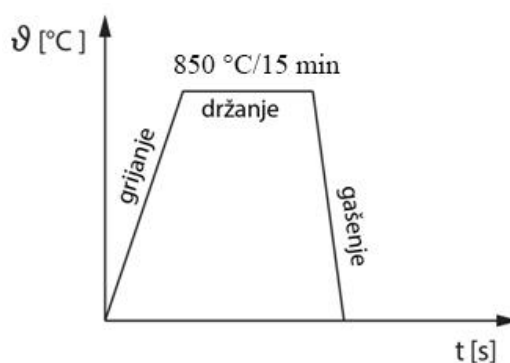
**Slika 51. IVF Smart Quench oprema za ispitivanje krivulja hlađenja kapljevih sredstava za gašenje [17]**



Izgled ispitnih uzoraka od čelika C45E prikazan je na slici 52. Postupak kaljenja (slika 53) sastoji se od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije 850°C (uz zaštitu površine uzoraka od oksidacije inertnim plinom argonom), držanja na temperaturi austenitizacije 15 minuta i gašenja s ili bez ultrazvučne uzbude prema planu ispitivanja.



Slika 52. Obradci za ispitivanje deformacija



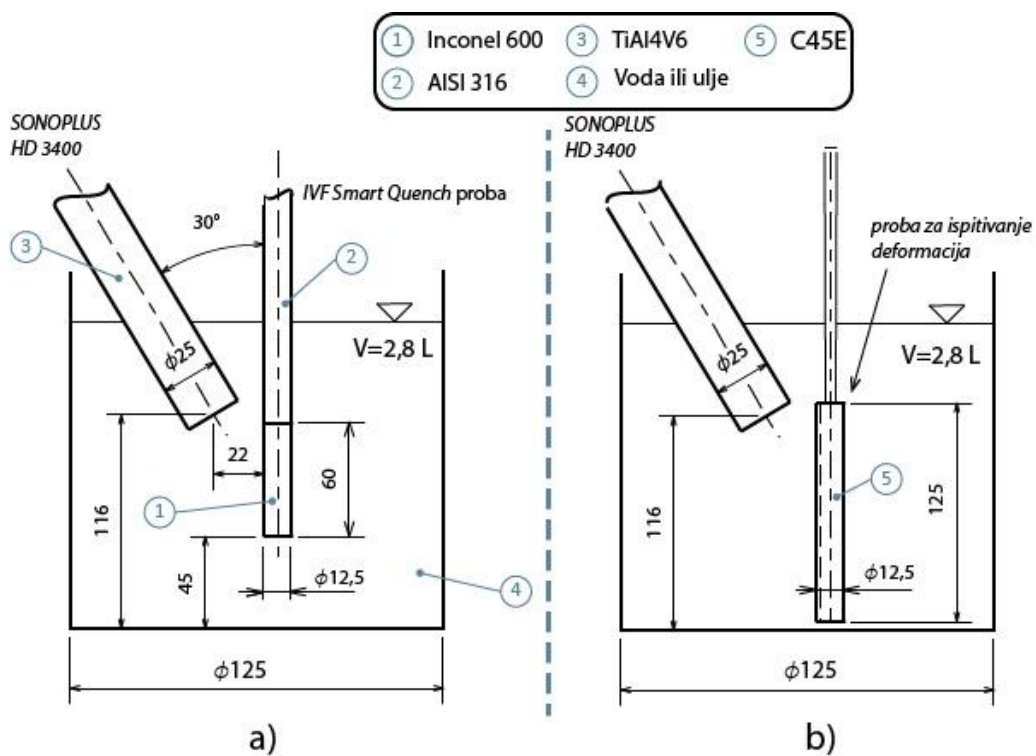
Slika 53. Dijagram postupka kaljenja obradaka od čelika C45E

Za postizanje ultrazvučne uzbude korišten je ultrazvučni uređaj SONOPLUS HD 3400 prikazan na slici 54. Frekvencija ultrazvučne sonde je 20 kHz [18], a izlazna snaga sonotrode se može regulirati od 50 do 300 W.



Slika 54. Ultrazvučni uređaj SONOPLUS HD 3400 [18]

Položaj ISO temperaturne probe tijekom snimanja krivulja gašenja shematski je prikazan na slici 55a. Položaj ispitnih uzorka tijekom gašenja prikazan je na slici 55b.



Slika 55. Položaj opreme pri gašenju

Gašenje ispitnog obradaka u ulju bez ultrazvuka prikazano je na slici 56a, a u vodi uz djelovanje ultrazvuka na slici 56b.



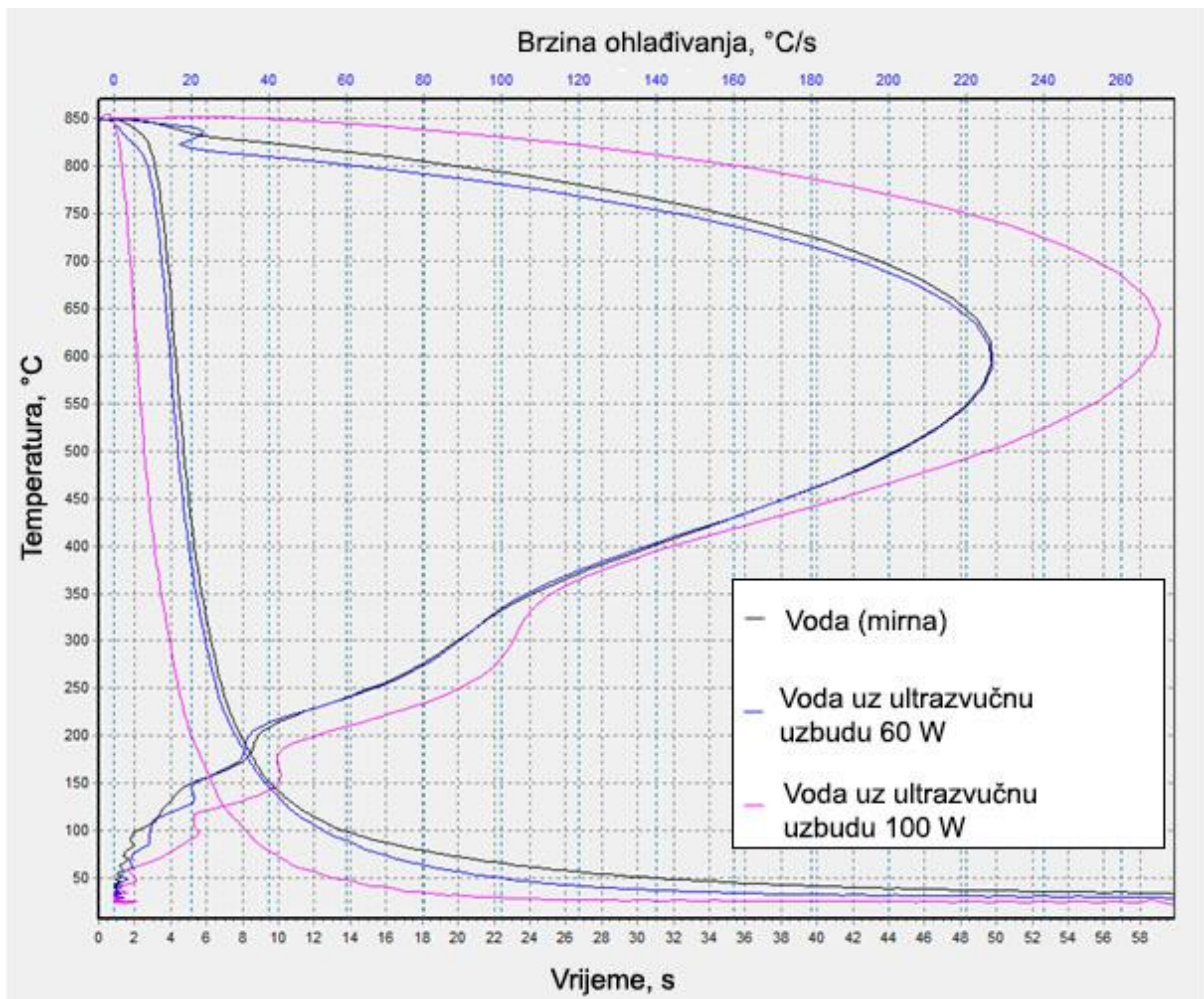
Slika 56. Gašenje obradaka u vodi i ulju za kaljenje

## 6. Rezultati ispitivanja i diskusija rezultata

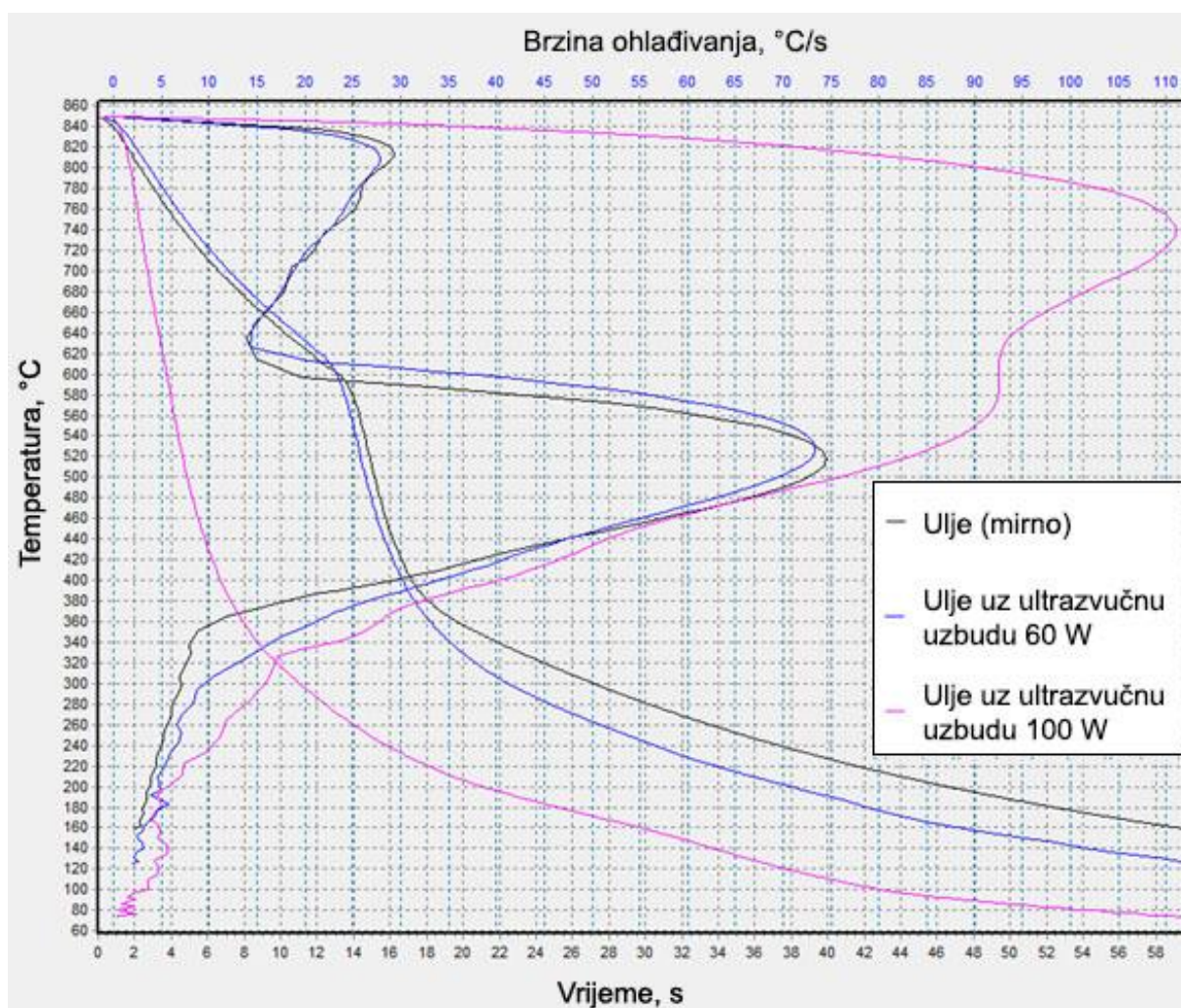
### 6.1. Utjecaj ultrazvučne uzbude na krivulju gašenja

U cilju karakterizacije sredstava za gašenje (vode i ulja za kaljenje, INA Kalenol 15) I djelovanja ultrazvučne uzbude provedna su ispitivanja krivulja gašenja primjenom mjernog sustava IVF Smart Quench. Položai ISO temperaturne probe u odnosu na ultrazvučnu sondu prikazani su na slici 55a. Snimanje krivulja hlađenja obavljeno je u Laboratoriju za toplinsku obradu. Prije ispitivanja je točnost i preciznost mjernog sustava IVF Smart Quench provjerena provedbom gašenja u referentnom ulju za kaljenje isporučenom uz mjerni sustav. Snimanje krivulja gašenja provedeno je prema planu pokusa prikazanom u tablici 5.

