

Unos i provođenje topline pri TIG zavarivanju bakra i legura bakra

Zelić, Mihael

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:557971>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-18**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN



Diplomski rad br. 120/STR/2024

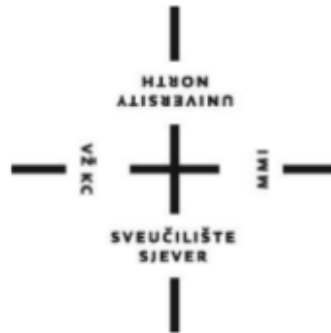
Unos i provođenje topline pri TIG zavarivanju bakra i legura bakra

Mihael Zelić, 0119019215

Varaždin, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE SJEVER SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN

Studij: sveučilišni diplomski Strojtarstvo



Diplomski rad br. 120/STR/2024

Unos i provođenje topline pri TIG zavarivanju bakra i legura bakra

Student:

Mihael Zelić , 0119019215

Mentor:

Doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj

Varaždin, rujan 2024.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarstvo		
PRISTUPNIK	Mihael Zelić	MATIČKI BROJ	0119019215
DATUM	13.09.2024.	KOLEGIJE	Suvremene proizvodne tehnologije
NASLOV RADA	Unos i provođenje topline pri TIG zavarivanju bakra i legura bakra		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Heat input and conductivity in TIG welding of copper and copper alloys		

MENTOR	dr.sc. Matija Bušić	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, predsjednik povjerenstva		
	2. doc.dr.sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva		
	3. doc.dr.sc. Boris Jalušić, član povjerenstva		
	4. doc.dr.sc. Zlatko Botak, zamjenski član povjerenstva		
	5.		

Zadatak diplomskog rada

BROJ	120/STR/2024
OPIS	<p>U uvodnom dijelu diplomskog rada na osnovi literaturnih podataka potrebno je dati pregled svojstava i primjene legura bakra. Potrebno je proučiti i opisati specifičnosti TIG zavarivanja bakra i legura bakra. Opisati odabir parametara zavarivanja i zaštitnih plinova. Posebno detaljno proučiti izračun unosa i provođenja topline za TIG zavarivanje te utjecaj dimenzija osnovnog materijala na provođenje topline. Definirati potrebne dimenzije uzorka za zavarivanje pri atestaciji postupka prema normi HRN EN ISO 15614-6:2008.</p> <p>U eksperimentalnom dijelu rada na odgovarajućim uzorcima legure bakra provesti TIG zavarivanje te definirati potrebne parametre prema različitim dimenzijama uzoraka. Pri zavarivanju mjeriti temperaturu na pojedinim mjestima osnovnog materijala uz područje zavarivanja. Usporediti izmjerene vrijednosti sa proračunom odvođenja topline i predviđenim vrijednostima temperatura. Na zavarenim uzorcima potrebno je provesti vizualno ispitivanje zavarenih spojeva i odrediti prihvatljivost geometrije zavarenog spoja. Na temelju rezultata donijeti zaključke o utjecaju pojedinih parametara i dimenzija ispitnih uzoraka na penetraciju i apsorbiranu toplinu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.</p>

ZADATAK URUČEN

16.09.2024.



POTPIS MENTORA

M. Bušić

Ja, Mihael Zelić pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom

Unos i provođenje topline pri TIG zavarivanju bakra i legure bakra te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:

Mihael Zelić



(vlastoručni potpis)

Predgovor

Izrada ovog diplomskog rada bila je zahtjevan proces koji ne bih mogao završiti bez pomoći i podrške nekoliko važnih osoba. Prije svega, želim izraziti svoju iskrenu zahvalnost mentoru, Doc. dr. sc. Matiji Bušiću, na stručnoj podršci i savjetima tijekom izrade diplomskog rada. Posebno zahvaljujem doc. dr. sc. Tomislavu Velikom za nesebičnu pomoć i podršku tijekom izrade eksperimenta, bez čije bih pomoći eksperimentalni dio rada bio daleko teži.

Također, želim se zahvaliti svojoj obitelji, mojoj supruzi Steli, te našoj djeci Izaku, Jakovu i Magdaleni, koji su mi pružili bezuvjetnu ljubav i razumijevanje tijekom cijelog ovog procesa.

Ovaj rad posvećujem svom ocu Draženu, koji nažalost više nije s nama, ali čija me snaga i podrška prate na svakom koraku mog puta.

Sažetak:

Rad se bavi analizom unosa i provođenja topline pri TIG zavarivanju bakra i njegovih legura. Zbog visoke toplinske vodljivosti bakra, održavanje optimalne temperature zavarivanja predstavlja izazov. Cilj istraživanja bio je ispitati distribuciju temperature tijekom procesa protaljivanja, a ne zavarivanja, kako bi se minimizirao utjecaj faznih promjena u materijalu. Provedeni su eksperimentalni i numerički pristupi, uključujući ANSYS simulacije, radi boljeg razumijevanja toplinskih procesa. Eksperimenti su omogućili mjerenje distribucije temperature na simetričnim točkama ploča pomoću termoparova, dok se pokretni izvor topline kretao preko bakrenih ploča. Analizirani su parametri kao što su brzina izvora, vrsta zaštitnog plina i početna temperatura materijala. Rad također obuhvaća preporuke za optimizaciju parametara zavarivanja radi postizanja kvalitetnijih spojeva te smanjenja deformacija zavarenih materijala.

Ključne riječi: TIG zavarivanje, bakar, provođenje topline, toplinska vodljivost, numeričke simulacije, predgrijavanje, kvaliteta zavara

Summary:

The paper focuses on the analysis of heat input and conduction during TIG welding of copper and its alloys. Due to the high thermal conductivity of copper, maintaining the optimal welding temperature presents a challenge. The goal of the research was to examine the temperature distribution during the process of gouging, rather than welding, to minimize the impact of phase changes in the material. Experimental and numerical approaches were conducted, including ANSYS simulations, to better understand the thermal processes. Experiments allowed for the measurement of temperature distribution at symmetrical points on the plates using thermocouples, while the moving heat source passed over copper plates. Parameters such as the speed of the source, type of shielding gas, and the initial temperature of the material were analyzed. The paper also includes recommendations for optimizing welding parameters to achieve better-quality joints and reduce deformation of welded materials.

Key words: TIG welding, copper, heat conduction, thermal conductivity, numerical simulations, preheating, weld quality

Popis korištenih kratica

- **TIG** - Tungsten Inert Gas (elektrolučno zavarivanje volframovom elektrodom u inertnoj atmosferi zaštitnog plina)
- **GTAW** - Gas Tungsten Arc Welding (isto kao i TIG)
- **SMAW** - Shielded Metal Arc Welding (ručno elektrolučno zavarivanje)
- **WIG** - Wolfram Inert Gas (njemačka oznaka za TIG)
- **MIG** - Metal Inert Gas (elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina)
- **AC** - Alternating Current (izmjenična struja)
- **Ar** - Argon (argon)
- **CAD** - Computer-Aided Design (oblikovanje s pomoću računala)
- **CAM** - Computer-Aided Manufacturing (proizvodnja s pomoću računala)
- **CC** - Constant Current (strmopadajuća (statička) karakteristika izvora struje)
- **Cr** - Chromium (krom)
- **CV** - Constant Voltage (ravna karakteristika izvora struje)
- **DC** - Direct Current (istosmjerna struja)
- **EPP** - Submerged Arc Welding (elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška, SAW)
- **FC-TIG** - TIG welding method using flux-cored wires (TIG metoda zavarivanja koja koristi praškom punjene žice)
- **FCAW** - Flux Cored Arc Welding (ručno elektrolučno zavarivanje taljivom žicom pod zaštitom praška)
- **He** - Helium (helij)
- **Hz** - Hertz (mjerna jedinica za frekvenciju)
- **MAG** - Metal Active Gas (elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina)
- **Ni** - Nickel (nikal)
- **REL** - Manual Metal Arc Welding (ručno elektrolučno zavarivanje, MMAW)
- **Th** - Thorium (torij)
- **TIP-TIG** - TIG welding process with cold and hot wire (TIG postupak zavarivanja s hladnom i vrućom žicom)
- **W** - Tungsten (volfram)
- **ZUT** - Heat Affected Zone (zona utjecaja topline)
- **FCC** - Face-Centered Cubic (plošno centrirana kubna rešetka)

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Bakar i bakrene legure	2
2.1.	Bakar	2
2.2.	Bakrene legure.....	5
2.2.1.	<i>Legure bakra s cinkom</i>	5
2.2.2.	<i>Legure bakra bez cinka</i>	6
2.3.	Zavarljivost bakra i bakrenih legura.....	8
2.3.1.	<i>Načini, metode i parametri TIG zavarivanja bakra</i>	9
3.	Osnove TIG zavarivanja	11
3.1.	Princip rada TIG zavarivanja	12
3.2.	Izvor električne struje.....	15
3.3.	Netaljive elektroda za zavarivanje	17
3.4.	Parametri zavarivanja	19
3.4.1.	<i>Brzina zavarivanja</i>	21
3.4.2.	<i>Zaštitni plinovi</i>	21
4.	Toplinski procesi kod TIG zavarivanja.....	25
4.1.	Fizika zavarivanja.....	25
4.1.1.	<i>Kondukcija ili vođenje topline</i>	26
4.1.2.	<i>Konvekcija topline</i>	27
4.1.3.	<i>Radijacija ili zračenje topline</i>	28
4.2.	Unos energije pri zavarivanju.....	29
4.3.	Učinkovitost prijenosa topline pri TIG zavarivanju.....	29
5.	Distribucija temperature prilikom TIG zavarivanja.....	35
5.1.	Toplinska jednadžba.....	37
5.2.	Rubni uvjeti toplinske jednadžbe	41
5.3.	Modeliranje toplinskog izvora	44
5.4.	Metode rješavanja toplinske jednadžbe pri zavarivanju.....	47
5.5.	Rješenja toplinske jednadžbe	48
5.5.1.	<i>Trenutni planarni izvor na tankoj ploči</i>	48
5.5.2.	<i>Trenutni planarni izvor s uključenim gubitcima</i>	55
5.5.3.	<i>Normalno distribuirani (Gaussov) toplinski izvor na tankoj ploči</i>	56
6.	ANSYS simulacija	59
6.1.	Rezultati analize simulacije ploče (195 mm x 150 mm).....	63
6.2.	Rezultati analize simulacije ploče (195 mm x 75 mm).....	66
6.3.	Zaključak simulacije.....	70
7.	Ekperimentalno određivanje distribucije temperature TIG protaljivanja ETP bakrenih ploča	71
7.1.	Opis eksperimentalnog rada	71
7.2.	Materijal ploča.....	72
7.3.	Tehnička oprema	73
7.3.1.	<i>Precizni skener temperature: Fluke 1586A Super-DAQ</i>	73
7.3.2.	<i>Termometri - termoparovi</i>	75

7.3.3.	<i>TIG uređaj</i>	77
7.3.4.	<i>Uređaj za automatizirano vođenje elektrode</i>	79
7.4.	Rezultati mjerenja.....	81
8.	Zaključak.....	87
9.	Literatura.....	88

1. Uvod

Zavarivanje bakra i njegovih legura predstavlja ključan proces u mnogim industrijskim sektorima, uključujući elektrotehniku, strojogradnju, brodogradnju i građevinarstvo. Bakar, kao materijal visoke toplinske i električne vodljivosti, nalazi široku primjenu zahvaljujući svojim izvanrednim svojstvima. Međutim, upravo ta svojstva čine zavarivanje bakra izazovnim zadatkom. Visoka toplinska vodljivost bakra brzo odvodi toplinu iz zone zavarivanja, što otežava postizanje i održavanje optimalne temperature za zavarivanje. Uz to, bakar brzo oksidira pri visokim temperaturama, što može negativno utjecati na kvalitetu zavara i uzrokovati pojavu pogrešaka. TIG (Tungsten Inert Gas) zavarivanje, koje koristi netaljivu volframovu elektrodu u zaštitnoj atmosferi inertnog plina, prepoznato je kao učinkovita metoda za zavarivanje bakra i njegovih legura. Ova tehnika omogućuje preciznu kontrolu topline i minimalnu kontaminaciju zavara, što je ključno za postizanje visokokvalitetnih spojeva. TIG zavarivanje omogućuje izradu zavara s visokim stupnjem čistoće i minimalnim uključinama, što je posebno važno u industrijama gdje su pouzdanost i trajnost proizvoda od presudne važnosti. Cilj ovog istraživanja je detaljno istražiti proces unosa i provođenja topline pri TIG zavarivanju bakra i njegovih legura. Istraživanja će se usmjeriti na analizu distribucije temperature na bakrenim pločama tijekom zavarivanja, utjecaj različitih parametara zavarivanja na kvalitetu zavara te primjenu numeričkih metoda za simulaciju toplinskih procesa. Istraživanja će uključivati teorijsku analizu, eksperimentalna mjerenja i simulacije kako bi se dobio sveobuhvatan uvid u proces zavarivanja bakra. Osim toga, rad će obuhvatiti pregled dosadašnjih istraživanja i primjera iz prakse, što će pomoći u razumijevanju izazova i mogućnosti unapređenja tehnologije zavarivanja bakra. Razumijevanje toplinskih procesa pri zavarivanju bakra ključno je za razvoj novih tehnologija i poboljšanje postojećih postupaka u industriji. Očekuje se da će ovo istraživanje doprinijeti boljoj kontroli kvalitete zavara, smanjenju troškova proizvodnje te povećanju sigurnosti i pouzdanosti proizvoda izrađenih od bakra i njegovih legura. Nadalje, rezultati ovog istraživanja mogu poslužiti kao osnova za daljnje istraživačke projekte usmjerene na optimizaciju procesa zavarivanja i razvoj novih materijala i tehnologija. Eksperimentalni dio istraživanja uključivat će detaljna mjerenja distribucije temperature na bakrenim pločama tijekom TIG zavarivanja odnosno protaljivanja, koristeći termoparove u određenim točkama ploče. Simulacije će se provoditi korištenjem ANSYS programa kako bi se precizno modelirali i usporedili rezultati. Dobiveni podaci će se koristiti za optimizaciju parametara zavarivanja, s ciljem postizanja najbolje moguće kvalitete zavara.