Na slici 57 i slici 58 prikazani su rezultati snimanja krivulja gašenja emperaturne probe ISO od Inconel 600 u vodi i ulju za kaljenje (INA Kalenol 15) temperature 20°C s i bez djelovanjem ultrazvučne uzbude (snage 60 i 100W).



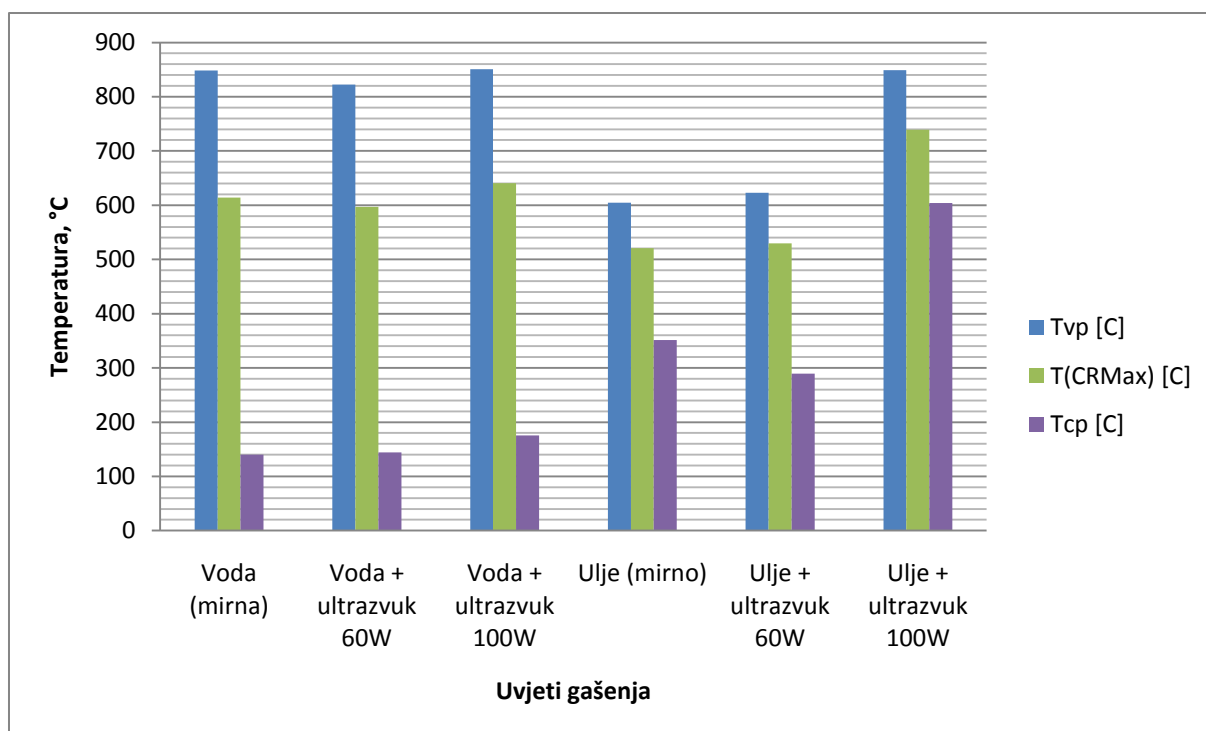
Slika 57. Krivulje gašenja ISO temperaturne probe od Inconela 600 u vodi temperature 20°C s i bez djelovanja ultrazvučne uzbuđe



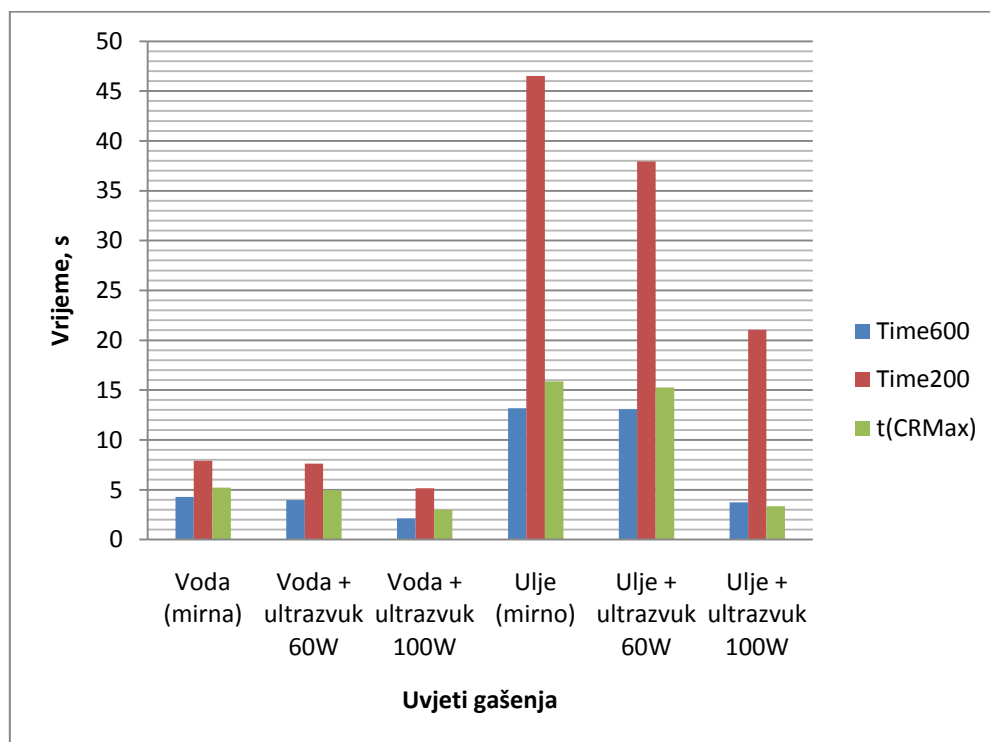
**Slika 58. Krivulje gašenja ISO temperaturne probe od Inconela 600 u ulju temperature 20°C s i bez djelovanja ultrazvučne uzbuđe**

Primjenom računalnog programa IVF SQ Integra analizirane su snimljene krivulje hlađenja i određeni su sljedeći parametri gašenja prikazani na slikama 59 do 61:

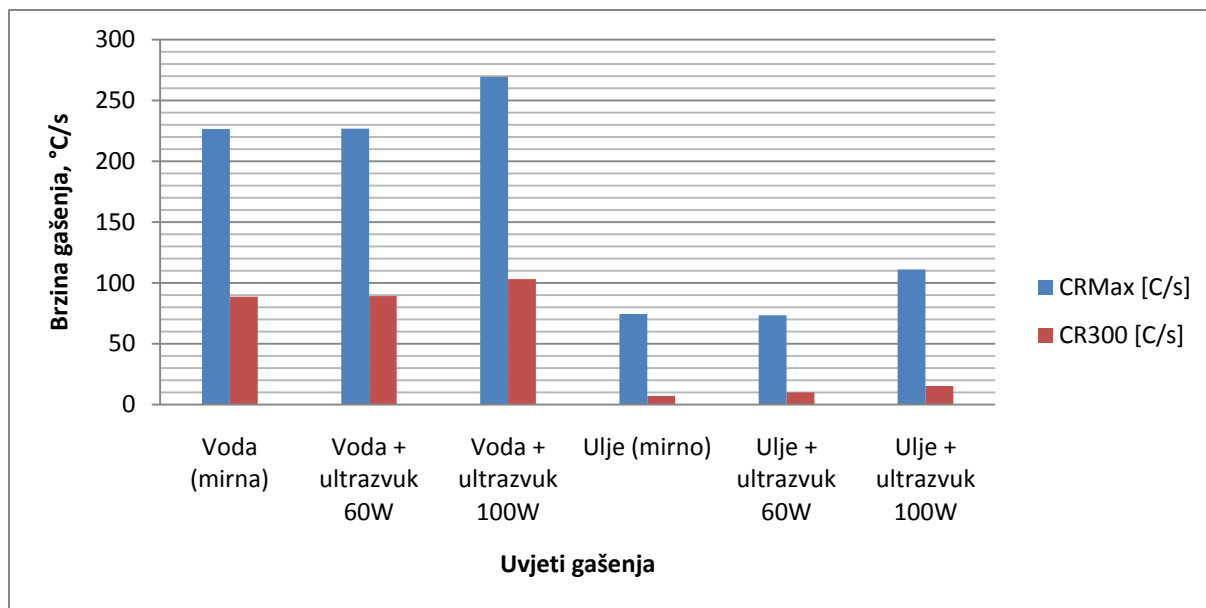
- Leidenfrostova temperatura,  $T_{vp}$ ,
- temperatura na kojoj nastaje najveća brzina hlađenja,  $T(CRMax)$ ,
- temperatura pri kojoj dolazi do prijelaza iz faze vrenja u fazu konvekcije,  $T_{cp}$ ,
- vrijeme potrebno za dostizanje temperature 600°C,  $Time_{600}$ ,
- vrijeme potrebno za dostizanje temperature 200°C,  $Time_{200}$ ,
- vrijeme do postizanja najveće brzine hlađenja,  $t(CRMax)$ ,
- najveća brzina hlađenja,  $CRMax$ ,
- brzina hlađenja pri 300°C,  $CR300$ .