2. Bakar i bakrene legure

Čovječanstvo se bakrom i bakrenim legurama koristi već dugi niz stoljeća, počevši od brončanog doba. Razlozi ranog korištenja bakra uključuju njegovu direktnu upotrebljivost u metalnom obliku nakon pronalaska u prirodi [1]. Danas se bakar pretežito koristi u elektrotehnici, dok se bakrene legure najviše primjenjuju u strojogradnji i brodogradnji [2]. Razvoj naprednih bakrenih legura proširio je njihovu primjenu, uključujući konstrukcijske primjene u teškim radnim uvjetima, prisutnim u industrijama poput naftne i plinske industrije, pomorstva, elektrana itd., gdje su otpornost na koroziju, kombinacija visoke čvrstoće, otpornosti na trošenje i umor od ključne važnosti [3] [21].

2.1. Bakar

Čisti bakar (nelegirani) smatra se najboljim vodičem električne struje nakon srebra, kao što je prikazano na slici (1.). Bakar pripada skupini 11 periodnog sustava elemenata i karakterizira ga visoka duktilnost te električna i toplinska vodljivost, što je rezultat prisutnosti jednog slobodnog elektrona po atomu u s-orbitali iznad popunjene d-ljuske. Metalne veze u bakru nisu kovalentne, što objašnjava nisku tvrdoću i visoku duktilnost monokristala bakra. Tvrdoća se povećava dodavanjem defekata, kao što su granice zrna, pa se bakar obično koristi u polikristalnom obliku. Bakar ima plošno centriranu kubičnu rešetku (FCC), koja omogućuje lako kretanje slobodnih elektrona, čime se postiže dobra električna vodljivost [4] [22].



Slika 1 elementarni bakar u prirodnom stanju [1].

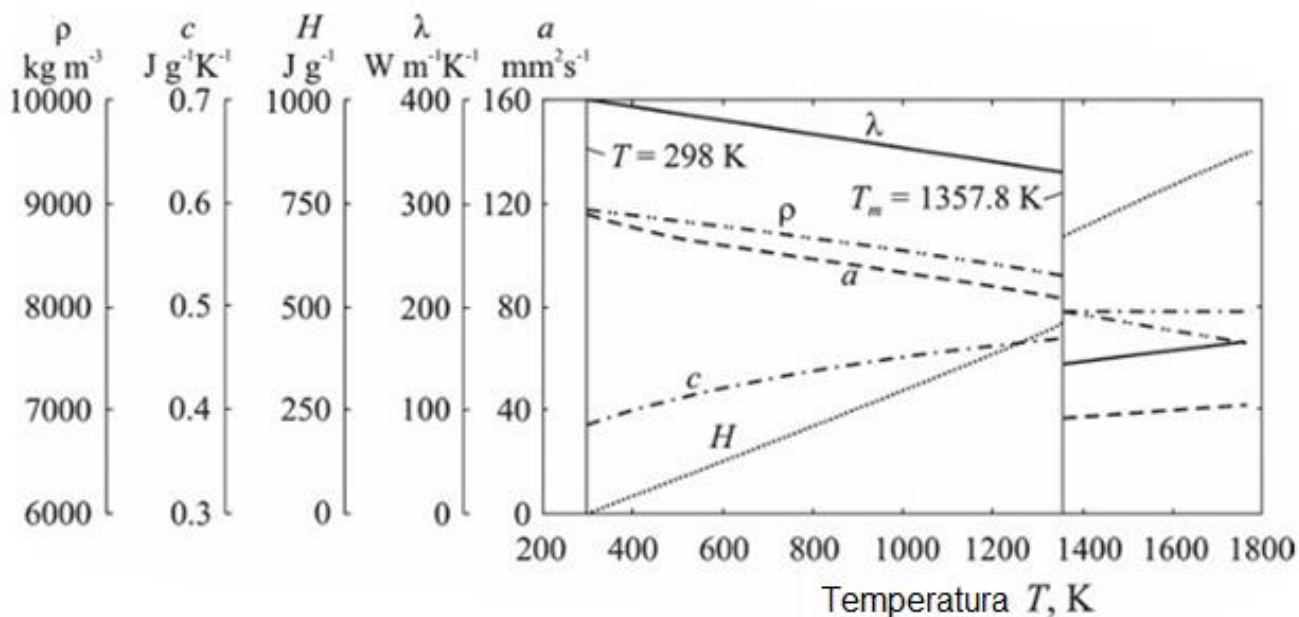
Ova struktura omogućuje bakru deformaciju bez pucanja zahvaljujući klizanju atoma u različitim smjerovima, što rezultira visokom duktilnošću i otpornosti na umor. Također, otpornost bakra na

koroziju proizlazi iz slobodnih elektrona, koji stvaraju zaštitni sloj na površini metala [4]. U sljedećoj tablici niže mogu se vidjeti osnovna fizikalna i mehanička svojstva bakra.

Tablica 1 Fizikalna i mehanička svojstva bakra [3].

FIZIKALNA I MEHANIČKA SVOJSTVA BAKRA – (ovisno o stanju)		
SVOJSTVO	Jedinica	Iznos
Atomski broj, A	-	29
Atomska masa, m_A	Da	63,54
Latentna toplina taljenja, Q	J/g	205
Specifični toplinski kapacitet, c	J/kg K	
Na 20 °C		0,386
Na 100 °C		0,393
Gustoća, ρ	mg/mm ³	8,93
Vrelište, T_{vr}	°C	
Talište, v_T	°C	1083
Modul elastičnosti, E	MPa	125 000
Toplinska rastezljivost, α_T	10 ⁻⁶ /K	17
Električna vodljivost, G	m/Ωmm ²	
Na 20 °C		39,4
Na 100 °C		38,5
Toplinska vodljivost, λ	W/mK	240-386
Vlačna čvrstoća, R_m	MPa	200-360
Istezljivost, A	%	45-2

Visoka električna vodljivost bakra ovisi o njegovoj čistoći. Primjese topljive u bakru, kao što su kadmij i fosfor, negativno utječu na vodljivost; kadmij ima manji, dok je utjecaj fosfora izraženiji. Elementi koji nisu topljivi u bakru u čvrstom stanju ne utječu na njegovu električnu vodljivost. Međunarodni standard za žareni bakar (IACS, engl. International Annealed Copper Standard) koristi se za definiranje električne vodljivosti materijala. IACS dodjeljuje vrijednost vodljivosti od 100 % čistom žarenom bakru pri 20 °C, omogućujući tako usporedbu vodljivosti različitih materijala [4][21][22].



Slika 2 Grafikon prikazuje svojstva bakra (gustoća ρ , specifični toplinski kapacitet c , entalpija H , toplinska vodljivost λ i toplinska difuzivnost a) kao funkcije temperature T [7].

Na temelju prikazane slike koja prikazuje svojstva bakra u ovisnosti o temperaturi, mogu se uočiti sljedeće promjene svojstava s porastom temperature [7]:

- **Gustoća (ρ):** Gustoća bakra smanjuje se s porastom temperature, što je očekivano jer se materijali šire pri zagrijavanju, što rezultira smanjenjem gustoće.
- **Specifični toplinski kapacitet (c):** Specifični toplinski kapacitet raste s porastom temperature. Ovo svojstvo pokazuje količinu topline potrebne za povećanje temperature materijala po kilogramu mase. Kako temperatura raste, bakar može apsorbirati više topline.
- **Latentna toplina (H):** Latentna toplina također se povećava s porastom temperature, dostižući vrhunac prije nego što se materijal počne taliti. Ovo je energija potrebna za fazne promjene, poput taljenja.
- **Toplinska vodljivost (λ):** Toplinska vodljivost opada s porastom temperature, što znači da bakar postaje manje učinkovit u provođenju topline kako se zagrijava.
- **Toplinska difuzivnost (a):** Toplinska difuzivnost također se smanjuje s porastom temperature. Toplinska difuzivnost mjeri brzinu širenja topline kroz materijal, a s nižom toplinskom difuzivnošću toplina se sporije širi kroz zagrijani bakar.

Ove promjene svojstava ključne su za razumijevanje i optimizaciju procesa zavarivanja, jer utječu na način na koji se toplina unosi i širi kroz bakrenu ploču.

Na primjer, s povećanjem specifičnog toplinskog kapaciteta i smanjenjem toplinske vodljivosti pri višim temperaturama, potrebna je veća količina energije za postizanje i održavanje temperature potrebne za zavarivanje [7]. Bakar je otporan na oksidaciju, slanu i slatku vodu, alkalne otopine itd. Međutim, oksidirajuće kiseline mogu nagristi bakar. Kada je izložen otvorenim prostorima, na površini bakra stvara se zelena prevlaka od ugljične kiseline iz zraka i lužnatog bakrenog karbonata [2]. Čvrstoća nelegiranog bakra u izravnoj je korelaciji s njegovom električnom vodljivošću i otopljenim primjesama. Tehnički čisti bakar ima nisku čvrstoću, koja se dodatno smanjuje pri višim radnim temperaturama. Niskolegirani bakar legira se malim količinama odgovarajućih legirajućih elemenata kako bi se povećala njegova čvrstoća bez značajnog utjecaja na električnu vodljivost. Srebro i arsen otapaju se u kristalu mješancu bakra, dok se precipitacijsko očvršćivanje postiže elementima kao što su berilij, krom, cirkonij, kadmij, željezo i fosfor. U strojarstvu je najvažnija legura bakra legirana s berilijem [2][21][22].

2.2. Bakrene legure

Klasifikacija bakrenih legura temelji se na vrsti i udjelu glavnih legirajućih elemenata, ali svaka vrsta može sadržavati i druge elemente koji mijenjaju specifična svojstva legure. Dvije glavne vrste bakrenih legura su legure bakra s cinkom, poznate kao mjedi, i legure bakra s kositrom, poznate kao bronce. Mjedima se mogu dodati i drugi elementi, a osnovne vrste mjedi su:

- α -mjedi, koje se mogu oblikovati deformiranjem u hladnom stanju
- $(\alpha+\beta)$ -mjedi, koje se mogu oblikovati deformiranjem u toplom stanju

Bronce, osim bakra, mogu sadržavati i olovo, aluminij, cink, željezo, mangan itd. Stoga se legure dijele na sljedeće skupine: legure bakra s cinkom i bez cinka [2].

2.2.1. Legure bakra s cinkom

1. Legure bakra s cinkom ($>50\%$ Cu i $<40\%$ Zn) – mjedi
2. Posebne mjedi (54-62% Cu, oko 7% drugih elemenata, ostatak Zn)
3. Legure bakra s niklom i cinkom (10-30% Ni) – novo srebro

Mjedi su legure bakra i cinka koje se široko koriste zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava i otpornosti na koroziju. Ove legure mogu sadržavati cink u rasponu od 5% do 40%, što im daje različite boje i svojstva. Veća količina cinka poboljšava čvrstoću i duktilnost, omogućujući

jednostavnije hladno oblikovanje. Mjedi se koriste za izradu vijaka, konektora, zupčanika i drugih komponenti koje zahtijevaju visoku čvrstoću i otpornost na trošenje. Dodavanjem drugih elemenata poput aluminija ili kositra, poboljšavaju se specifična svojstva legure, kao što su otpornost na koroziju ili mehanička svojstva. Mjedi su također poznate po svojoj dobroj provodljivosti, što ih čini pogodnima za električne i toplinske primjene. Lijevanje mjedi je jednostavno, te se često koriste u izradi vodovodnih armatura i dekorativnih predmeta [2].

Niklene srebrne legure, koje sadrže bakar, nikl i cink, imaju atraktivan srebrni sjaj i umjerenu čvrstoću. Ove legure su otporne na koroziju i koriste se za izradu opreme za rukovanje hranom i pićima, optičke i fotografske opreme, te glazbenih instrumenata. Niklene srebrne legure također se koriste u elektroplatanju stolnog pribora, zahvaljujući svojoj visokoj obradivosti u hladnom stanju i otpornosti na trošenje [2].

2.2.2. Legure bakra bez cinka

1. Legure bakra s kositrom (<15 % Sn) – kositrene bronce
2. Legure bakra s aluminijem (<14 % Al) – aluminijske bronce
3. Legure bakra s kositrom i/ili olovom (<10 % Sn i/ili <25 % Pb) – olovno-kositrene bronce i olovne bronce
4. Legure bakra s berilijem (<2 % Be) – berilijeve bronce
5. Legure bakra s manganom te silicijem i manganom – manganove i silicijske bronce
6. Legure bakra s niklom (<45 % Ni) [2]

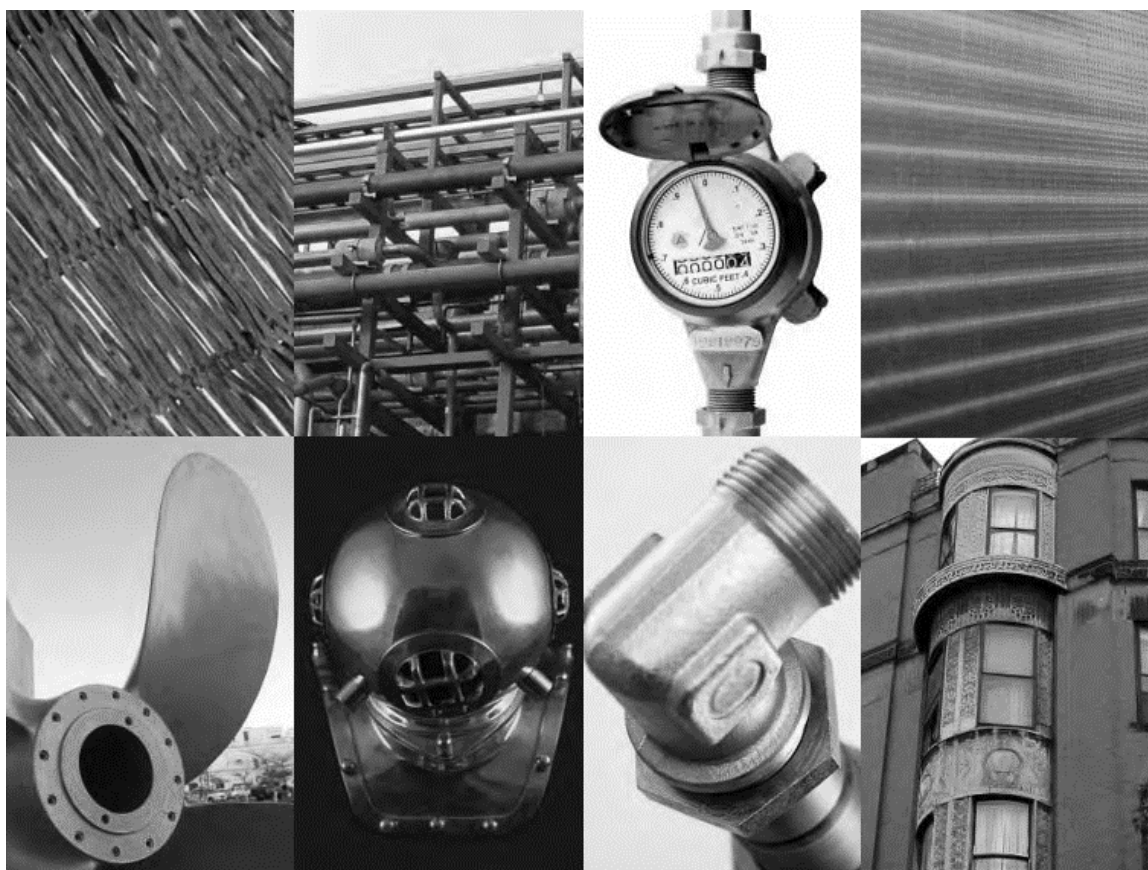
Bronce su legure bakra s kositrom i drugim elementima kao što su aluminij, olovo ili mangan. Ove legure su poznate po svojoj visokoj otpornosti na koroziju i trošenje, što ih čini idealnim za primjene u teškim uvjetima. Kositrena bronca, koja sadrži do 15 % kositra, koristi se za izradu ležajeva, zupčanika i drugih dijelova gdje je potrebna visoka čvrstoća i otpornost na trenje. Aluminijske bronce, koje sadrže do 14 % aluminija, pružaju visoku čvrstoću i izvanrednu otpornost na koroziju, posebno u morskoj vodi [3].

Silicijske bronce su dio podskupine visoko otpornih legura bakra, koje sadrže manje od 20 % cinka i do 6 % silicija. Ove legure su otporne na koroziju i imaju visoku čvrstoću, što ih čini pogodnim za izradu ventila i dijelova pumpi. Silicijske crvene bronce, koje sadrže vrlo malo cinka, koriste se za ležajeve i zupčanike, pružajući odličnu otpornost na atmosfersku koroziju. Silicijske

bronce se lako obrađuju hladnim i toplim deformiranjem, imaju visoku električnu vodljivost i otpornost na morsku vodu, što ih čini idealnim za pomorska i kemijska postrojenja [3].

Bakreno-niklene legure sadrže između 2 % i 30 % nikla, pružajući visoku otpornost na koroziju i termičku stabilnost. Dodavanje željeza, kroma, niobija i/ili mangana može poboljšati njihovu čvrstoću. Ove legure su praktično imune na naprezanje i koroziju pod utjecajem vlage, te su poznate po otpornosti na morsku koroziju. Bakreno-niklene legure koriste se za izradu električnih i elektroničkih proizvoda, cijevi u kondenzatorima na brodovima, naftnim platformama i u elektranama, te raznim pomorskim proizvodima uključujući ventile i pumpe [3].

Berilijeva bronca, poznata i kao berilijev bakar, je legura koja sadrži do 2 % berilija, što joj daje izuzetna mehanička svojstva. Ova legura je poznata po svojoj visokoj čvrstoći i tvrdoći, što je čini idealnom za primjene u kojima su potrebne te osobine. Jedna od ključnih karakteristika berilijeve bronce je njena otpornost na zamor i trošenje, što je čini pogodnom za izradu opruga, kontaktnih sondi, i drugih komponenti koje su izložene stalnim mehaničkim naprezanjima. Berilijeva bronca također ima odličnu električnu vodljivost, koja je značajna u elektroničkim i telekomunikacijskim industrijama. Zbog svojih svojstava, koristi se u izradi alatnih strojeva, kalupa za ubrizgavanje plastike, te u avio industriji za komponente koje zahtijevaju visoku preciznost i otpornost. Ova legura je također otporna na koroziju, što je čini pogodnom za primjene u agresivnim okruženjima. Berilijeva bronca može se termički obraditi za dodatno povećanje čvrstoće, a proces kaljenja omogućava postizanje optimalnih mehaničkih svojstava. Ova legura se također koristi u izradi medicinskih instrumenata zbog svoje bio kompatibilnosti i otpornosti na trošenje. Zbog svoje svestranosti i izuzetnih svojstava, berilijeva bronca je nezamjenjiva u mnogim industrijskim sektorima, pružajući visoku performansu i dugotrajnost u zahtjevnim aplikacijama [2]. Na donjoj slici prikazani su proizvodi od bakra i bakrenih legura.



Slika 3 Proizvodi od bakra i bakrenih legura [5].

2.3. Zavarljivost bakra i bakrenih legura

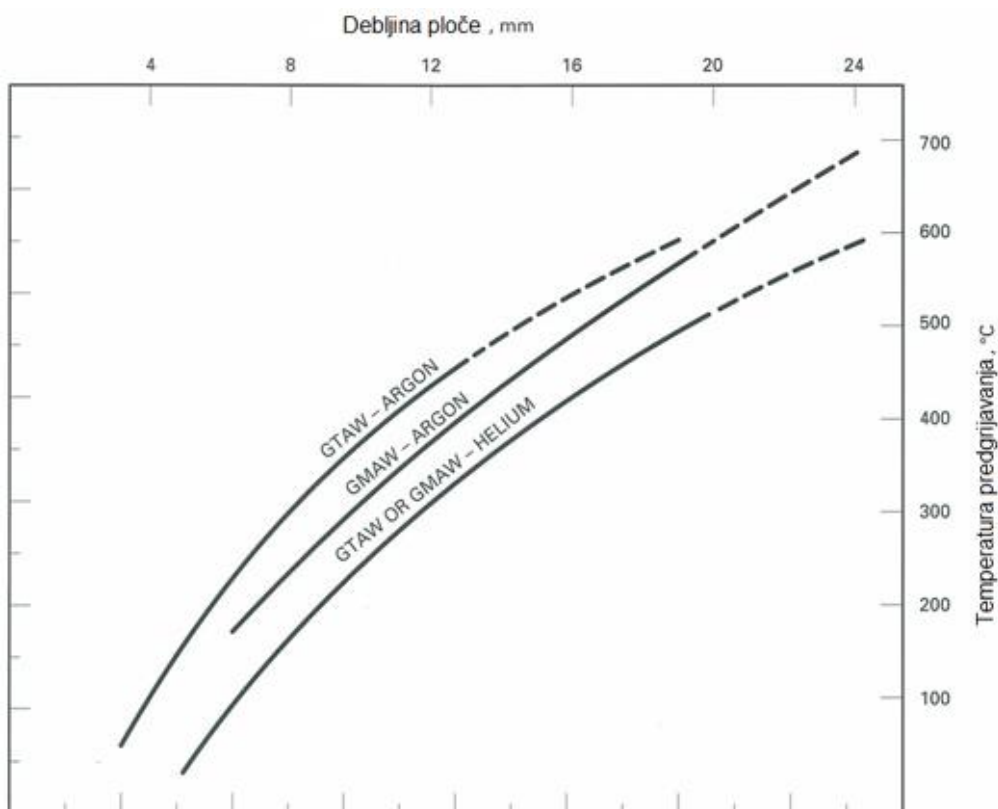
Zavarivanje bakra i bakrenih legura predstavlja ključnu tehniku koja omogućuje stvaranje čvrstih i izdržljivih spojeva potrebnih u mnogim industrijskim primjenama. Različite tehnike zavarivanja, uključujući plinsko, elektrolučno i elektrootporno zavarivanje, nude širok spektar opcija za inženjere i tehničare. U tablici (2.) prikazano je koji način zavarivanja se preporučuje ovisno o vrsti bakrene legure. Kontrola topline, prevencija oksidacije i upravljanje deformacijama identificirani su kao ključni faktori za postizanje visokokvalitetnih zavarenih spojeva. Primjenom odgovarajućih mjera i tehnika, zavarivanje bakra može osigurati izuzetno čvrste, otporne i dugotrajne spojeve, što ga čini nezamjenjivim u mnogim modernim industrijskim primjenama [4].

2.3.1. Načini, metode i parametri TIG zavarivanja bakra

Visoka toplinska vodljivost: Bakar se odlikuje visokom toplinskom vodljivošću, što znači da brzo odvodi toplinu iz zone zavarivanja, što može otežati održavanje dovoljno visoke temperature za zavarivanje. Korištenje visokih struja i brzih postupaka zavarivanja pomaže u postizanju i održavanju potrebne temperature te osiguravanju dovoljnog unosa topline. Predgrijavanjem materijala smanjuje se brzina odvođenja topline, što se može vidjeti na slici (4.), gdje je prikazana ovisnost temperature predgrijavanja o debljini ploče [2].

Oksidacija: Bakar brzo oksidira pri visokim temperaturama, što može oslabiti spoj i smanjiti njegovu otpornost na koroziju. Kako bi se to izbjeglo, tijekom zavarivanja koristi se smjesa inertnih plinova poput argona ili helija (posebno u TIG zavarivanju) [2].

Deformacija: Zbog visoke toplinske vodljivosti, bakar može doživjeti značajne deformacije tijekom zavarivanja, što može utjecati na dimenzionalnu točnost spoja. Pažljivim planiranjem redoslijeda zavarivanja i korištenjem steznih naprava može se pomoći u kontroli deformacija. Korištenje nižih struja i višekratno zavarivanje također može smanjiti rizik od deformacija, jer se smanjuje trenutni unos topline [2].



Slika 4 Ovisnost temperature predgrijavanja o debljini bakrene ploče i postupku zavarivanja [4].