Slika 59. Ovisnost temperature gašenja o vrsti rashladnog medija i dodatnoj ultrazvučnoj uzbuđi



Slika 60. Ovisnost specifičnog vremena gašenja o vrsti rashladnog medija i dodatnoj ultrazvučnoj uzbuđi



**Slika 61. Ovisnost brzine gašenja o vrsti rashladnog medija i dodatnoj ultrazvučnoj uzbuđi**

Iz snimljenih i analiziranih krivulja gašenja prikazanih na slikama 57 do 61 zaključuje se sljedeće:

- Ohlađivanjem u mirnoj vodi i ohlađivanjem uz ultrazvučnu uzбудu snage 60 W ostvarene su praktički slične krivulje hlađenja s izraženim Leidenfrost-ovim fazama. Primjena ultrazvučne uzбудe snage 100 W eliminirala je fazu parnog omotača i skratila ohlađivanje temperature probe za 2 sekunde (slika 57).
- Krivulje hlađenja mirnog ulja i ulja uz ultrazvučnu uzбудu snage 60 W također su praktički iste. Ultrazvučna uzbudu snage 100 W ovdje je također eliminirala fazu parnog omotača i značajno skratila vrijeme ohlađivanja probe (slika 58).
- Primjena ultrazvučne uzбудe snage 100 W praktički je eliminirala fazu parnog omotača i kod vode i kod ulja pri čemu temperatura  $T_{vp}$  iznosi 848°C.
- Također, ultrazvučna uzbudu snage 100 W povisila je temperaturu pojavljivanja najveće brzine hlađenja  $T(CRMax)$  i temperaturu  $T_{cp}$  (slika 59).
- Karakteristična vremena ohlađivanja do 600°C odnosno do 200°C se skraćuju primjenom ultrazvučne uzбудe, a najviše u slučaju uzбудe izlazne snage 100 W (slika 60).
- Primjena ultrazvučne uzбудe povećava maksimalnu brzinu ohlađivanja  $CRMax$  i  $CR300$  u odnosu na mirnu vodu i ulje (slika 61).



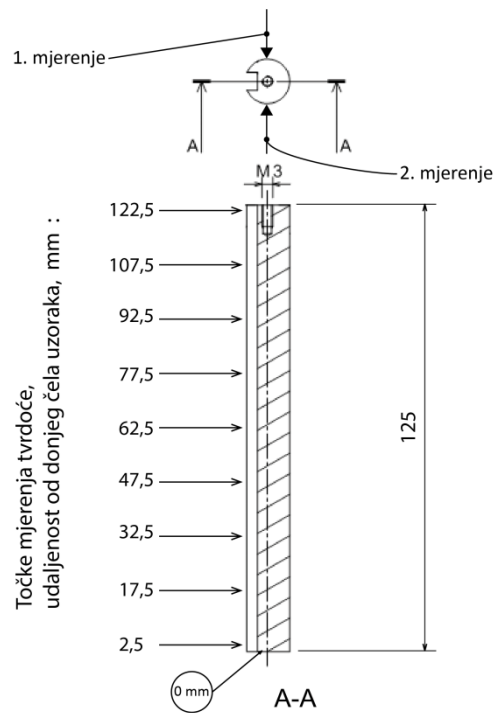
## 6.2. Utjecaj ultrazvučne uzbude na tvrdoću kaljenog čelika

Na temelju provedenih ispitivanja temperaturnom probom *IVF SmartQuench* i utvrđivanjem utjecaja ultrazvučne uzbude na parametre gašenja pripremljeni su i provedeni pokusi gašenja na čeliku za poboljšavanje C45E. U trenutku pripreme rada na tržištu je bila dostupna varijanta čelika C45E koja je po svojim svojstvima i sastavu slična čeliku C45. Kemijski sastav čelika C45E prikazan je u tablici 4. Položaj ispitnih uzoraka u odnosu na ultrazvučnu sondu prikazan je slikom 55. Kaljenje ispitnih uzoraka provedeno je u laboratoriju za toplinsku obradu kao i ispitivanje hlađenja temperaturnih probi.

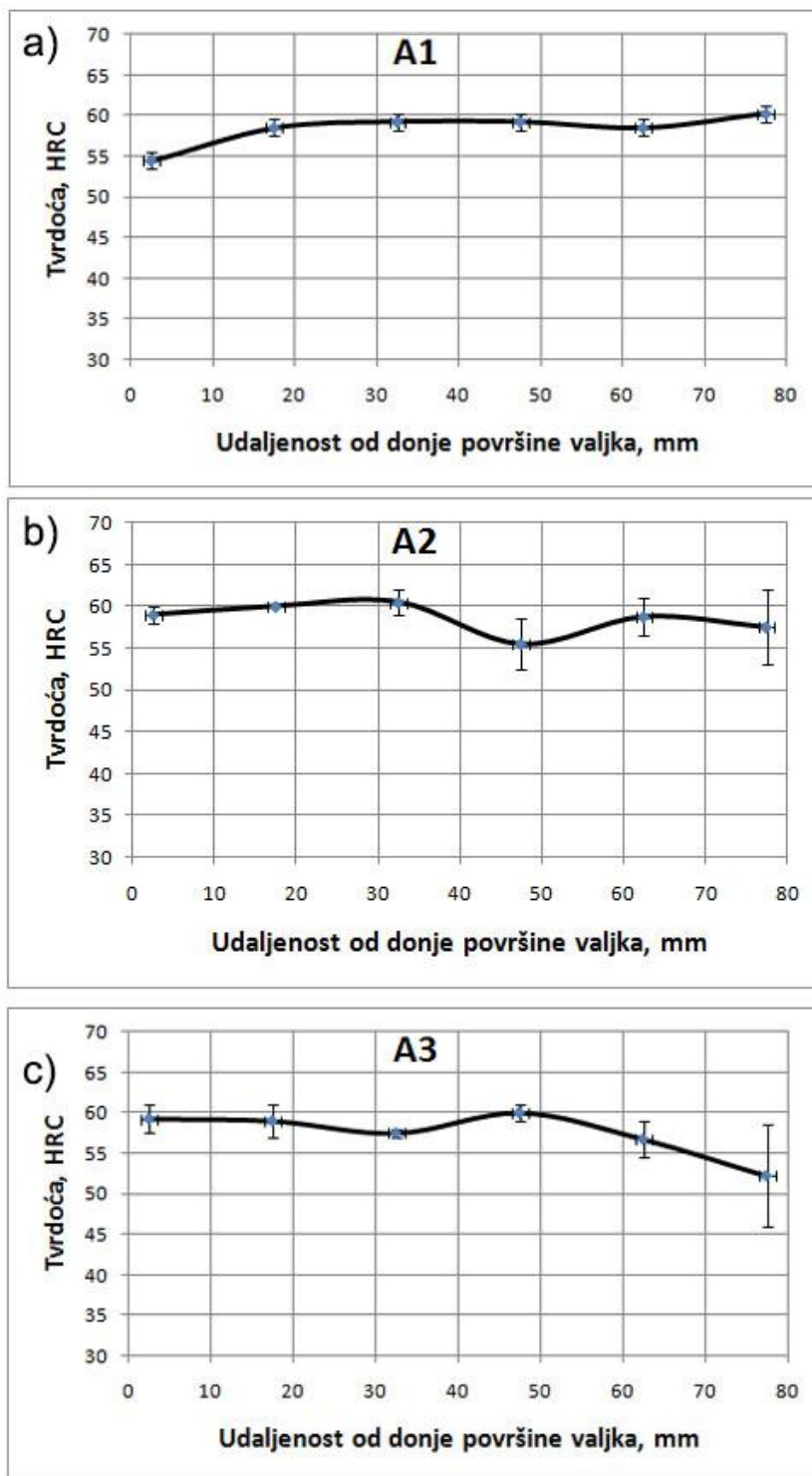
Nakon kaljenja ispitana je tvrdoća po duljini uzorka za sve slučajeve kaljenja. Prokaljenost ispitnih uzoraka ispitana je u mirnoj vodi i ulju, te na uzorcima kaljenim u vodi i ulju uz djelovanje ultrazvučne uzbude snage 100 W.

### 6.2.1. Promjena tvrdoće po duljini ispitnog uzorka

Ispitivanja površinske tvrdoće provedeno je prema metodi Rockwell C na nizu od devet mjesta s udaljenostima od donjeg čela ispitnog uzorka prikazanim na slici 62. Na navednim udaljenostima od donjeg čela uzorka provedeno je ispitivanje tvrdoće dva puta, s lijeve i desne strane utora. Nakon ispitivanja tvrdoće izračunata je aritmetička sredina i odstupanje iznosa tvrdoće na pojedinoj udaljenost od donje površine uzorka. Rezultati ispitivanja tvrdoće na pojedinačnom ispitnom uzorku su prikazani na slikama 63 i 64. Na slici 65 uspoređena je raspodjela površinske tvrdoće svih gašenih uzoraka.