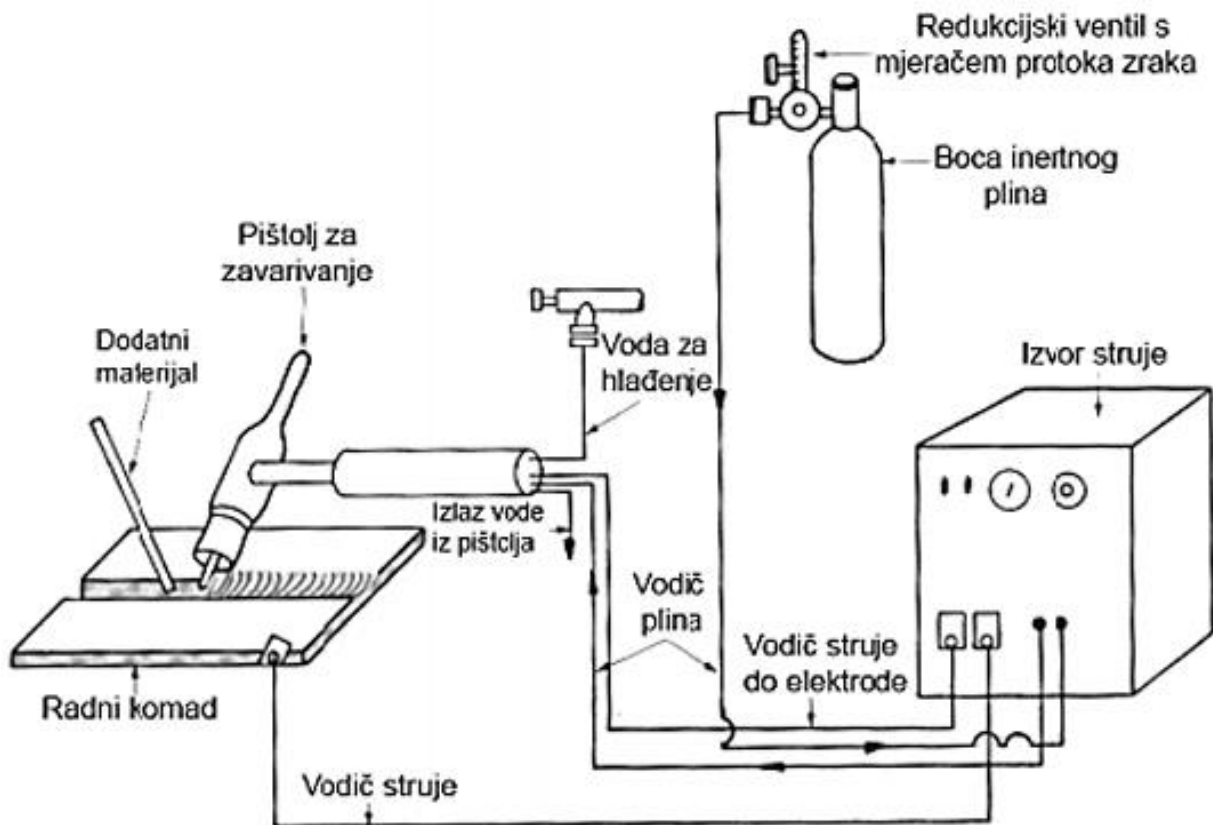
Tablica 2 Primjenjivi postupci spajanja bakara i bakrenih legura. Legenda: E=izvrsno, G=dobro, F=zadovoljavajuće, NR= ne preporučuje se. [4]

Legura	Oznaka prema UNS (Unified Numbering System)	Plinsko zavarivanje.	SMAW	GMAW	GTAW	Elektrotoporno zavarivanje	Lemljenje
ETP Bakar- (visokokvalitetni elektrolitički bakar)	C11000- C11900	NR	NR	F	F	NR	G
Neoksidirajući bakar	C102000	F	NR	G	G	NR	E
Deoksidirani bakar	C12000- C123000	G	NR	E	E	NR	E
Berilijeva bronca	C17000- C17500	NR	F	G	G	F	G
Kadmij/Krom Bakar	C16200- C18200	NR	NR	G	G	NR	G
Crveni Mesing - 85%	C23000	F	NR	G	G	F	E
Mesing - 80%	C24000	F	NR	G	G	G	E
Olovni Mesing	C31400- C38590	NR	NR	NR	NR	NR	G
Fosforna Bronca	C50100- C52400	F	F	G	G	G	—
Bakar-Nikal legura - 30%	C71500	F	NR	G	G	G	E
Bakar-Nikal legura - 10%	C70600- C75200	G	NR	G	E	E	E
Aluminijska bronca	C61300- C61400	NR	G	E	G	G	G
Silicijska bronca	C65100- C65500	G	E	G	G	G	G

Preporučeni dizajni zavarenih spojeva TIG metodom za bakar i njegove legure mogu se vidjeti na slici (14). Površine zavarenog spoja i susjednih područja moraju biti čiste od ulja, masti, prljavštine, boje i oksida prije zavarivanja. Za legure bakra koje razvijaju površinske tanke slojeve oksida, poput aluminijskih bronci, žičano četkanje nije prikladno. Ove legure treba čistiti kemijskim ili abrazivnim metodama. Također je preporučljivo odmašćivanje korištenjem odgovarajućeg otapala [4][2].

3. Osnove TIG zavarivanja

TIG (Tungsten Inert Gas) zavarivanje je tehnika elektrolučnog zavarivanja koja koristi netaljivu volframovu elektrodu u zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Energija potrebna za zavarivanje dobiva se iz električnog luka koji se uspostavlja i održava između netaljive elektrode i radnog komada. Inertni plinovi koji se najčešće koriste za TIG zavarivanje su argon ili helij, a dovode se kroz plinsku sapnicu na vrhu pištolja za zavarivanje, gdje je smještena netaljiva volframova elektroda. TIG zavarivanje može se izvoditi s dodatnim materijalom ili autogeno, bez dodatnog materijala, što je označeno kao postupak 141 prema HRN EN ISO 4063. Slika (6.) prikazuje postupak TIG zavarivanja te glavne dijelove opreme prilikom zavarivanja [9].



Slika 5 Osnovna oprema potrebna za ručno TIG zavarivanje [9].

TIG zavarivanje može biti ručno ili poluautomatsko. U ručnom zavarivanju, zavarivač pomiče pištolj i usmjerava ga prema prednjem rubu taline (lijeva tehnika rada). U poluautomatskom postupku, dodatni materijal se dodaje s pomoću dodavača žice upravljanog elektromotorom. Potpuno automatizirano TIG zavarivanje koristi se u serijskoj proizvodnji, pri čemu se pištolj za zavarivanje montira na robotsku ruku koja je numerički programirana s pomoću odgovarajućeg

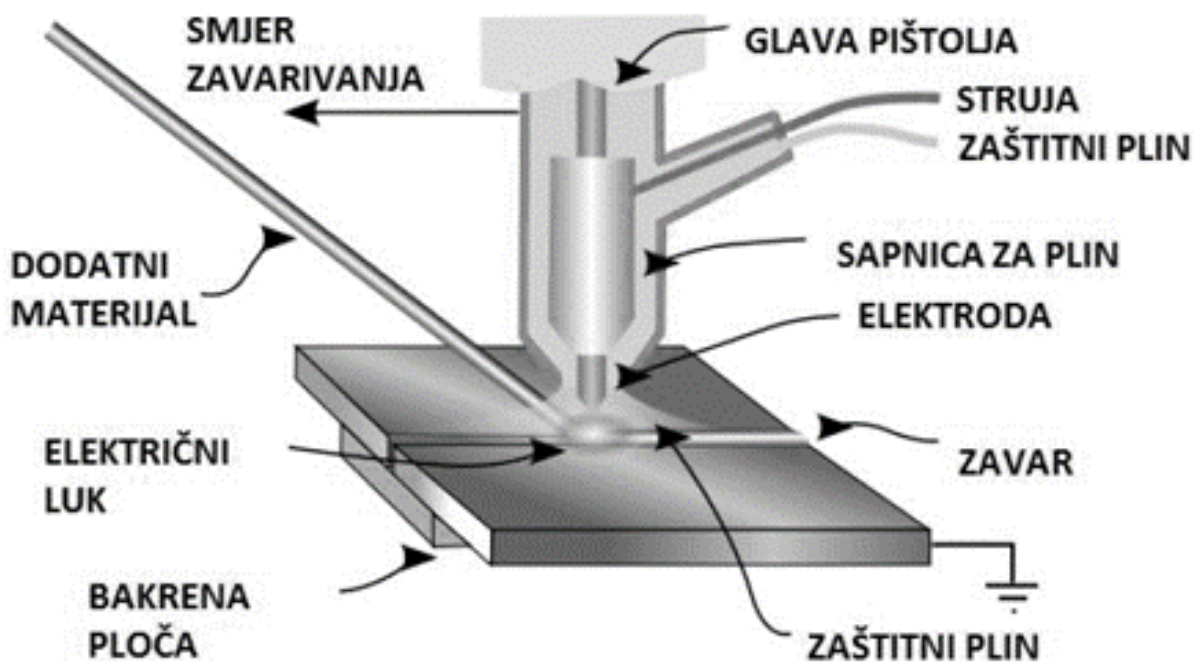
CAD/CAM sučelja. Parametri se mogu nadzirati i mijenjati putem upravljačkog računala tijekom samog procesa. Prednosti TIG zavarivanja uključuju visoku kvalitetu zavora, mogućnost zavarivanja u svim položajima i pogodnost za većinu materijala. Nedostaci ovog postupka su niska produktivnost koja dovodi do neekonomičnosti, nepogodnost za rad na otvorenom, potreba za kvalitetnom pripremom spoja i obukom zavarivača.

Prema ISO 4063 : 2009 postoji nekoliko opcija TIG postupka: [11]

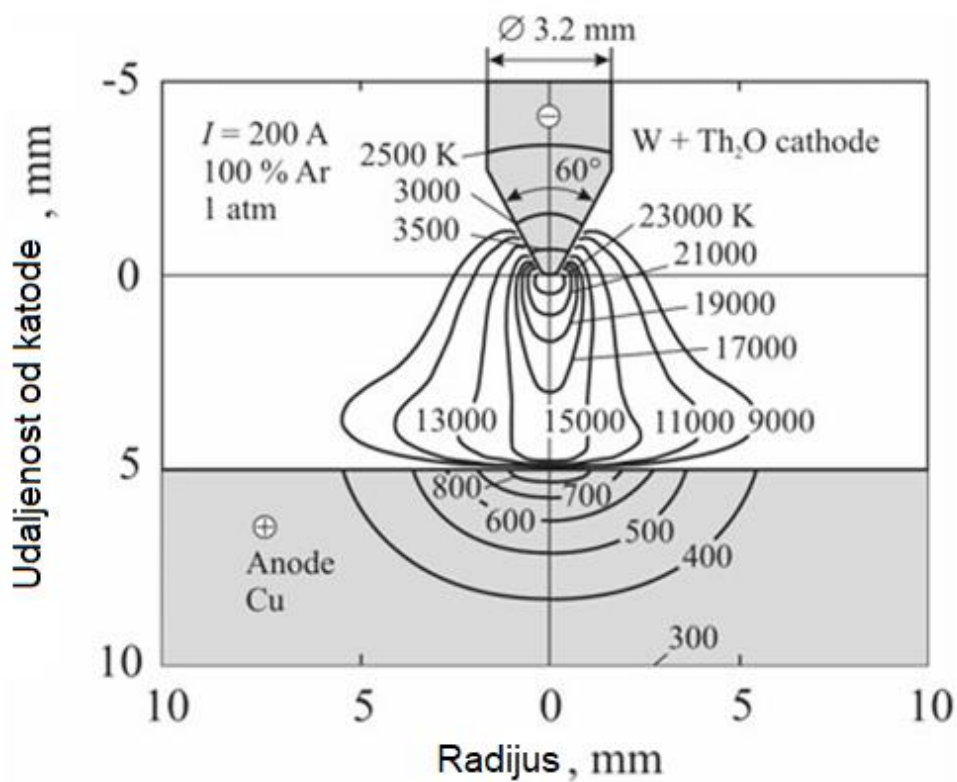
- 141 TIG zavarivanje žicom punog presjeka,
- 142 TIG zavarivanje bez dodatnog materijala,
- 143 TIG zavarivanje žicom punjenom praškom,
- 145 TIG zavarivanje sa žicom punog presjeka primjenom reducirajućeg plina,
- 146 TIG zavarivanje žicom punjenom praškom uz primjenu reducirajućeg plina,
- 147 TAG zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom uz primjenom aktivnog plina [10].

3.1. Princip rada TIG zavarivanja

Postupak ručnog TIG zavarivanja započinje pritiskom na prekidač na pištolju za zavarivanje ili nožnom prekidaču. U trenutku pritiska prekidača počinje istjecanje zaštitnog plina kroz sapnicu i cirkulacija rashladnog sredstva. Zaštitni plin osigurava zaštitu taline metala zavora i zone utjecaja topline od atmosferskih uvjeta te održava stabilnost električnog luka. Kada se pritisne prekidač pištolja i vrh volframove elektrode približi radnom komadu na udaljenost od 2 do 5 mm, uspostavlja se električni luk u inertnoj plinskoj smjesi. Električni luk doseže temperaturu od oko 20000 °C, što dovodi do taljenja osnovnog materijala. Distribuciju temperature oko električnog luka može se vidjeti na slici (7.) niže. Obično se električni luk uspostavlja bez dodirivanja radnog komada. Kod uređaja za zavarivanje istosmjernom strujom (DC) koji nemaju ugrađen uređaj za visoki napon visoke frekvencije, električni luk se uspostavlja dodirivanjem volframove elektrode i radnog komada. Dodatni materijal se dodaje u talinu nastalu djelovanjem električnog luka u precizno određenim vremenskim intervalima, gdje se tali i spaja s osnovnim materijalom. Prekid električnog luka nastupa prestankom pritiska prekidača pištolja, a zaštitni plin nastavlja istjecati iz sapnice pištolja još nekoliko sekundi kako bi zaštitio vrh elektrode i talinu od reakcije s atmosferom dok se ne ohlade do potrebne temperature. Slika (8) prikazuje shematski prikaz procesa TIG zavarivanja [10].