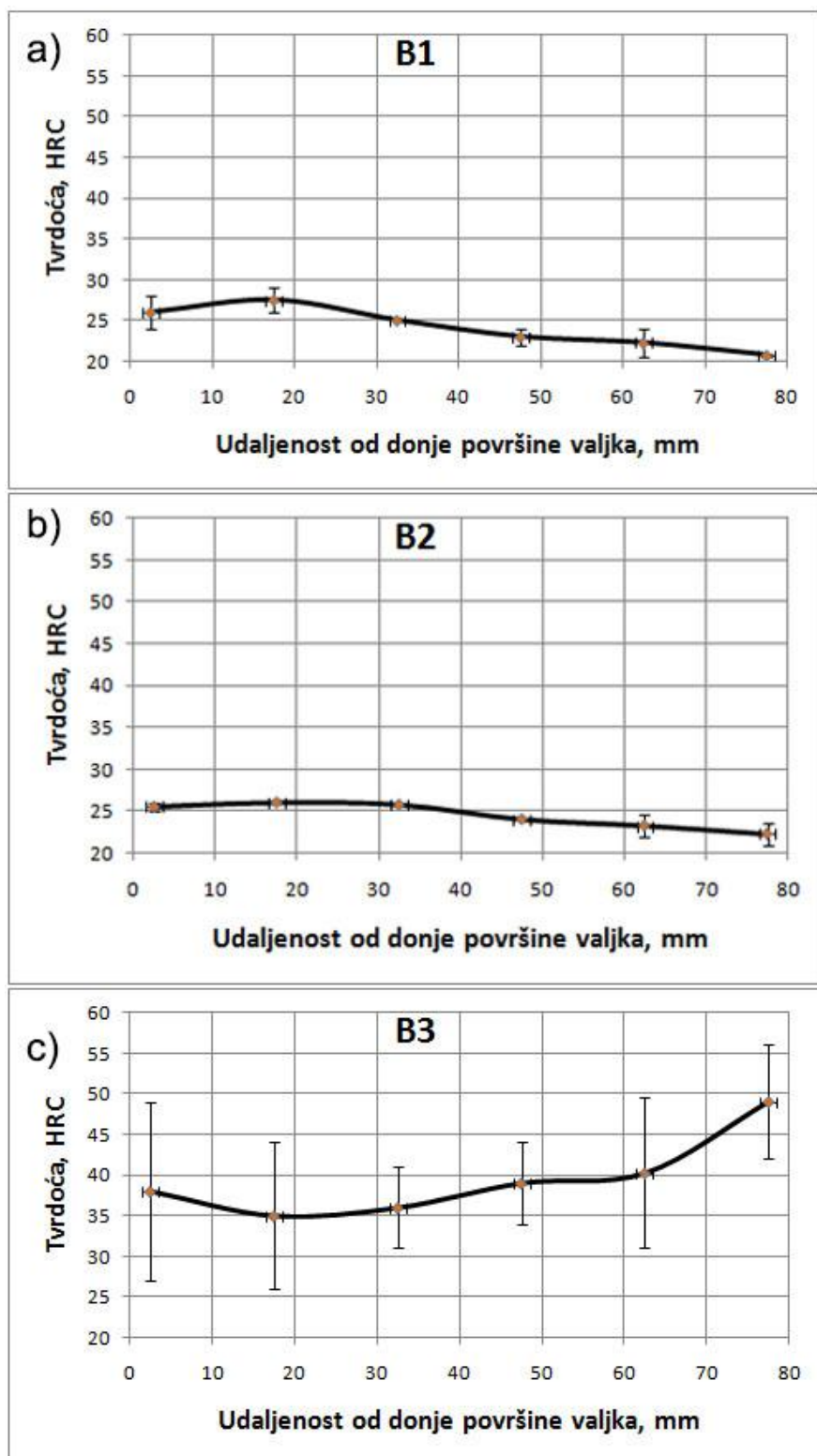


Slika 62. Točke mjerenja tvrdoće po duljini uzoraka



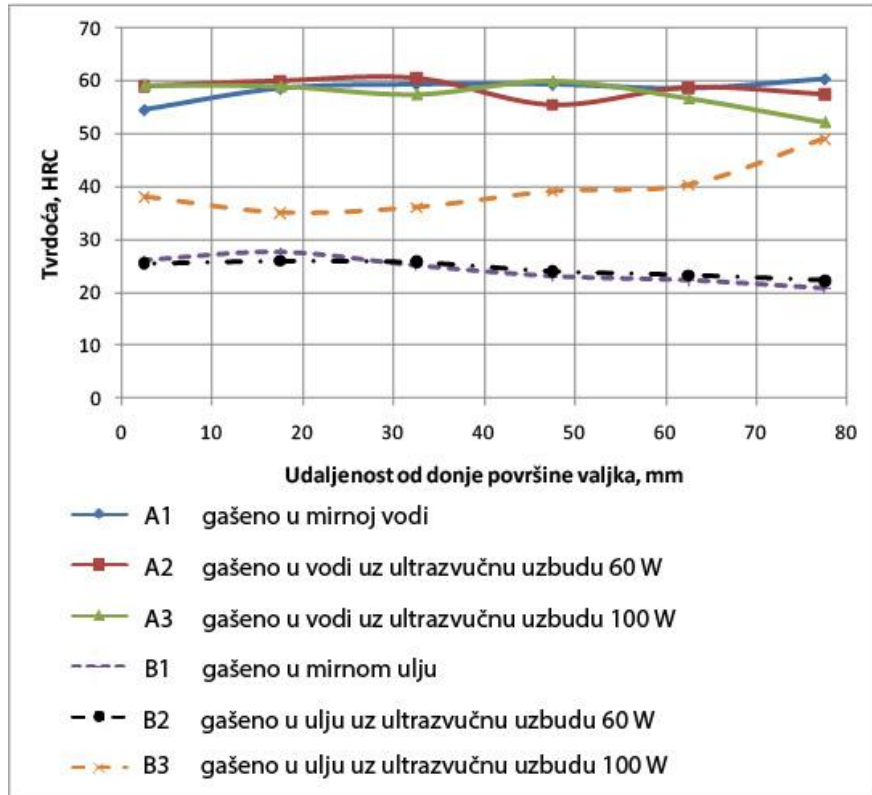
Slika 63. Raspodjela površinske tvrdoće ispitnih uzoraka od čelika C45E gašenih u vodi s i bez ultrazvučne uzbude:

- a) gašenje u mirnoj vodi;
- b) gašenje u vodi uz ultrazvučnu uzbudu 60 W;
- c) gašenje u vodi uz ultrazvučnu uzbudu 100 W



Slika 64. Raspodjela površinske tvrdoće ispitnih uzoraka od čelika C45E gašenih u ulju s i bez ultrazvučne uzbuđe:

- a) gašenje u mirnom ulju;
- b) gašenje u ulju uz ultrazvučnu uzbudu 60 W;
- c) gašenje u ulju uz ultrazvučnu uzbudu 100 W



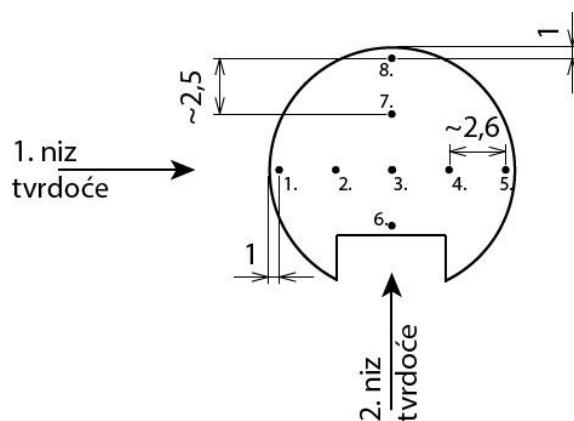
**Slika 65. Raspodjela površinske tvrdoće ispitnih uzoraka od čelika C45E gašenih u vodi i ulju za kaljenje (INA Kalenol 15) s i bez ultrazvučne uzbuđe**

Iz rezultata ispitivanja površinske tvrdoće zaključuje se slijedeće:

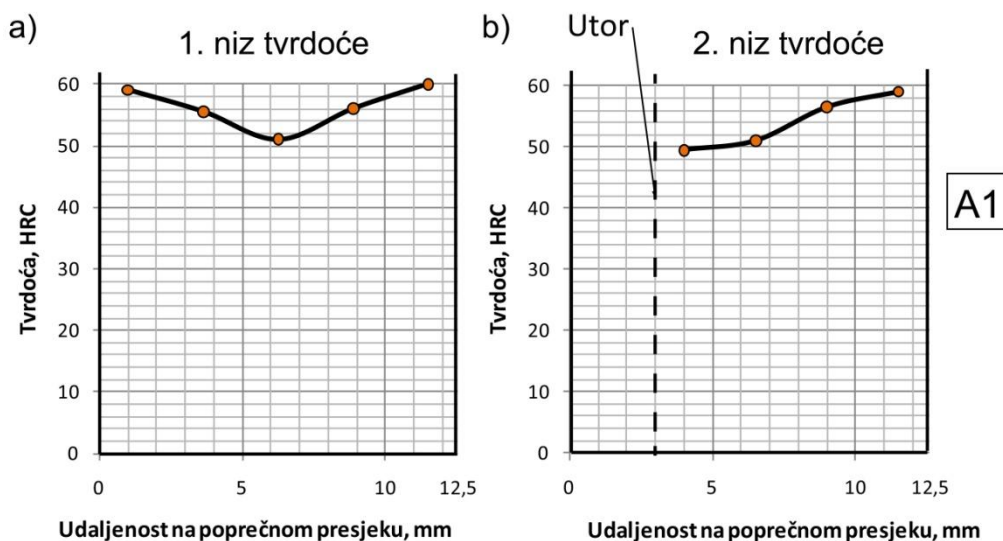
- kaljenjem u vodi s i bez ultrazvučne uzbuđe postignuta je maksimalna površinska tvrdoća u rasponu  $59 \pm 2$  HRC.
- ohlađivanjem u mirnom ulju i u ulju s ultrazvučnom uzbuđom snage 60 W ispitni uzorci su samo djelomično zakaljeni na površinsku tvrdoću  $25 \pm 2$  HRC. Ova tvrdoća karakteristična je za feritno-perlitnu mikrostrukturu i podkritično ohlađivanje čelika C45E (slika 3).
- Gašenjem u ulju uz ultrazvučnu uzbuđu 100 W postignuta je veća brzina gašenja nego u prethodnim slučajevima što je rezultiralo višom tvrdoćom od 35 do 45 HRC (slika 65). Postignuta tvrdoća je još uvijek manja od maksimalne postizive tvrdoće za čelik C45E ali je za 50 do 70% veća od tvrdoće postignute u ulju bez ultrazvučne uzbuđe. Dodatno, navedena tvrdoća je karakteristična za mješanu mikrostrukturu sastavljenu od manjeg udjela feritno-perlitne i većeg udjela bainitno-martenzitne mikrostrukture kao što se vidi iz TTT dijagrama za kontinuirano ohlađivanje prikazanog na slici 3.

### 6.2.2. Prokaljenost ispitnih uzoraka

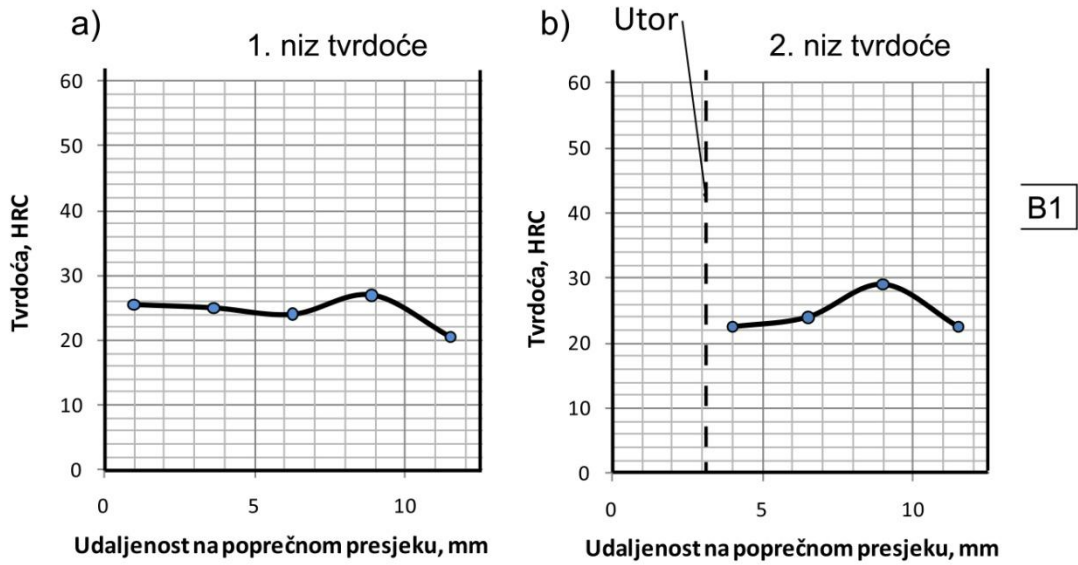
Prokaljenost ispitnih uzoraka provjerena je na uzorcima gašenim u mirnoj vodi i mirnom ulju, za koje se postiže najmanje intenzivno ohlađivanje te na uzorcima gašenim u vodi i ulju uz djelovanje ultrazvučne uzbude snage 100 W. Za ispitivanje prokaljenosti izrezani su donji dijelovi ispitnih uzoraka visine 5 mm, koji su u postupku gašenja prvi dolazili u kontakt sa sredstvom za gašenje. Na njima su ispitana dva okomita niza tvrdoće prema shemi prikazanoj na slici 66. Na slici 67 prikazana je raspodjela tvrdoće po poprečnom presjeku uzorka gašenog u mirnoj vodi, a na slici 68 je raspodjela tvrdoće po poprečnom presjeku uzorka gašenog u mirnom ulju za kaljenje. Isto tako, na slikama 59 i 60 prikazana je raspodjela tvrdoća po poprečnom presjeku uzoraka gašenih u vodi i ulju uz djelovanje ultrazvučne uzbude.