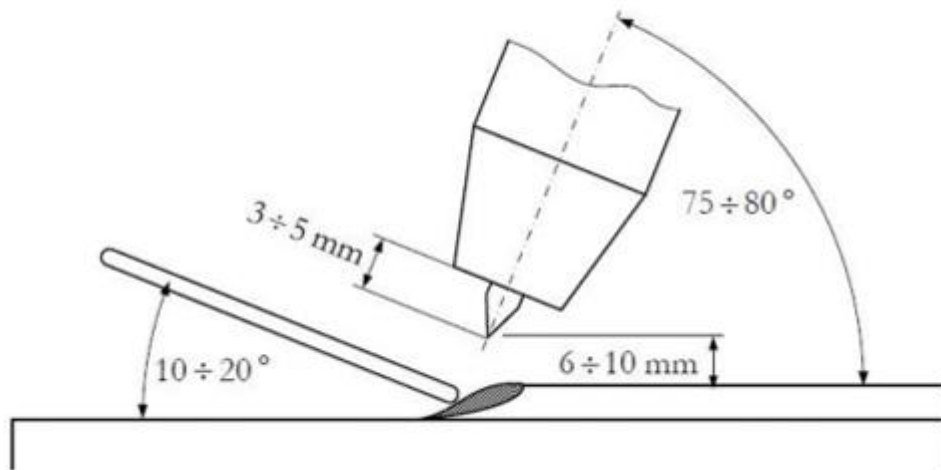


Slika 6 Princip procesa TIG zavarivanja [10].



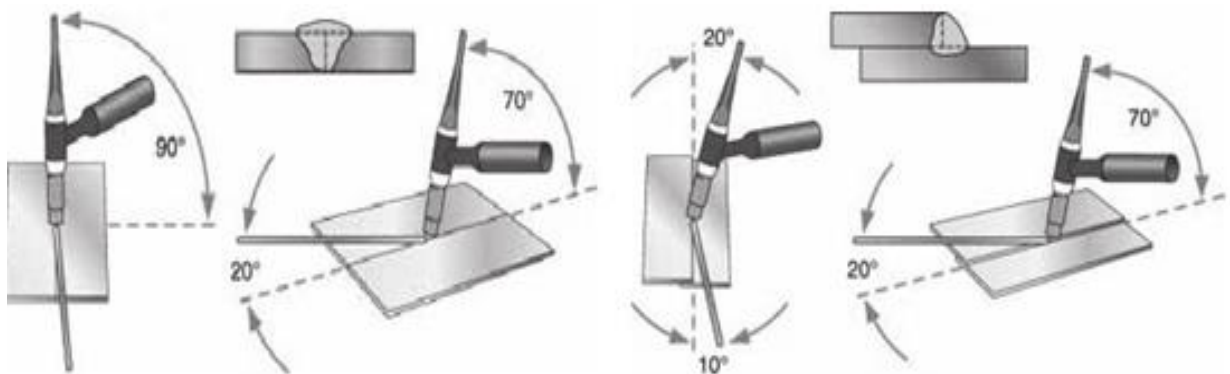
Slika 7 Raspodjela temperature oko vrha elektrode do radnog dijela prilikom TIG zavarivanja upotrebom jakosti električne struje $I=200$ A, na tlaku $p=1$ atm te upotrebom argona kao zaštitnog plina [7].

Na slici (9.) niže prikazan je položaj elektrode i dodatnog materijala. Prikazana je lijeva tehnika zavarivanja, pri kojoj se pištolj drži u desnoj ruci, dodatni materijal u lijevoj ruci, a smjer zavarivanja ide s desna na lijevo. Za optimalno zavarivanje, pištolj treba biti pod kutom od 75° do 80° , dok se dodatni materijal dodaje pod kutom od 10° do 20° . Vrh volframove elektrode treba biti iznad keramičke sapnice za 3 do 5 mm, a preporučeni razmak između vrha elektrode i radnog komada iznosi 6 do 10 mm. Na slikama 15 i 16 prikazane su tehnike izvođenja TIG zavarivanja [11].



Slika 8 Položaj volframove elektrode kao i dodatnog materijala u odnosu na materijal zavarivanja [14].

Nadalje, na slikama (10.) je prikazan način izvođenja čeonog i kutnog spoja TIG metodom:



Slika 9 Način izvođenja čeonog i kutnog spoja pri TIG zavarivanju [10].

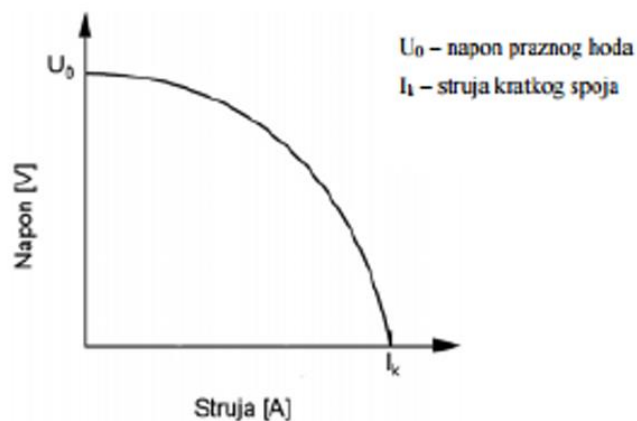
3.2. Izvor električne struje

Za TIG zavarivanje koriste se različiti izvori struje, uključujući istosmjernu, izmjeničnu i kombiniranu struju, odnosno transformatore, ispravljače i inverterske uređaje. Svrha ovakvih uređaja je osigurati potrebnu struju za zavarivanje s karakteristikama pogodnim za ovaj postupak. Kod zavarivanja bakra ručnim postupkom koriste se obični ispravljači ili inverteri. Električni luk se uspostavlja dodiranjem radnog komada i volframove elektrode. Za zavarivanje lakih metala poput aluminijske i magnezijevske koristi se transformator u kombinaciji s uređajem koji proizvodi visokofrekventnu struju [9].

Uvjeti rada izvora struje prilikom TIG zavarivanja:

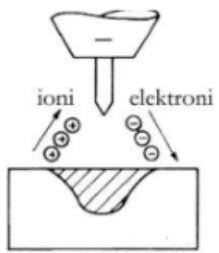
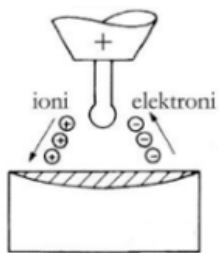
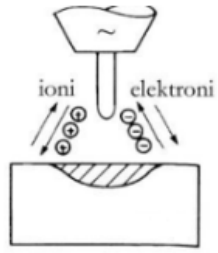
- Osiguravanje relativno visokog napona prilikom uspostave električnog luka kako bi se olakšao početak zavarivanja.
- Omogućavanje velike jakosti struje tijekom zavarivanja dok je napon električnog luka nizak.
- Imati odgovarajuće statičke i dinamičke karakteristike kako bi električni luk bio stabilan tijekom cijelog procesa zavarivanja [9].

Kod ručnog TIG zavarivanja, poželjno je da izvor struje ima "strmo padajuću karakteristiku" (slika 11.) kako bi osigurala približno konstantnu struju koja neće značajno varirati uslijed pomicanja ruke. Za mehanizirano TIG zavarivanje, izvor struje treba imati "ravnu karakteristiku" jer ovdje nema opasnosti od varijacija dužine luka kao kod ručnog zavarivanja. Kombinirani izvori struje koriste se za TIG zavarivanje, gdje ispravljač i transformator postoje unutar istog uređaja, a prebacivanje se vrši s pomoću sklopke na uređaju [10].



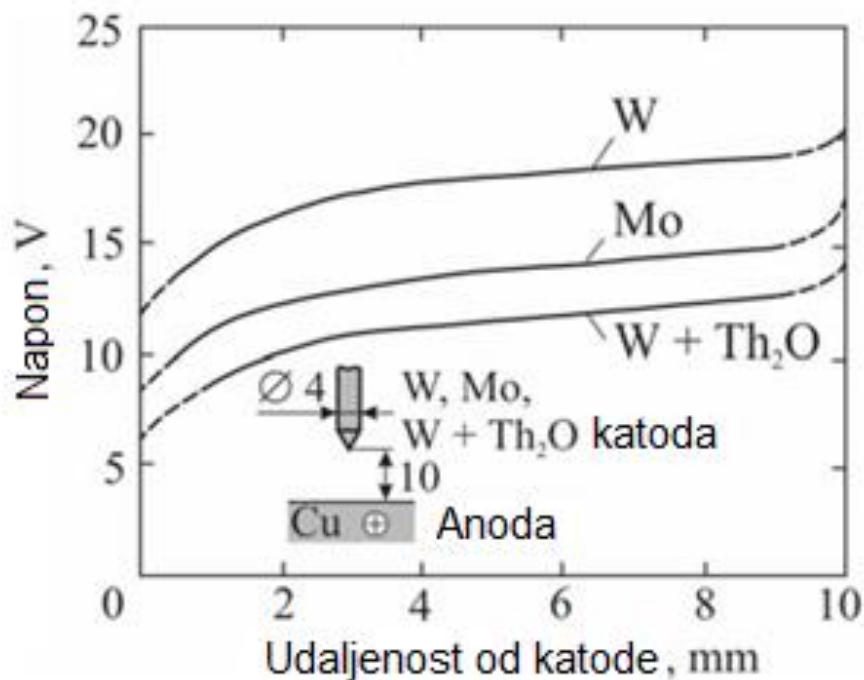
Slika 10 Strmo-padajuća karakteristika izvora struje kod TIG zavarivanja [13].

Za proizvodnju visokofrekventne struje dodatno je ugrađen mali transformator, koji može biti smješten unutar izvora struje ili izvan njega, na komandnom ormaru. Ovaj uređaj proizvodi električnu struju napona do nekoliko tisuća volti. Zbog vrlo visoke frekvencije struje, ne postoji opasnost za zavarivača u obliku "skin efekta". Visokofrekventna struja koristi se za uspostavljanje električnog luka bez dodira elektrode s radnim komadom, kao i za održavanje stabilnosti električnog luka tijekom zavarivanja. Na slici niže prikazana je vrsta struje koja se upotrebljava kod TIG zavarivanja, vrsta polariteta te penetracija i vrsta elektrode [9].

Vrsta struje	DC	DC	AC
Polaritet	-	+	
			
Čišćenje oksida	NE	DA	DA (pola ciklusa)
Raspodjela topline	1/3 na elektrodi 2/3 na materijalu	2/3 na elektrodi 1/3 na materijalu	1/2 na elektrodi 1/2 na materijalu
Penetracija	uska, duboka	plitka, široka	srednje široka srednje duboka
Kapacitet elektrode	odličan npr: Ø3,2/400A	loš npr: Ø6,4/120A	dobar npr: Ø3,2/255A

Slika 11. Vrste struja, polaritet, penetracija te kapacitet elektrode [10].

Napon koji se stvara između elektrode TIG zavarivanja te radnog komada u konkretnom slučaju bakra prikazan je na donjoj slici. Prikazani su eksperimentalni podaci [7].



Slika 12 Na slici su prikazane krivulje potencijala (u voltima) u odnosu na udaljenost od katode (u milimetrima) za različite materijale katode: volfram (W), molibden (Mo), i volfram s torijem oksidom (W + Th₂O). Krivulje pokazuju kako se napon mijenja s udaljenošću od katode za različite materijale [7].

3.3. Netaljive elektrode za zavarivanje

Kod TIG zavarivanja, kao što je već rečeno, koriste se netaljive volframove elektrode (talište volframa je 3410 °C). Njihova je uloga prenošenje električnog luka kako bi se oslobodila toplina potrebna za zavarivanje.

Vrste elektroda:

- Elektrode od čistog volframa (W): Volframove elektrode (W) koriste se za zavarivanje izmjeničnom električnom strujom, dok se ostale elektrode koriste i za istosmjernu i za izmjeničnu struju. To znači da su elektrode od čistog volframa pogodnije za rad s izmjeničnom strujom.
- Elektrode od volframa s dodatkom 0,9 do 4,2 % torijevog oksida (W-Th): Elektrode legirane torijevim oksidom (ThO₂) su blago radioaktivne (emitiraju vrlo male količine α-čestica), omogućuju lakše uspostavljanje električnog luka, mogu raditi s većim strujama tijekom zavarivanja i pružaju odličnu stabilnost električnog luka. Također imaju nižu minimalnu struju opterećenja i dulji radni vijek.
- Volframove elektrode s 0,3 do 0,9 % cirkonijevog oksida (W-Zr): Elektrode legirane cirkonijevim oksidom (ZrO₂) imaju izvrsna svojstva pri zavarivanju izmjeničnom strujom

jer održavaju zaobljeni vrh elektrode, sprječavaju kontaminaciju zavara i olakšavaju uspostavljanje električnog luka.

- Volframove elektrode s 0,9 do 1,2 % lantanovog oksida (W-La): Elektrode legirane lantanovim oksidom (La_2O_3) imaju slične karakteristike kao torirane volframove elektrode; omogućuju lakše uspostavljanje električnog luka, dobru stabilnost luka, dug radni vijek i rad s visokim strujama. Moguća su zamjena za torirane volframove elektrode.
- Volframove elektrode s dodatkom cerijevog oksida: Elektrode legirane cerijevim oksidom (CeO_2) također imaju slične karakteristike kao torirane volframove elektrode. Omogućuju lakše uspostavljanje električnog luka, dobru stabilnost luka i dug radni vijek, ali ne mogu raditi s tako visokim strujama kao lantanove elektrode. Moguća su zamjena za torirane volframove elektrode.

Ovisno o promjeru, volframove elektrode dolaze u sljedećim veličinama: 0,5 mm, 1,0 mm, 1,6 mm, 2,4 mm, 3,2 mm, 4,0 mm, 6,4 mm i 8,0 mm, s duljinama koje su također standardizirane na: 50 mm, 75 mm, 150 mm, 175 mm i 200 mm. Označavanje volframovih elektroda vrši se prema sastavu materijala, slovним oznakama, brojkama i bojama na vrhu elektrode, kako je prikazano u tablici (4) niže.

Tablica 3 Vrste elektroda za TIG zavarivanje [10].

Oznaka (ISO)	Dodatak oksida (%)	Vrsta oksida	Oznaka bojom
W	---	---	Zelena
WC 20	1,8 - 2,2	CeO_2	Siva
WL 10	0,9 - 1,2	La_2O_3	Crna
WL 15	1,4 - 1,6	La_2O_3	Zlatna
WL 20	1,9 - 2,1	La_2O_3	Plava
WZ 8	0,7 - 0,9	ZrO_2	Bijela
WT 10	0,8 - 1,2	ThO_2	Žuta
WT 20	1,7 - 2,2	ThO_2	Crvena
WT 30	2,8 - 3,2	ThO_2	Ljubičasta
WT 40	3,8 - 4,2	ThO_2	Narančasta

Radni vijek elektrode može se produžiti pravilnim opterećenjem, što će također smanjiti onečišćenje zavarenog spoja volframom. Jakost struje za zavarivanje u odnosu na promjer volframove elektrode izračunava se prema formuli: [13]

$$I = 100 \cdot d \cdot k \quad (3.1)$$

gdje je d promjer elektrode u milimetrima, a k koeficijent opterećenja elektrode koji je različiti za svaku vrstu elektrode, čije su vrijednosti prikazane u tablici (5.) niže:

Tablica 4 Koeficijent opterećenja te vrsta elektrode [13].

Vrsta elektrode	W	WT 10	WT 20	WT 30	WT 40, WZ 8, WL 10
k_min	0,45	0,4	0,35	0,3	0,5
k_max	0,55	0,65	0,75	0,8	1,0

3.4. Parametri zavarivanja

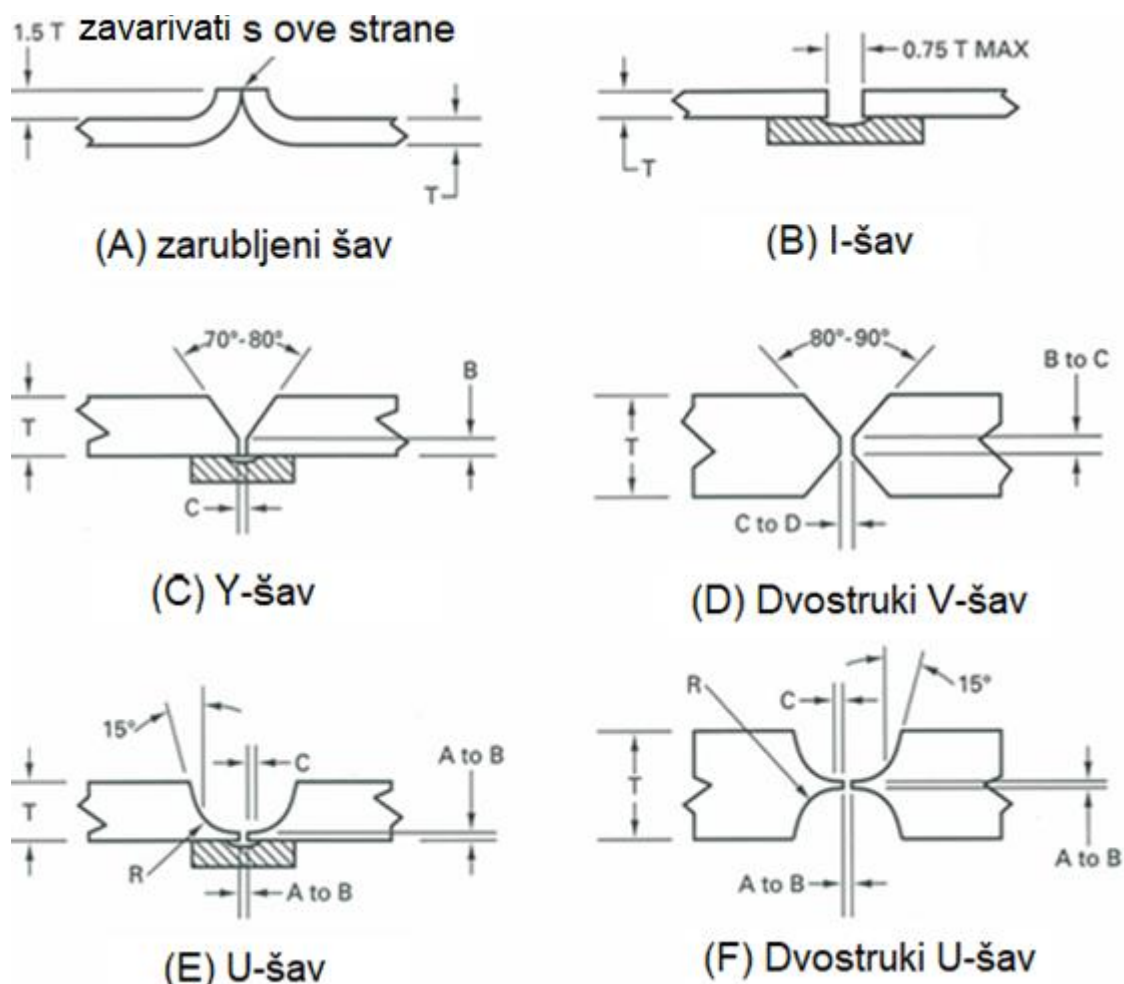
Priprema spoja i jakost struje za zavarivanje ovise o vrsti i debljini materijala, s rasponom struje od 40 do 400 A. U TIG postupku, ključni su početak i prekid zavarivanja. Prije dodavanja žice, početno mjesto se dobro pretali nakon uspostave električnog luka. Moderni TIG uređaji omogućuju postupno smanjenje struje. Nakon prekida luka, pištolj ostaje na mjestu dok zaštitni plin ne prestane strujati (3-10 s). Odabir parametara zavarivanja ključan je za kvalitetu zavara. Utjecajni faktori uključuju:

- jakost struje zavarivanja
- polaritet elektrode
- vrstu i promjer volframove elektrode
- protok i vrstu zaštitnog plina
- brzinu zavarivanja
- položaj pištolja i dodatnog materijala
- dodavanje žice i gibanje pištolja (tehnika rada)

Kod zavarivanja bakra i njegovih legura, u tablici niže prikazano je, ovisno o debljini materijala, koja se elektroda upotrebljava, koji zaštitni plin, promjer dodanog materijala, temperatura predgrijavanja, struja zavarivanja i broj prolaza. Također je prikazano koja se vrsta spoja treba koristiti. Vrste spojeva primjerene ručnom TIG zavarivanju prikazane su na slici (14) [4].

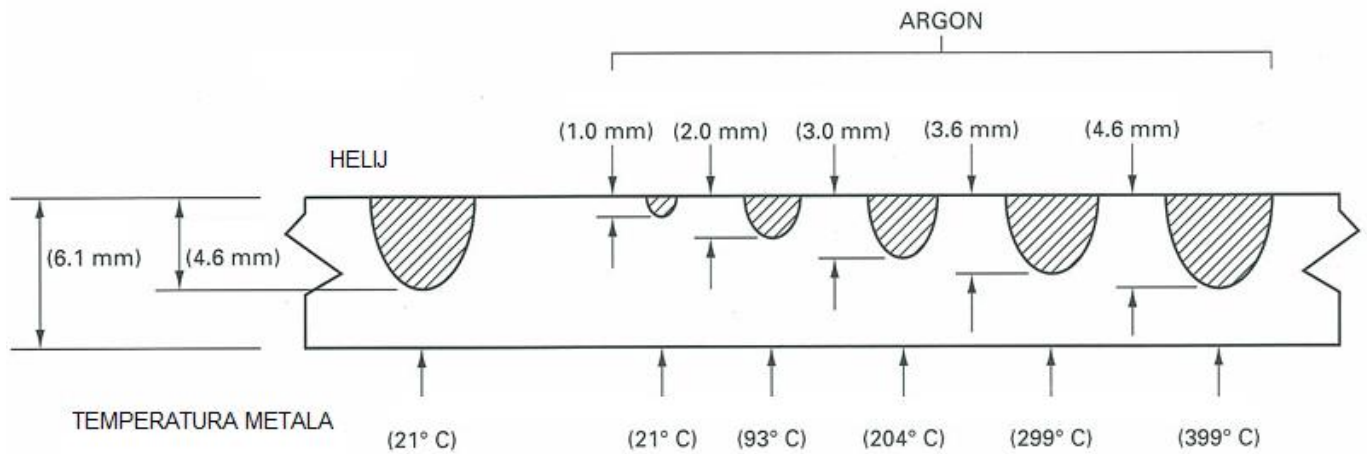
Tablica 5 Tipični parametri prilikom TIG zavarivanja bakra i njegovih legura [4].

Debljina materijala	Vrsta spoja	Zaštitini plin	Promjer volframove elektrode	Promjer dodatne žice [mm]	Temperatura predgrijavanja [°C]	Struja zavarivanja [A]	Broj prolaza
0,3-0,8 mm	A	Ar	0,5-1 mm	-	-	15-60	1
1-1,8 mm	B	Ar	1-1,6 mm	1,6	-	40-170	1
2,3-4,8 mm	C	He	2,4 mm	2,4, 3,2	38	100-300	1-2
6,4 mm	C	He	3,2 mm	3,2	93	250-375	2-3
9,6 mm	E	He	3,2 mm	3,2	232	300-375	2-3
12,7 mm	D	He	3,2-4 mm	3,2	343	350-420	4-6
>16 mm	F	He	4,8 mm	3,2	399	400-475	>6



Slika 13 Načini spajanja bakrenih dijelova TIG metodom. A=1.6 mm, B= 2.4 mm, C=3.2 mm, D=4 mm, R=3.2 mm, T= debljina [4].

Na sljedećoj slici (13) prikazano je kako zaštitni plin, temperatura predgrijavanja utječu na penetraciju zavarenog spoja, pri upotrebi struje konstantnog iznosa [4]. Zaključuje se da je penetracija veća ukoliko je temperatura predgrijavanja veća.



Slika 14 Učinak zaštitnog plina i temperature predgrijavanja na penetraciju zavarenog spoja u bakru TIG zavarivanju s 300 A istosmjerne struje pri brzini zavarivanja od (3-4 mm/s) [4].

3.4.1. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja kod ručnog TIG postupka kreće se u rasponu od 100 do 250 mm/min. Optimalna brzina postiže se kada je duljina taline dva do tri puta veća od promjera volframove elektrode, dok je kod zavarivanja u prisiljenom položaju potrebno smanjenje brzine kako bi se izbjeglo curenje taline pod utjecajem gravitacije. Brzina zavarivanja ima značajan utjecaj na dubinu prodiranja i izgled površine zava, kao što je prikazano na slici (13) [13].