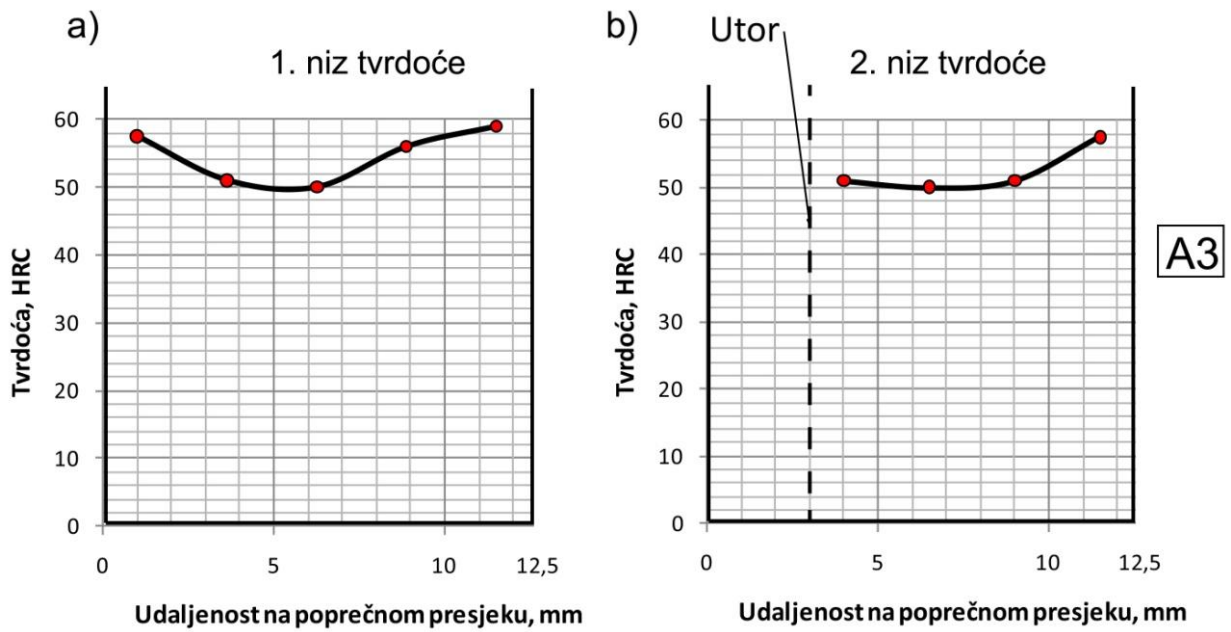
Slika 66. Točke mjerenja tvrdoće po poprečnom presjeku



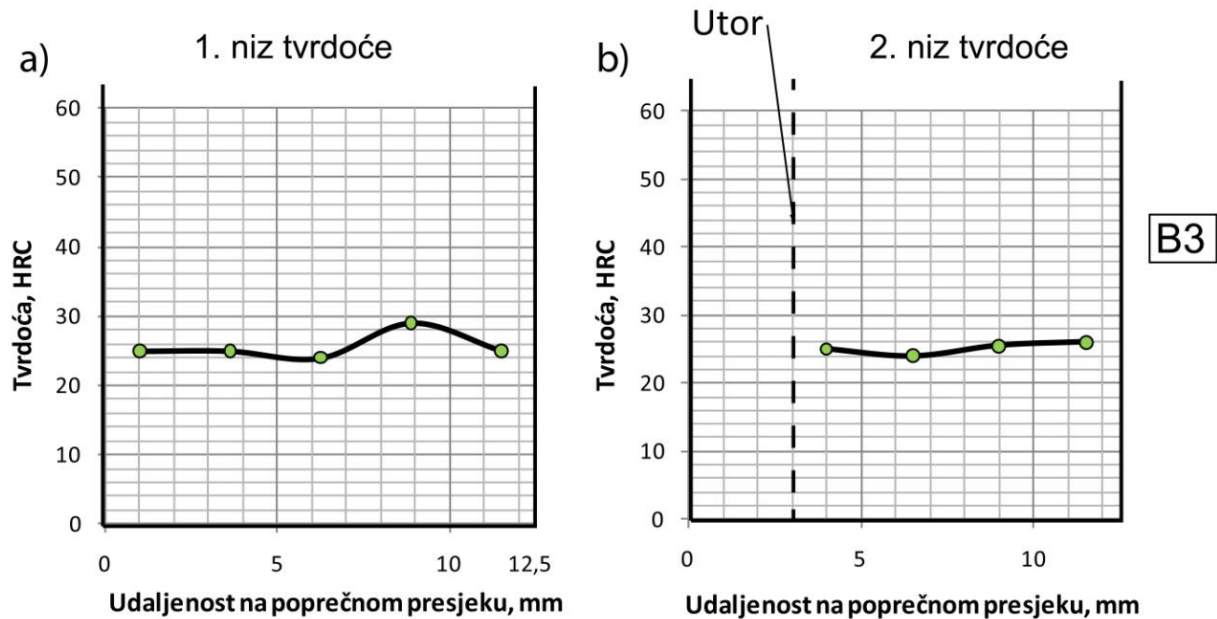
Slika 67. Raspodjela tvrdoća po poprečnom presjeku uzorka gašenog u mirnoj vodi



Slika 68. Raspodjela tvrdoća po poprečnom presjeku uzorka gašenog u mirnom ulju



Slika 69. Raspodjela tvrdoća po poprečnom presjeku uzorka gašenog u vodi uz ultrazvučnu uzbuđu 100 W



**Slika 70. Raspodjela tvrdoća po poprečnom presjeku uzorka gašenog u ulju uz ultrazvučnu uzbudu 100W**

Iz krivulja raspodjele tvrdoće po poprečnom presjeku uzoraka kaljenih u vodi, odnosno ulju zaključuje se slijedeće:

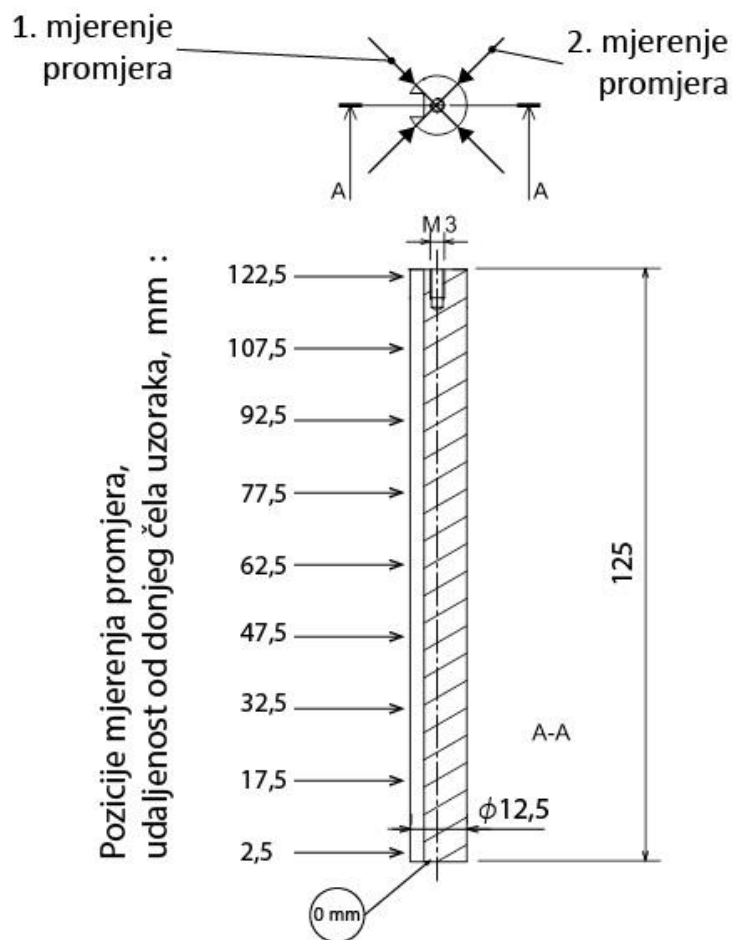
- Ispitivani čelik C45E pripada skupini slabo prokaljivih čelika (slika 49) sa vrlo kratkim minimalnim vremenom inkubacije ( $t_{i,min} = 2,5$  s), slika 3.
- Krivulja gašenja treba postići  $420^{\circ}\text{C}$  za 2 sekunde. Ovako brzo ohlađivanje postignuto je na uzorcima gašenim u vodi koji su praktički prokaljeni i u jezgri imaju tvrdoću 50 HRC kao što je prikazano na slici 67 i slici 69. Slična tvrdoća je postignuta i ispod utora, što bi moglo biti rezultat dužeg zadržavanja faze parnog omotača unutar utora. Ipak, slika 69 pokazuje da ultrazvučna uzbuda uklanjanjem parnog omotača nije povećala tvrdoću ispod utora. Dakle zbog karakteristične konstrukcije uzorka došlo je do otežanog miješanja medija za gašenje koji je „zarobljen“ u utoru i zbog toga su i utor i medij ovdje dodatno ugrijani što naravno rezultira manjom tvrdoćom od očekivane.
- Gašenje u ulju nije zakalilo (pa tako ni prokalilo) ispitne uzorke i postignuta tvrdoća na poprečnom presjeku je karakteristična za feritno – perlitnu mikrostrukturu.



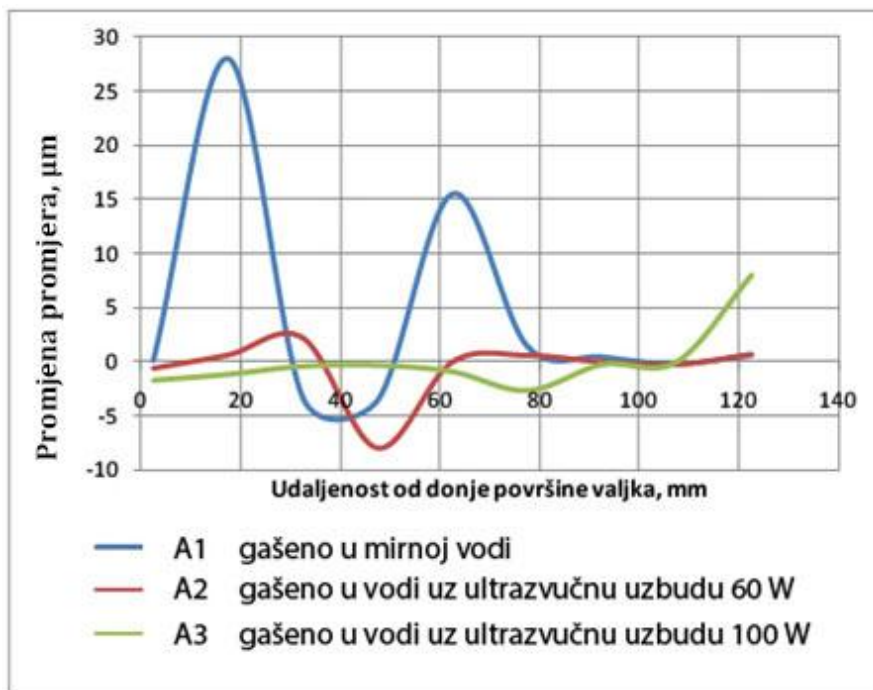
### 6.3. Utjecaj ultrazvučne uzbude na promjenu mjera i oblika