3.4.2. Zaštitni plinovi

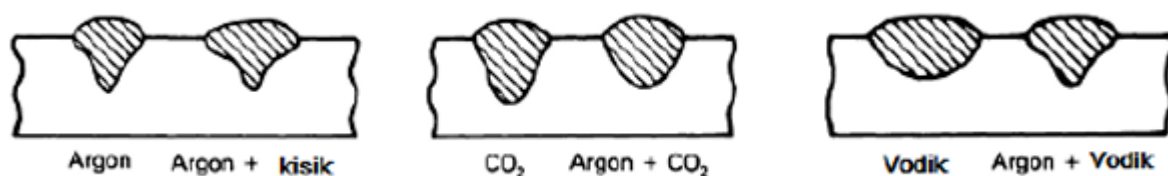
Zaštitni plin služi za zaštitu područja zavarivanja od atmosferskih plinova te osigurava stabilnost električnog luka. Također, svojstva plina utječu na mehanička svojstva zavarenog spoja. Odabir zaštitnog plina temelji se na željenoj kvaliteti zava, vrsti elektrode, debljini osnovnog materijala, načinu prijenosa metala u električnom luku, položaju zavarivanja, kvaliteti pripreme zava, izgledu zava, profilu penetracije i troškovima plina. U TIG zavarivanju najčešće se

koriste plemeniti plinovi poput helija i argona. U današnjoj proizvodnji najčešće se koristi argon [13]. Na sljedećoj tablici prikazani su preporučeni zaštitni plinovi koji se koriste pri zavarivanju.

Tablica 6 Preporučeni plinovi za zaštitu tijekom zavarivanja različitih materijala [15].

Plin / Materijal koji se zavaruje	Nelegirani i niskolegirani čelici	Nehrdajući čelici	Niklove legure	Bakrene legure	Aluminijske legure
Ar	+	+	+	+	+
Ar/He		+	+		
Ar/H ₂			+	+	+
He				+	+

Električni luk se održava konstantnim protokom struje kroz ionizirani plin. Energija potrebna da plin oslobodi elektron izravno utječe na svojstva električnog luka; niži ionizacijski potencijal znači da plin pri manjoj razlici potencijala postaje vodljiv, što omogućuje stvaranje električnog luka [13]. Plinovi s visokom toplinskom vodljivošću mogu smanjiti promjer vodljivog dijela luka, što povećava napon i smanjuje stabilnost luka. Plinovi s višom toplinskom vodljivošću omogućuju širi električni luk s ravnomjernijom raspodjelom temperature, što poboljšava penetraciju zavora, što je prikazano na slici (15) niže [13].



Slika 15 utjecaj zaštitnih plinova na dubinu penetracije i širine zavora [13].

3.4.2.1. Argon

Argon se koristi kao najpovoljniji inertni plin kod TIG zavarivanja, s obzirom na njegov niski ionizacijski potencijal od 15,7 eV, što omogućuje lakše uspostavljanje i stabilnost električnog luka. Budući da je 1,4 puta teži od zraka, pri izlasku iz sapnice učinkovito istiskuje zrak i osigurava dobru zaštitu rastaljenog metala, uz manju potrebu za protokom tijekom zavarivanja. U usporedbi s helijem, argon ima nižu toplinsku vodljivost, što dovodi do užeg električnog luka, manje penetracije i manjeg protaljivanja. Minimalna potrebna čistoća argona iznosi 99,95% [13].

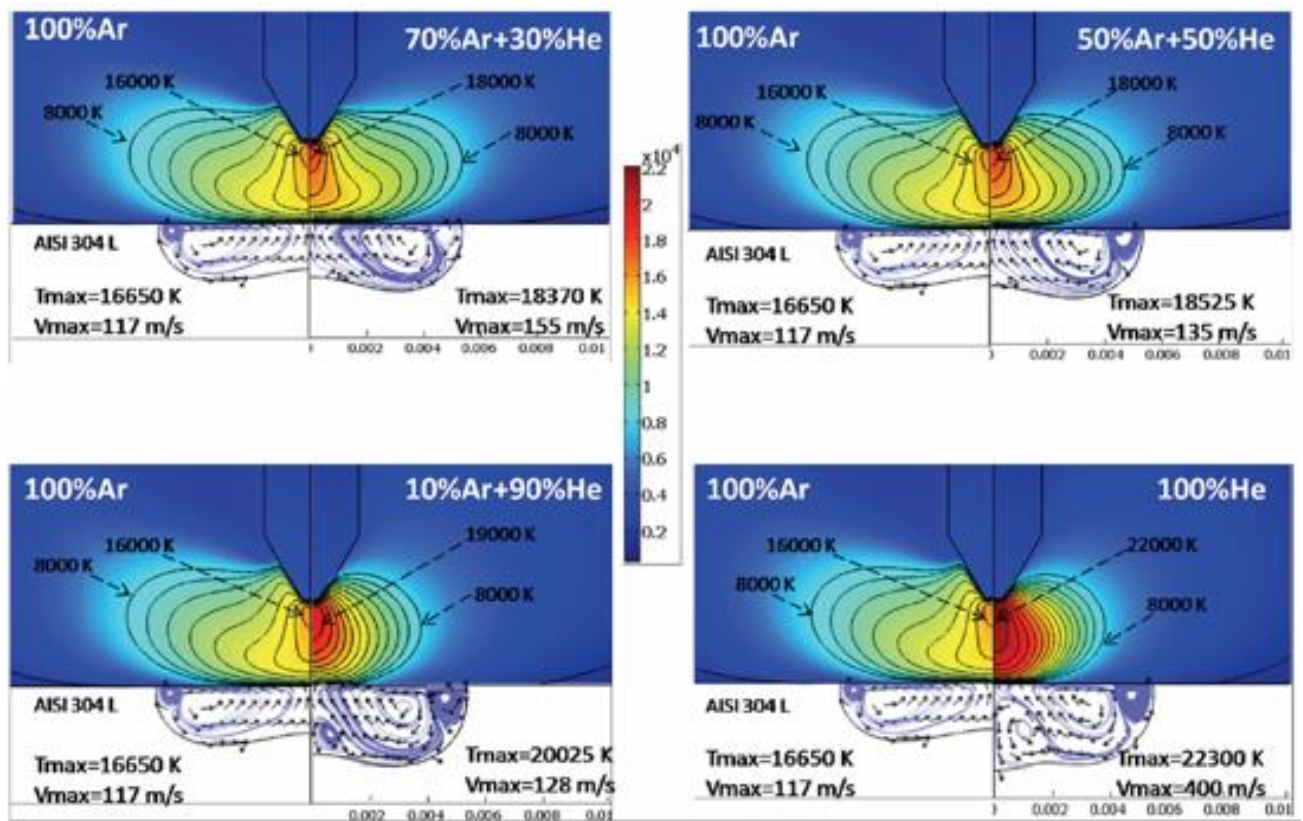
3.4.2.2. Helij

Helij, s ionizacijskim potencijalom od 24,5 eV, ima viši ionizacijski potencijal u odnosu na argon, što otežava uspostavljanje električnog luka. Budući da je helij znatno lakši od argona (deset puta lakši), potrebno je koristiti veće protoke helija nego kod zavarivanja s argonom. Zbog svoje visoke toplinske vodljivosti, helij omogućuje širi električni luk, pri čemu se toplina iz električnog luka brže prenosi na radni komad, omogućujući veću penetraciju i unos topline. Napon električnog luka sa zaštitnim plinom helijem znatno je veći nego kod argona pri istim strujama, što ga čini pogodnim za zavarivanje materijala velike toplinske vodljivosti i debljih pozicija. Međutim, pri nižim strujama, između 50 i 100 A, dolazi do povećanja napona električnog luka, što je nepovoljno za zavarivanje tanjih materijala, koji se obično zavaruju u ovom rasponu struja. Minimalna potrebna čistoća helija kao zaštitnog plina iznosi 99,99%. Slika 23 prikazuje ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG postupka zavarivanja [13]. Uz upotrebu čistih inertnih plinova poput argona i helija, često se primjenjuju i njihove mješavine u različitim omjerima kako bi se kombinirala njihova povoljna svojstva. Mješavine argona i vodika koriste se u specifičnim slučajevima, poput automatiziranog zavarivanja cijevi od nehrđajućih čelika, gdje vodik ne izaziva poroznosti i pukotine. Količina vodika koja se može dodati u mješavinu ovisi o debljini osnovnog materijala i vrsti spoja za svaku specifičnu primjenu. Tablica 7. prikazuje pregled karakteristika zavarivanja s različitim zaštitnim plinovima.

Tablica 7 karakteristike zavarivanja s različitim zaštitnim plinovima zavarivanja [15].

Karakteristika	Argon	Mješavina Ar/He	Helij
Brzina zavarivanja	Smanjena	Veća nego kod 100% Ar	Veća
Penetracija	Smanjena	Veća nego kod 100% Ar	Povećana
Uspostava luka	Laka	Bolja nego kod 100 % He	Otežana
Oblik luka	Uži, fokusiran	uži nego kod 100% He	Širi
Stabilnost luka	Dobra	Bolja nego kod 100% He	Niža kod manjih struja
Čišćenje oksida	Dobro	Sličnije nego 100% Ar	Loše
Napon luka	Manji	Srednja	Veći
Protok	Manji	Veći nego kod 100% Ar	Povećan
Cijena	Niža	Veći nego kod 100% Ar	Veći nego kod 100 % Ar

Na sljedećoj slici prikazani su rezultati simulacije TIG zavarivanja, gdje je prikazano kako vrsta i mješavina plinova utječu na raspodjelu temperature električnog luka te na izgled i oblik taline [6].



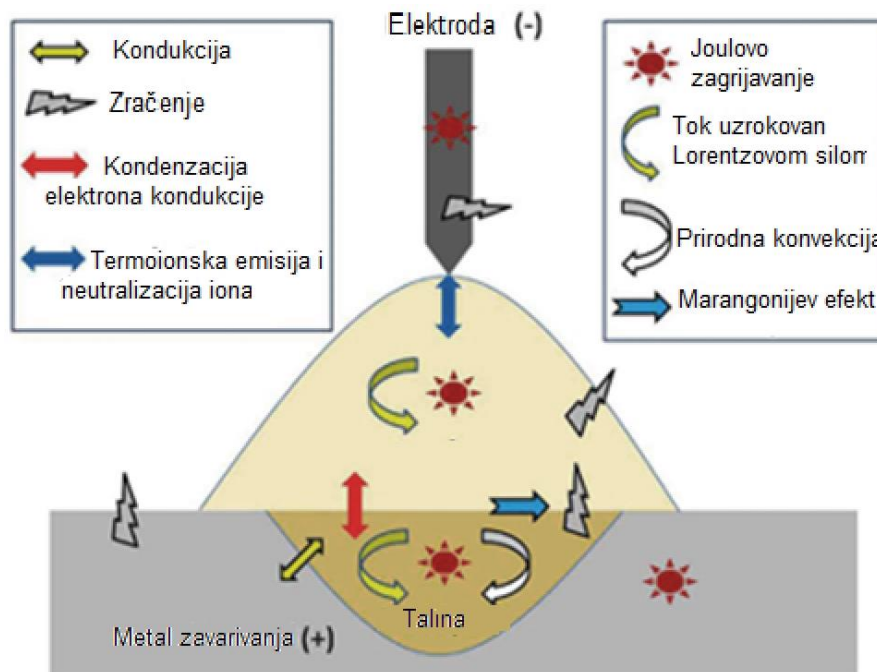
Slika 16 temperaturna raspodjela električnog luka u ovisnosti o zaštitnom plinu [6].

4. Toplinski procesi kod TIG zavarivanja

Zavarivanje podrazumijeva primjenu topline, pritiska ili oboje kako bi se postigao dovoljan kontinuitet između atoma (ili iona ili molekula) jednog spoja ili materijala i drugog, čime se stvaraju kemijske veze u velikom broju. Time se dobiva spoj čvrstoće koja je blizu čvrstoći slabijeg osnovnog materijala ili dodatnog materijala, ako se koristi. Gotovo svaki zamislivi egzotermni izvor toplinske energije korišten je u nekom trenutku za zavarivanje; uključujući sagorijevanje, egzotermne sinteze kemijskih reakcija, električne lukove, električni otpor, plazme, elektronske zrake, mikrovalove, svjetlosne zrake (lasere ili fokusirane IR zrake ili prikazane lukove), mehaničko trenje i mehaničku plastičnu deformaciju različitim metodama [8].

4.1. Fizika zavarivanja

Glavni fizički fenomeni koji se javljaju tijekom TIG zavarivanja prikazani su na slici dolje. Prikazano je da četiri agregacijska stanja (kruto, tekuće, plinovito i plazma) nekoliko materijala istovremeno postoje u malom volumenu. Između njih se odvijaju fizičke interakcije povezane s električnim, magnetskim, toplinskim, kemijskim, i fluidnim procesima. Cijeli proces zavarivanja općenito se dijeli na tri zone: zonu plazme luka, zonu taline i čvrstu zonu (ZUT i osnovni materijal) [8].



Slika 17 Glavni fizički procesi prilikom TIG zavarivanja [8].