#### 6.3.1 Promjena promjera

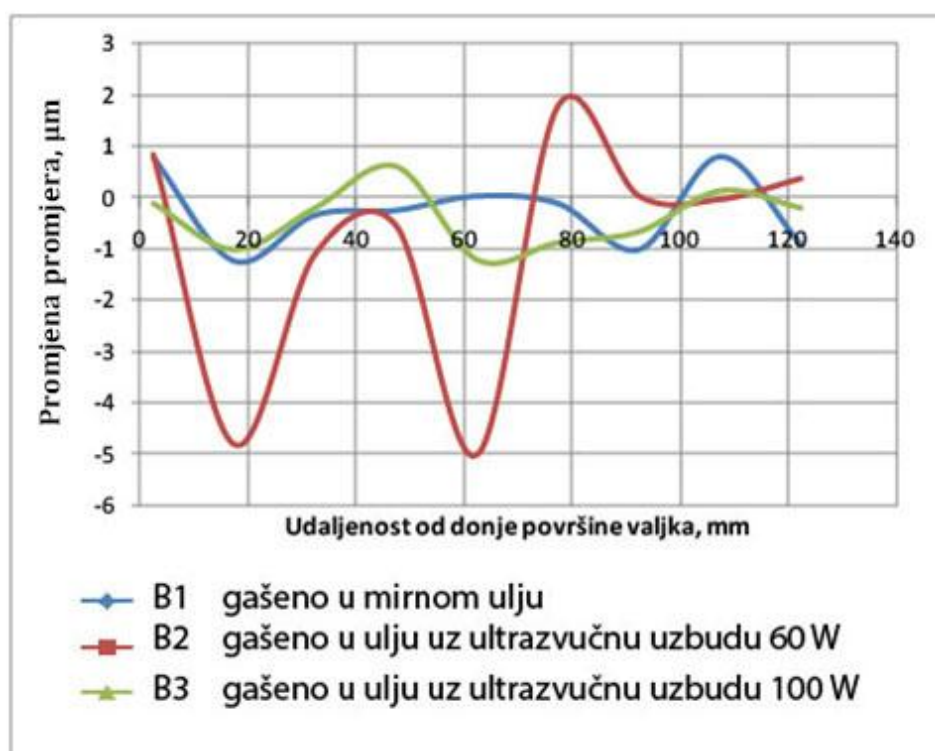
Na slici 71 prikazani su položaji mjerenja odstupanja od nazivnog promjera  $\phi 12,5$  mm. Odstupanja su mjerena pasametrom u 9 točaka po dva puta (1. i 2. mjerenje promjera - slika 71) prije i nakon kaljenja. Izračunata je srednja promjena promjera po duljini uzoraka. Rezultati za uzorke gašene u vodi su prikazani na slici 72, a za uzorke gašene u ulju na slici 73.



Slika 71. Pozicije mjerenja odstupanja od nazivnog promjera



Slika 72. Promjena promjera po duljini valjaka od čelika C45E gašenih u vodi s i bez djelovanja ultrazvučne uzbude



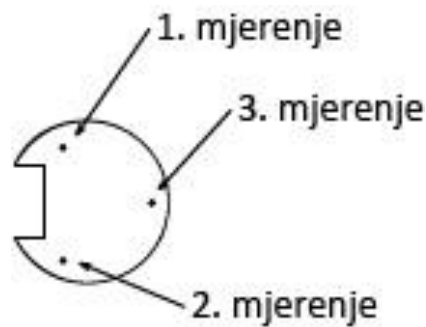
Slika 73. Promjena promjera po duljini valjaka od čelika C45E gašenih u ulju s i bez djelovanja ultrazvučne uzbude

Iz rezultata ispitivanja promjene promjera ispitnih uzoraka zaključuje se slijedeće:

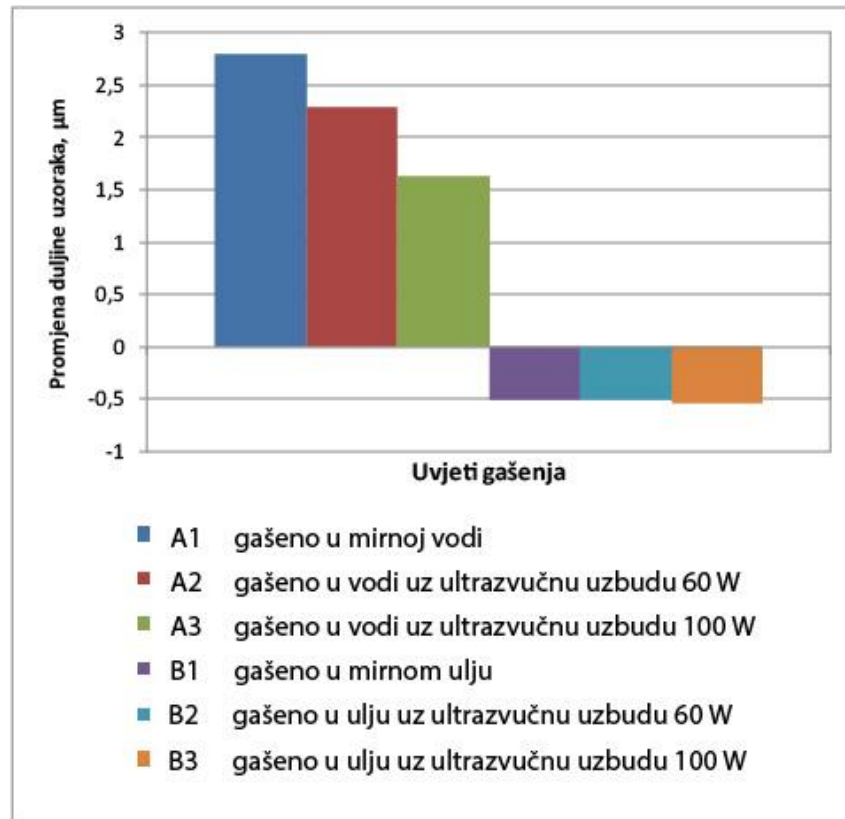
- Uzorci gašeni u mirnoj vodi pokazali su maksimalnu promjenu promjera od 25 do 30  $\mu\text{m}$  (slika 72).
- Gašenje u vodi uz ultrazvučnu uzбудu snage 100 W rezultiralo je minimalnom promjenom promjera manjom od 5  $\mu\text{m}$  uz visoku tvrdoću.
- Gašenje u mirnom ulju kao i u ulju s ultrazvučnom uzbudom nije zakalilo ni prokalilo uzorke, a izazvalo je kontrakciju (suženje) promjera do 5  $\mu\text{m}$ .

### 6.3.2. Promjene duljine

Duljine uzoraka mjerene su pomoću visinomjera u tri točke na donjem čelu, shematski prikazano na slici 74. Mjerenje je provedeno prije i nakon kaljenja, izračunate su aritmetičke sredine na temelju kojih je izračunata srednja promjena duljine za svaki uzorak kao što je prikazano na slici 75.



Slika 74. Položaji mjerenja duljine na donjem čelu uzorka



**Slika 75. Srednja promjena duljine uzoraka od čelika C45E gašenih u vodi ili ulju s i bez ultrazvučne uzbuđe**

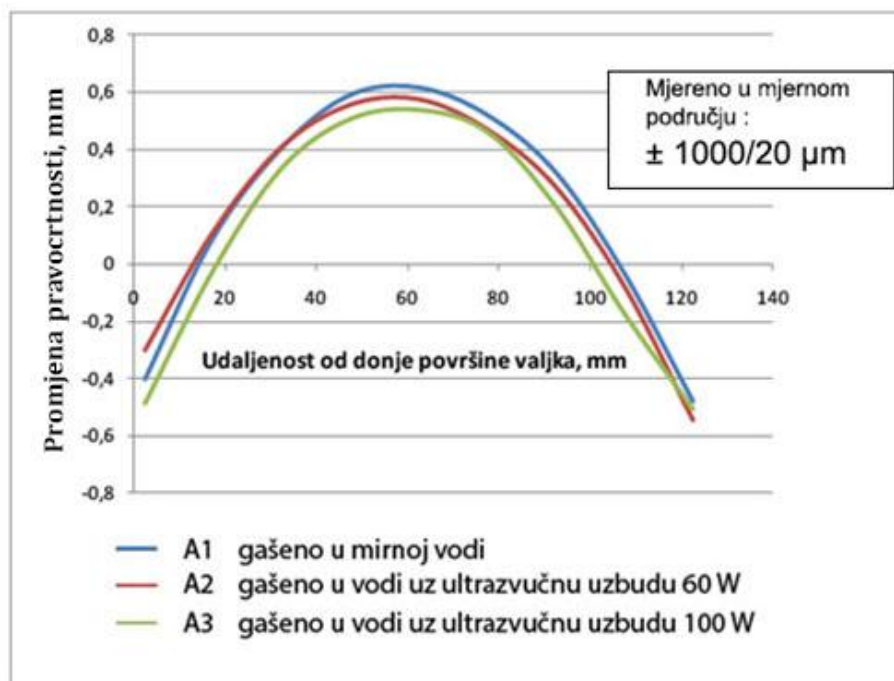
Iz mjernja promjen duljine ispitnih uzoraka gašenih u vodi, odnosno ulju za kaljenje zaključuje se sljedeće:

- Svi uzorci kaljeni u vodi s i bez ultrazvučne uzbuđe pokazali su povećanje duljine nasuprot uzorcima kaljenim u ulju čija se duljina smanjila.
- Najveću promjenu duljine (2,7 µm) pokazao je ispitni uzorak gašen u mirnoj vodi (slika 75).
- Primjena ultrazvuka ujednačila je uvjete ohlađivanja (skratila ili eliminirala fazu parnog omotača) što je dalo i manju promjenu duljine ispitnih uzoraka.
- Ispitni uzorak kaljen u vodi uz 100 W ultrazvučne uzbuđe pokazuje promjenu od 1,5 µm.
- Svi uzorci ohlađivani u ulju s i bez ultrazvučne uzbuđe pokazali su slično skraćenje od približno 0,5 µm, a prema prethodnim rezultatima tvrdoće i promjene promjera može se zaključiti da su se uzorci kaljeni u ulju skratili, a ujedno im se smanjio promjer što je karakteristično za normalizacijsko žarenje.

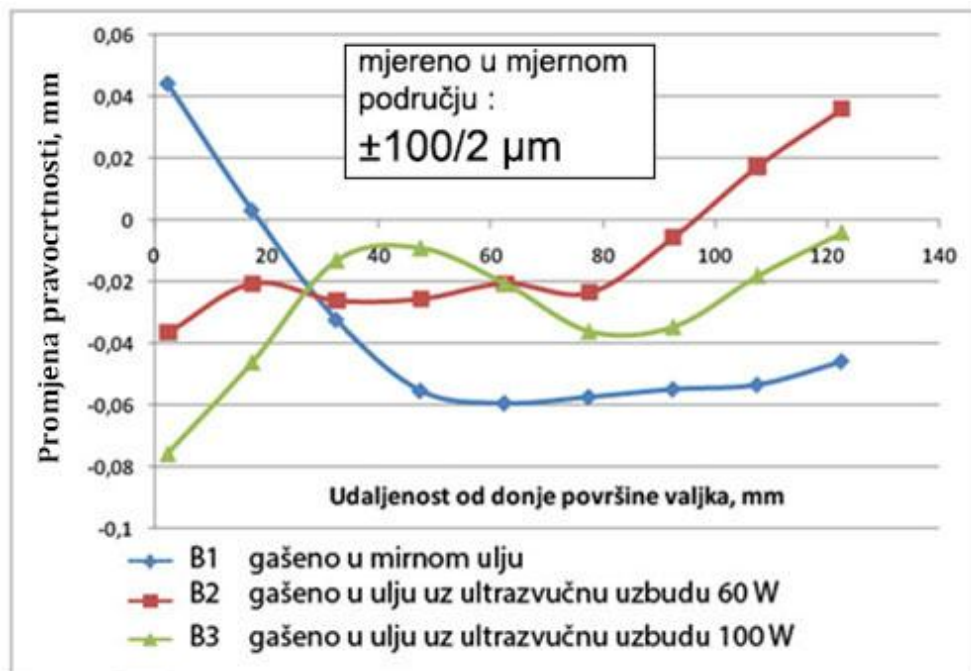
### 6.3.3 Promjena pravocrtnosti

Osim što su dugi (u odnosu na promjer), ispitni uzorci od čelika C45E namjerno su oslabljeni utorom i zato su skloni krivljenju. Može li se primjenom ultrazvuka, te u kojoj mjeri smanjiti navedeno krivljenje po dužini uzoraka može se provjeriti ispitivanjem promjene pravocrtnosti.

Ispitivanje se provelo na sljedeći način. Najprije je određena referentna točka (prema slici 62, točka najbliža gornjoj čeonj površini uzorka) u odnosu na koju se mjeri visina svih drugih točaka. Naravno, ove točke zbog ograničene točnosti strojne obrade već i prije samog kaljenja odstupaju od zamišljenog pravca, a nakon kaljenja odstupanje se dodatno povećava. Nakon kaljenja u odnosu na spomenutu referentnu točku mjere se (opet) odstupanja drugih točaka. Kako bi se dobio podatak koliko su se uzorci nakon kaljenja deformirali po dužini, oduzete su srednje vrijednosti dva mjerenja nakon kaljenja od srednjih vrijednosti (dva mjerenja) prije kaljenja i tako za svaku točku po dužini uzoraka. S obzirom na maksimalni raspon mjerenja uređaja za mjerenje pravocrtnosti, ispitivanje pravocrtnosti provedeno je u dva različita mjerna područja. Uzorci kaljeni u vodi mjereni su u mjernom području  $\pm 1000/20 \mu\text{m}$ , a uzorci kaljeni u ulju u mjernom području  $\pm 100/2 \mu\text{m}$ . Rezultat ispitivanja prikazan je na slici 76 za vodu i na slici 77 za ulje.



Slika 76. Promjena pravocrtnosti uzoraka od čelika C45E gašenih u vodi s i bez ultrazvučne uzbuđe



Slika 77. Promjena pravocrtnosti uzoraka od čelika C45E gašenih u ulju s i bez ultrazvučne uzbuđe

Iz mjernja promjene duljine ispitnih uzoraka gašenih u vodi, odnosno ulju za kaljenje zaključuje se slijedeće:

- Gašenjem u vodi svi ispitni uzorci deformirali su se po istom obrascu, tj. deformirani su se u istom smjeru, a povećanjem snage ultrazvučne uzbuđe smanjuje se i promjena pravocrtnosti, pa je najmanju deformaciju oblika pokazao uzorak gašen u vodi uz ultrazvučnu uzbuđu snage 100 W.
- Kod gašenja (hlađenja) u ulju deformacije oblika su manje, ali uzorci hlađeni uz dodatnu pomoć ultrazvučne uzbuđe deformirali su se suprotno od onih u mirnom ulju.

## 7. Zaključak

U radu je analiziran utjecaj ultrazvuka na krivulje hlađenja postignute u temperaturnoj probi za različite uvjete gašenja. Analiziran je i utjecaj ultrazvuka na deformacije i tvrdoću ispitnih uzoraka od čelika C45E nakon gašenja. Sumarno se mogu navesti sljedeći zaključci:

- Ultrazvučna uzbuda veće snage (100 W) djeluje pozitivno na gašenje čelika u smislu povećanja brzine ohlađivanja na površini i u jezgri obradaka, eliminacije parnog omotača, skraćivanja vremena ohlađivanja i povećanja maksimalne brzine ohlađivanja u odnosu na manju snagu (60 W) ili mirno sredstvo.
- Kaljenjem u vodi s ultrazvukom i bez njega postižu se maksimalne površinske tvrdoće u rasponu  $59 \pm 2$  HRC, a uzorci su praktički prokaljeni. Kaljenjem u ulju uz snagu 100 W postiže se djelomično zakaljena površina s povećanjem tvrdoće za 50% do 70% u odnosu na manju snagu te mirno ulje gdje površina nije zakaljena.
- Primjena ultrazvučne uzbude ujednačila je uvjete ohlađivanja i smanjila promjenu duljine, promjera, a djelomično i promjenu pravocrtnosti.

Bilo bi preporučljivo provesti ispitivanja mogućnosti smanjenja deformacija oblika uzoraka primjenom više osnosimetrično pozicioniranih ultrazvučnih sonde u odnosu na položaj uranjanja uzoraka, čime bi se moglo postići još ravnomjernije i intenzivnije ohlađivanje.

## 8. Literatura

- [1] Totten G. E., Steel heat treatment, Metallurgy and Technologies, Portland State University, 2006.
- [2] Halasz B., Zbirka zadataka iz uvoda Uvoda u termodinamiku, FSB , Zagreb, 2009.
- [3] Gondrexon N., Enhancement of Heat Transfer by Ultrasound: Review and Recent Advances, Universit' e de Savoie, France, 2011.
- [4] Prezelj J., A Sound Pressure Field During The Quenching of a Steel Specimen in Different Water Solutions, Ljubljana, 2011.
- [5] Kim H. Y., Enhancement of Natural Convection and Pool Boiling Heat Transfer via Ultrasonic Vibration, International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 2831–2840
- [6] Cajner F., Matijević B. , Toplinska obrada, Autorizirane podloge za predavanja, FSB Zagreb, 2012.
- [7] IVF SmartQuench, User's Manual, Version 3.1, 1<sup>st</sup> edition, Molndal, 2009.
- [8] Pedišić Lj. , Matijević B. , J. Munić: Utjecaj koncentracije vodomješivih tekućina za obradbu metala na sposobnost ohlađivanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2008.
- [9] Liščić B., Filetin T., Computer System For Selection Of Quenching Condition And Prediction Of Hardness, FSB Zagreb
- [10] Totten G., Webster G., Cooling Curve Analysis, Advanced Materials & Processes, 2000.
- [11] Houghton on Quenching, <http://testweb.houghtonglobal.com/uk/quenching.htm>, posjećeno 8.6.2015.
- [12] Tensi M., Totten G., Fundamentals About Quenching by Submerging, Illinois, 1994.
- [13] Candale F., Totten G., Eliminate Quench Cracking With Agitation; Heat Treating Progress , 2004.
- [14] Totten G., Webster G., Liscic B., Standards for Cooling Curve Analysis of Quenchants, Heat treatment of metals, Travanj 1997., str. 92-94
- [15] <http://www.saarstahl.com> , posjećeno 28.6.2015.
- [16] Landek D., Određivanje parametara austenitizacije, Autorizirane podloge za vježbe, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.



- [17] IVF SmartQuench, User's Manual, Version 3.1, 1<sup>st</sup> edition, Molndal, 2009.
- [18] <http://www.ultraschall-anlagen.de/catalog/en/sonopuls-3400-p-475.html>, posjećeno 2.7.2015.
- [19] Cajner F., Filetin T., Toplinska obrada – Praktikum, FSB Zagreb, 1992.

# **PRILOZI**

**Prilog 1.1.** - Parametri gašenja određeni s krivulja gašenja računalnim programom IVF SmartQuench

Curve name	CR300 [C/s]	CR550 [C/s]	CRM ax [C/s]	T(CRM ax) [C]	t(CRM ax) [s]	Time to 200 C [s]	Time to 400 C [s]	Time to 600 C [s]	Tcp [C]	Tvp [C]
VODA-20C,ivf	88,58	220,33	226,38	614	5,21	7,92	5,32	4,27	140,04	848,51
W-60W20C,ivf	89,14	221,07	226,71	597,2	4,96	7,62	4,99	3,95	144,1	822,26
W-1W-2C,ivf	102,98	252,74	269,42	640,35	2,98	5,16	3,07	2,13	175,24	850,46
POS5-20C,ivf	7,14	67,12	74,44	521,03	15,87	46,52	17,22	13,18	351,64	604,49
POS5-60W20C,ivf	9,98	70,52	73,37	529,64	15,25	37,94	16,69	13,07	289,15	623,02
POS5-1W2C,ivf	15,24	90,15	111,07	738,94	3,35	21,04	6,71	3,74	604,04	848,76
POS5-2W2C,ivf	21,27	91,32	124,09	729,88	3,1	16,4	6,29	3,26	299,92	850,18
POS5-3W2C,ivf	24,15	93,48	131,44	709,72	2,98	14,13	5,69	2,88	252,18	850,21

**PRILOG 2.1** – Tvrdoće na površini uzoraka za vodu

tvrdoća, HRC	Udaljenost od donjeg čela , mm										
		122,5	107,5	92,5	77,5	62,5	47,5	32,5	17,5	2,5	
Voda	A1 (voda)	1. mjernje	10,5	46,5	54,5	57,5	58,5	60	60,5	57,5	55
		2. mjerenje	9,5	50,5	63	63	58,5	58,5	58	59,5	54
		srednja vrijednost	10	48,5	58,75	60,25	58,5	59,25	59,25	58,5	54,5
		gornje odstupanje	0,5	2	4,25	2,75	0	0,75	1,25	1	0,5
		donje odstupanje	0,5	2	4,25	2,75	0	0,75	1,25	1	0,5
	A2 (voda + UZV 60W)	1. mjernje	13	33	58	53	56,5	52,5	59	60	60
		2. mjerenje	13	43,5	61,5	62	61	58,5	62	60	58
		srednja vrijednost	13	38,25	59,75	57,5	58,75	55,5	60,5	60	59
		gornje odstupanje	0	5,25	1,75	4,5	2,25	3	1,5	0	1
		donje odstupanje	0	5,25	1,75	4,5	2,25	3	1,5	0	1
	A3 (voda + UZV 100W)	1. mjernje	11,5	11,5	8	46	54,5	61	58	55	57,5
		2. mjerenje	14,5	13,5	14,5	58,5	59	59	57	62	61
		srednja vrijednost	13	12,5	11,25	52,25	56,75	60	57,5	58,5	59,25
		gornje odstupanje	1,5	1	3,25	6,25	2,25	1	0,5	3,5	1,75
		donje odstupanje	1,5	1	3,25	6,25	2,25	1	0,5	3,5	1,75

**PRILOG 2.1** (*nastavak tablice*) – Tvrdoće na površini uzoraka za ulje

tvrdoća, HRC	Udaljenost od donjeg čela , mm										
		122,5	107,5	92,5	77,5	62,5	47,5	32,5	17,5	2,5	
Ulje INA Kalenol 15	B1 (ulje)	1. mjernje	12,5	10	18,5	20,5	20,5	24	25	29	24
		2. mjerenje	12	9	18,5	21	24	22	25	26	28
		srednja vrijednost	12,25	9,5	18,5	20,75	22,25	23	25	27,5	26
		gornje odstupanje	0,25	0,5	0	0,25	1,75	1	0	1,5	2
		donje odstupanje	0,25	0,5	0	0,25	1,75	1	0	1,5	2
	B2 (ulje + UZV 60W)	1. mjernje	11	10,5	21	21	22	24	25,5	26	26
		2. mjerenje	13	8	21,5	23,5	24,5	24	26	26	25
		srednja vrijednost	12	9,25	21,25	22,25	23,25	24	25,75	26	25,5
		gornje odstupanje	1	1,25	0,25	1,25	1,25	0	0,25	0	0,5
		donje odstupanje	1	1,25	0,25	1,25	1,25	0	0,25	0	0,5
	B3 (ulje + UZV 100W)	1. mjernje	13	11,5	38	42	31	34	31	26	27
		2. mjerenje	14,5	14	43,5	56	49,5	44	41	44	49
		srednja vrijednost	13,75	12,75	40,75	49	40,25	39	36	35	38
		gornje odstupanje	0,75	1,25	2,75	7	9,25	5	5	9	11
		donje odstupanje	0,75	1,25	2,75	7	9,25	5	5	9	11