Iako su svi navedeni fizikalni procesi međusobno povezani i ovisni su jedni o drugima, u nastavku će se obrađivati toplinski procesi prilikom zavarivanja jer oni određuju distribuciju temperature. Najizraženiji proces prijelaza topline je kondukcija posebice zato što će se u eksperimentalnom djelu koristiti bakrena ploča za zavarivanje koja ima jako visoku toplinsku vodljivost. Konvekcija i zračenje su također procesi koji se javljaju prilikom zavarivanja ali znatno su manje izraženi, pa se njihov utjecaj ugrađuje u faktor b koji predstavlja disipaciju topline [7].

4.1.1. Kondukcija ili vođenje topline

Kondukcija ili vođenje topline ključan je proces u zavarivanju, gdje se topline prenosi unutar materijala od područja viših temperatura prema područjima nižih temperatura. Kada se koristi izvor topline, odnosno energija električnog luka, topline se primarno koncentriraju na zavareni spoj. Ta energija povećava temperaturu lokaliziranog područja, izazivajući toplinsku vodljivost kroz materijal. Topline se vodi kroz materijal s pomoću molekularne agitacije - brže molekule na toplijem području prenose svoju energiju na sporije molekule na hladnijem području, uzrokujući prijenos topline. Pogledajmo 1D slučaj vođenja topline formulom poznatijom kao Fourierov zakon toplinske vodljivosti:[6]

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

Gdje su:

- q : toplinski tok (količina topline koja prolazi kroz površinu po jedinici vremena, izražena u vatima, (W),
- λ : koeficijent toplinske vodljivosti materijala (izražen u vatima po metru po kelvinu, W/m·K),
- A : površina kroz koju topline prolazi, [m²]
- $\frac{dT}{dx}$: temperaturni gradijent (promjena temperature po jedinici duljine, [K/m]).

Kod zavarivanja, materijali s visokim koeficijentom toplinske vodljivosti, poput bakra, brzo prenose toplinu, dok materijali s nižom toplinskom vodljivošću, poput nehrđajućeg čelika, zadržavaju toplinu duže na lokaliziranom području. Vođenje topline u zavarivanju također ovisi o debljini i geometriji materijala, kao i o uvjetima okoline. U tanjim materijalima topline se brže

raspršuje, dok u debljim materijalima ostaje dulje zadržana. Rubni uvjeti, kao što su prisutnost hlađenja ili izolacije, također utječu na učinkovitost prijenosa topline. Vođenje topline je bitno za formiranje zavara jer utječe na brzinu hlađenja i konačnu mikrostrukturu zavarenog spoja. Optimalno upravljanje toplinom osigurava kvalitetne zavare s minimalnim unutarnjim naprezanjima i deformacijama [7].

4.1.2. Konvekcija topline

U procesu zavarivanja, konvekcija topline igra ključnu ulogu u distribuciji topline unutar zavarenog spoja i okolnog materijala. Konvekcija, konkretno, uključuje prijenos topline kroz gibanje rastaljenog metala. Ovaj proces je kritičan jer utječe na oblik i veličinu taline kao i na mikrostrukturu konačnog zavara. U talini, gibanje rastaljenog metala može biti uzrokovano gravitacijom, elektromagnetnim silama, površinskom napetošću (Marangoni efekt) i plinskim mlazom iz elektrode ili zaštitnog plina. Također, konvekcija se javlja između ploče zavarivanja te okolnog fluida odnosno zraka koji je u doticaju s pločom [8].

Najjednostavniji opis konvekcije prikazuje se Newtonovom jednačbom:

$$q = \alpha \cdot A \cdot (T_{površine} - T_{okoline}) \quad (4.2)$$

Gdje su:

- q : toplinski tok (količina topline koja se prenosi konvekcijom, izražena u vatima, [W])
- α : koeficijent prijelaza topline konvekcijom, [W/m²·K]
- A : površina kroz koju toplina prolazi, [m²]
- $T_{površine}$: temperatura površine, [K]
- $T_{okoline}$: temperatura okolnog fluida, [K]

Marangoni konvekcija je rezultat gradijenta površinske napetosti na granici faza tekućina-zrak. U talini, temperaturni gradijenti uzrokuju varijacije u površinskoj napetosti rastaljenog metala, što inducira konvektivne struje. Ove struje mogu značajno utjecati na dubinu penetracije zavara i uniformnost taljenja. Marangoni efekt može biti pojačan dodavanjem legirajućih elemenata ili primjenom različitih vrsta zaštitnih plinova, što mijenja površinsku napetost metala [8].

Elektromagnetne sile također igraju važnu ulogu u konvekciji topline. Kada se koristi istosmjerna struja za zavarivanje, stvara se magnetsko polje koje može inducirati Lorentzovu silu

na nabijenim česticama u rastaljenom metalu. Ova sila može potaknuti gibanje rastaljenog metala, doprinoseći miješanju i ravnomjernoj distribuciji topline unutar zavarivačkog bazena.

Konvekcija topline ima direktan utjecaj na kvalitetu zavara. Ravnomjerno raspoređena toplina osigurava homogenu taljenje i skrućivanje, što rezultira zavarama s manjim brojem grešaka i boljim mehaničkim svojstvima. Efektivno miješanje u talini smanjuje rizik od segregacije legirajućih elemenata i formiranja krhkih faza. Također, konvekcija može pomoći u smanjenju poroznosti i drugih nepoželjnih karakteristika [8].

4.1.3. Radijacija ili zračenje topline

Zračenje topline, ili radijacija, igra značajnu ulogu pri zavarivanju, posebno pri visokim temperaturama. Radijacija je proces prijenosa topline u obliku elektromagnetskih valova, prvenstveno u infracrvenom spektru, ovisno o temperaturi tijela. Kod zavarivanja, toplinski izvori kao što su električni lukovi generiraju visoke temperature koje uzrokuju emitiranje toplinskog zračenja. Kada se metal zagrije na visoke temperature tijekom zavarivanja, on počinje emitirati toplinsko zračenje u okolni prostor. Zračenje postaje dominantan mehanizam prijenosa topline pri temperaturama iznad 600 K, a pri temperaturama oko 1100 K, radijacija može činiti čak 80% ukupnog prijenosa topline [8]. Intenzitet zračenja ovisi o nekoliko faktora, uključujući temperaturu površine, emisivnost materijala i površinsku obradu. Materijali s visokom emisivnošću, poput oksidiranih metala, zrače više topline u usporedbi s poliranim metalima. Stefan-Boltzmannov zakon kvantificira zračenje topline, gdje je emitirana toplina proporcionalna četvrtoj potenciji apsolutne temperature površine što se prikazuje sljedećom jednadžbom:

$$P = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4.3)$$

Gdje je:

- P - ukupna snaga zračenja tijela po jedinici površine, [W/m²]
- ϵ - emisivnost tijela (vrijednost između 0 i 1, gdje je 1 za idealno crno tijelo)
- σ - Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴]
- T - apsolutna temperatura tijela, [K].

4.2. Unos energije pri zavarivanju

Dakle, unos topline topline pri zavarivanju je količina energije unesena po jedinici duljine zavara od izvora topline u pokretu, bilo da se radi o plamenu, električnom luku, plazmi ili zraci. Neto unos energije izračunava se kao omjer ukupne ulazne snage izvora topline (u vatima) i njegove brzine kretanja:[7]

$$Q = \frac{q}{v} \quad (4.4)$$

gdje je Q = unos energije (J), q = ukupna ulazna snaga izvora topline (W), a v = brzina zavarivanja (mm/s).

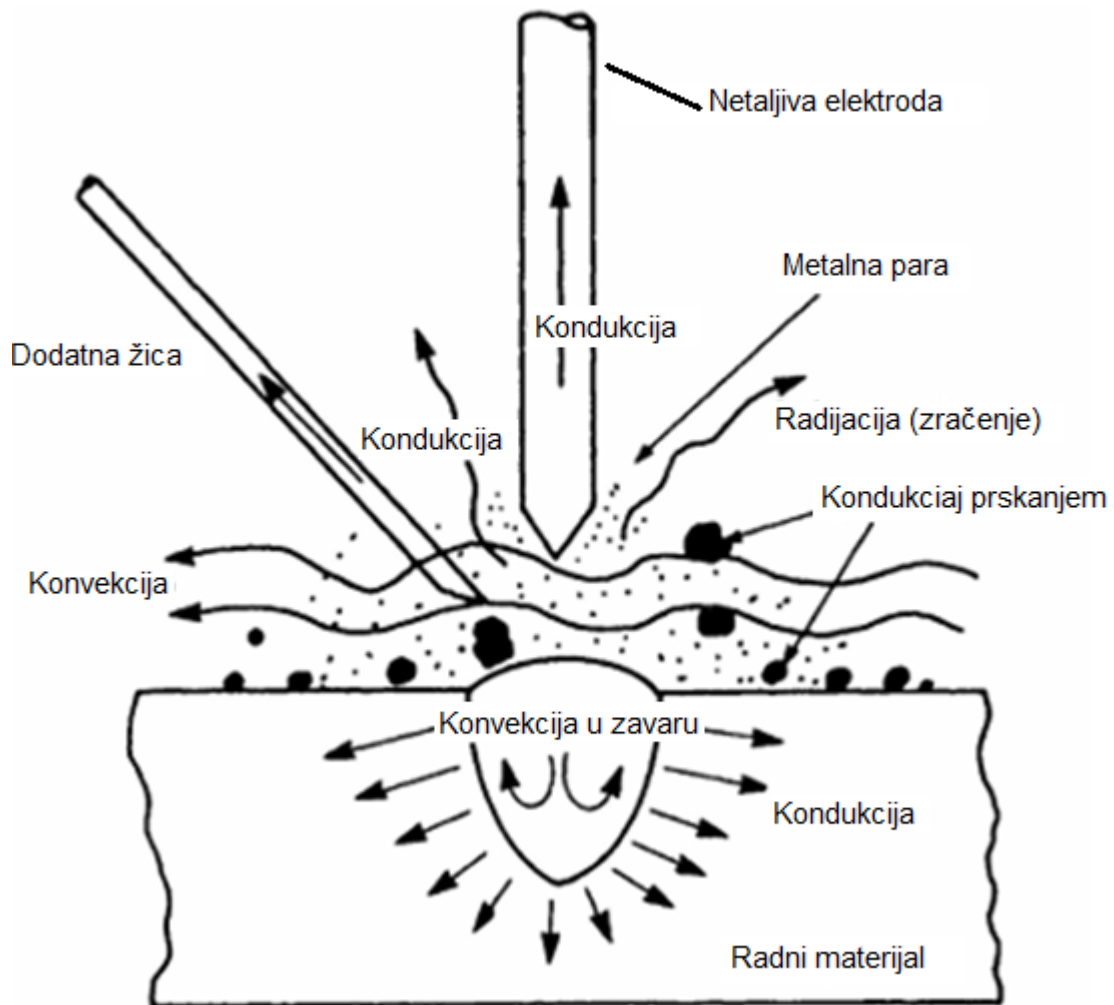
Za električni luk vrijedi sljedeće:

$$Q = \frac{U \cdot I}{v} \quad (4.5)$$

gdje su U = napon, I = električna struja, što pomnoženo daje snagu izvora. Što je veći neto unos topline u radni komad, to je veći učinak topline, kako pozitivan tako i negativan [7].

4.3. Učinkovitost prijenosa topline pri TIG zavarivanju

Kada se energija ili toplina prenose sa izvora na radni komad kako bi se stvorio zavar, prijenos nikad nije savršen. Mnogo je mogućnosti za gubitak energije između izvora zavarivanja i radnog komada u procesima zavarivanja taljenjem. Također, gubici se mogu dogoditi unutar samog radnog komada. Kao što je prikazano na slici (18), energija se može izgubiti radijacijom u obliku infracrvenog, vidljivog i/ili ultraljubičastog svjetla; konvekcijom prema zraku ili zaštitnim plinovima; te provodljivošću prema netaljivim elektrodama, dodatnom materijalu ili masi radnog komada koja okružuje područje unošenja topline. Mogući su i gubici topline s gubitkom mase u obliku metalne pare ili prskanja rastaljenog metala. Koji od ovih uzroka zapravo uzrokuju gubitak energije između izvora i radnog komada, ili unutar radnog komada, ovisi o specifičnim karakteristikama procesa zavarivanja i radnog komada, kao i načinu unosa energije (npr. provođenjem taline ili formiranjem ključanice) [6].



Slika 18 Uzroci gubitka tijekom transfera topline do mjesta zavarivanja [6].

Ukupan zbroj svih gubitaka određuje koliko je proces učinkovit u prijenosu energije ili topline. Da bi se odredilo koliko topline je preneseno s električnog luka na radni komad, potrebno je uključiti koeficijent efikasnosti prijenosa topline, η u prethodnu jednadžbu. Nakon što se uključi koeficijent dobiveno je sljedeće:

$$Q_{net} = \frac{U \cdot I}{v} \cdot \eta \quad (4.6)$$

S obzirom na specifičnosti raznih procesa zavarivanja, u sljedećoj tablici mogu se vidjeti neke tipične vrijednosti efikasnosti prijenosa topline. Kod TIG zavarivanja može se vidjeti da je efikasnost izvora zavarivanja ovisna o jačini struje, načinu polarizacije te vrsti struje [7].