**PRILOG 3.1** – Tvrdoće po poprečnom presjeku za uzorke A1, B1, A3,B3

	Točka ispitivanja tvrdoće							
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Uzorak								
<b>A1</b>	25,5	25	24	27	20,5	22,5	29	22,5
<b>B1</b>	59	55,5	51	56	60	49,5	56,5	59
<b>A3</b>	57,5	51	50	56	59	51	51	57,5
<b>B3</b>	25	25	24	29	25	25	25,5	26

**Prilog 4.1** – rezultati mjerenja odstupanja od nazivnog promjera; promjena promjera

odstupanje promjera od nazivne mjere, $\mu\text{m}$			Udaljenost od donjeg čela, mm									
			122,5	107,5	92,5	77,5	62,5	47,5	32,5	17,5	2,5	
Voda	A1	d0	1. mjer.	-11	-23	-16	-8	-2	4	4	0	-7
			2. mjer.	-13	-24	-14	-6	0	5	5	-1	-6
			srednja vrijednost	-12	-23,5	-15	-7	-1	4,5	4,5	-0,5	-6,5
		d1	1. mjer.	-20	-20	-23	-18	-18	-13	-11	-14	-6
			2. mjer.	-18	-18	-20	-16	-15	-10	-10	-15	-8
			srednja vrijednost	-19	-19	-21,5	-17	-16,5	-11,5	-10,5	-14,5	-7
			$\Delta d$	0,583333	-0,1915	0,4333	1,428571	15,5	3,5556	-3,33333	28	0,076923
	A2	d0	1. mjer.	-6	-14	-9	-2	1	2	-4	-14	-22
			2. mjer.	-8	-16	-10	-3	-1	0	-5	-14	-22
			srednja vrijednost	-7	-15	-9,5	-2,5	0	1	-4,5	-14	-22
		d2	1. mjer.	-12	-10	-9	-4	-7	-6	-14	-22	-8
			2. mjer.	-12	-13	-10	-4	-6	-8	-15	-24	-10
			srednja vrijednost	-12	-11,5	-9,5	-4	-6,5	-7	-14,5	-23	-9
			$\Delta d$	0,714286	-0,2333	0	0,6	0	-8	2,222222	0,64286	-0,59091
	A3	d0	1. mjer.	-2	-16	-9	-2	6	12	12	7	-4
			2. mjer.	0	-15	-10	-1	7	12	12	5	-3
			srednja vrijednost	-1	-15,5	-9,5	-1,5	6,5	12	12	6	-3,5
		d3	1. mjer.	-10	-16	-6	4	2	10	8	0	2
			2. mjer.	-8	-15	-8	1	-1	6	6	-2	3
			srednja vrijednost	-9	-15,5	-7	2,5	0,5	8	7	-1	2,5
			$\Delta d$	8	0	0,2632	2,666667	0,9231	0,3333	-0,41667	1,16667	-1,71429
d0 - odstupanje od nazivnog promjera ( $\varnothing 12,5$ mm) prije gašenja; d1, d2, d3 - odstupanje od nazivnog promjera nakon gašenja; $\Delta d$ - promjena promjera												

**Prilog 4.1. (nastavak tablice)** – rezultati mjerenja odstupanja od nazivnog promjera; promjena promjera

odstupanje promjera od nazivne mjere, $\mu\text{m}$			Udaljenost od donjeg čela, mm										
				122,5	107,5	92,5	77,5	62,5	47,5	32,5	17,5	2,5	
Ulje INA Kalenol	B1	d0	1. mjer.	10	-4	2	10	15	15	11	6	-9	
			2. mjer.	12	-6	0	8	13	14	10	3	-10	
			srednja vrijednost	11	-5	1	9	14	14,5	10,5	4,5	-9,5	
		d1	1. mjer.	0	-8	2	8	16	12	8	0	-16	
			2. mjer.	2	-10	-2	8	13	10	6	-2	-18	
			srednja vrijednost	1	-9	0	8	14,5	11	7	-1	-17	
			$\Delta d$		-		0,1111	0,0357		-	0,3333	1,2222	0,78
					0,909091	0,8	-1	11	1	-0,2414	3	2	9474
		B2	d0	1. mjer.	-14	-22	-14	-4	0	6	5	2	-6
	2. mjer.			-12	-19	-11	-1	2	7	6	3	-8	
	srednja vrijednost			-13	-20,5	-12,5	-2,5	1	6,5	5,5	2,5	-7	
	d2		1. mjer.	-20	-22	-16	-8	-4	2	-2	-8	-8	
			2. mjer.	-16	-18	-10	-6	-4	4	1	-11	-18	
			srednja vrijednost	-18	-20	-13	-7	-4	3	-0,5	-9,5	-13	
			$\Delta d$		-					1,0909		0,85	
					0,384615	0,0244	0,04	1,8	-5	-0,5385	1	-4,8	7143
	B3		d0	1. mjer.	-2	-20	-14	-8	-3	2	2	0	-9
		2. mjer.		-3	-18	-12	-7	-2	3	3	2	-9	
		srednja vrijednost		-2,5	-19	-13	-7,5	-2,5	2,5	2,5	1	-9	
		d3	1. mjer.	-2	-23	-4	0	2	5	3	2	0	
			2. mjer.	-2	-20	-5	-2	-1	3	1	-2	-16	
			srednja vrijednost	-2	-21,5	-4,5	-1	0,5	4	2	0	-8	
			$\Delta d$		0,1315	-	0,8666					0,11	
					-0,2	8	0,6538	67	-1,2	0,6	-0,2	-1	111
d0 - odstupanje od nazivnog promjera ( $\varnothing 12,5$ mm) prije gašenja; d1, d2, d3 - odstupanje od nazivnog promjera nakon gašenja; $\Delta d$ - promjena promjera													



**Prilog 5.1.** – Rezultati mjerenja duljine uzoraka; promjena duljine

	Oznaka uzorka	Duljina, mm	Mjerenje			Srednja vr.	$\Delta L$ , $\mu\text{m}$
			1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje		
Voda	A1	L0 (125)	125,22	125,19	125,2	125,2033333	2,7927
		L1	125,669	125,62	125,37	125,553	90394
	A2	L0	125,24	125,23	125,23	125,2333333	2,2890
		L2	125,589	125,622	125,349	125,52	60421
	A3	L0	125,2	125,22	125,2	125,2066667	1,6319
		L3	125,476	125,515	125,242	125,411	68479
Ulje INA kalenol	B1	L0	125,25	125,24	125,26	125,25	-
		L1	125,158	125,192	125,212	125,1873333	0,5003 32668
	B2	L0	125,15	125,17	125,18	125,1666667	-
		L2	125,052	125,133	125,128	125,1043333	0,4980 02663
	B3	L0	125,24	125,25	125,24	125,2433333	-
		L3	125,173	125,193	125,164	125,1766667	0,5322 97128
L0 - duljina uzoraka prije kaljenja; L1, L2, L3 duljina uzoraka nakon kaljenja; $\Delta L$ promjena duljine							

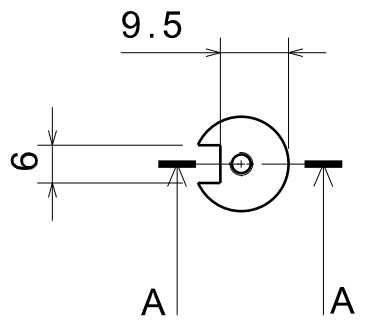
**Prilog 5.1.** -Rezultati mjerenja pravocrtnosti prije kaljenja

Pomak od početne mjerne kote u točki br. 1 (točka uz rupu M3) mjeren u mikrometrima

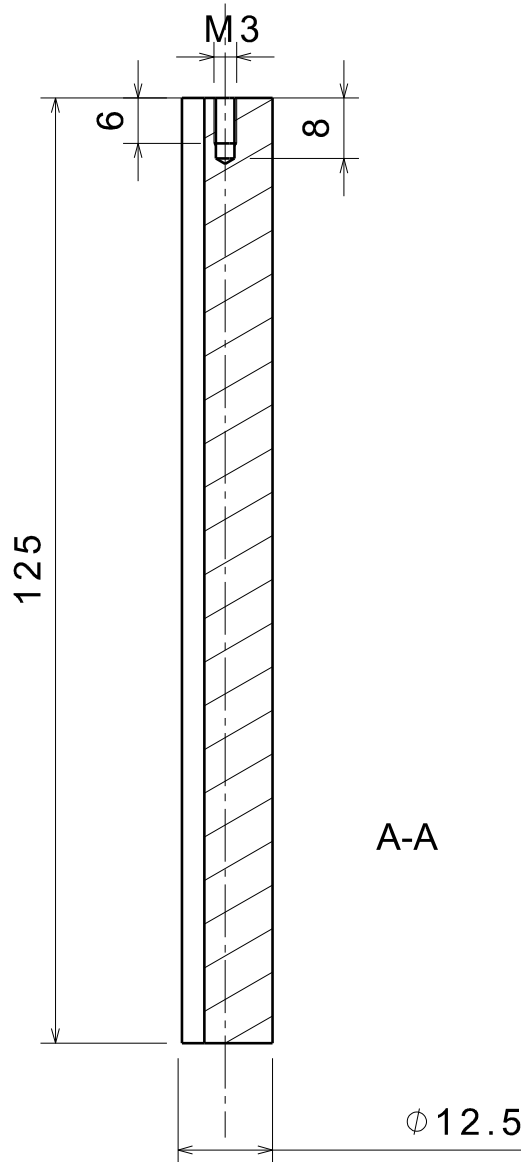
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>A1</b>	0	34	54	68	68	48	29	-9	-38
	0	32	56	71	69	50	28	-6	-36
<b>A2</b>	0	29	53	61	56	38	11	-18	-43
	0	28	50	60	54	40	10	-18	-54
<b>A3</b>	0	40	56	82	85	72	52	23	-7
	2	46	74	89	92	79	60	30	0
<b>B1</b>	0	38	64	66	64	56	31	2	-23
	26	60	86	90	90	79	51	25	0
<b>B2</b>	0	30	59	76	81	83	59	35	5
	-6	19	50	73	74	72	60	30	0
<b>B3</b>	0	40	56	68	70	51	34	3	-28
	30	62	82	97	96	75	63	33	0




**Prilog 5.2.** -Rezultati mjerenja pravocrtnosti nakon kaljenja

μm	polozaj	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A1	1 mjer	-500	-50	330	540	640	600	390	40	-480
	2 mjer	-460	50	420	640	730	680	480	130	-400
A2	1 mjer	-600	-100	270	480	580	560	370	50	-400
	2 mjer	-490	0	370	580	680	630	470	140	-300
A3	1 mjer	-500	-130	270	550	630	580	400	10	-480
	2 mjer	-510	-130	260	540	620	580	380	0	-500
B1	1 mjer	0	28	50	55	48	44	41	46	65
	2 mjer	-66	-37	-10	-14	-13	-20	-24	-13	0
B2	1 mjer	0	12	14	16	24	18	-1	-22	-68
	2 mjer	66	72	84	86	90	86	68	46	0
B3	1 mjer	0	14	26	45	64	76	54	-7	-66
	2 mjer	-14	-1	14	32	50	61	39	-20	-80



Ra 0,4



ISO-tolerancije		Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB</b> Zagreb
	Projektirao				
	Razradio	Razradio			
	Crtao	Kušar			
	Pregledao				
Objekt:				Objekt broj:	
				R. N. broj:	
Napomena:					
Materijal:			Masa:		
					Kopija
 		Naziv:		Poz:	Format: A4
Mjerilo:		Ispitni valjak s utorom			List:
M 1:1		Broj crteža:			Listova: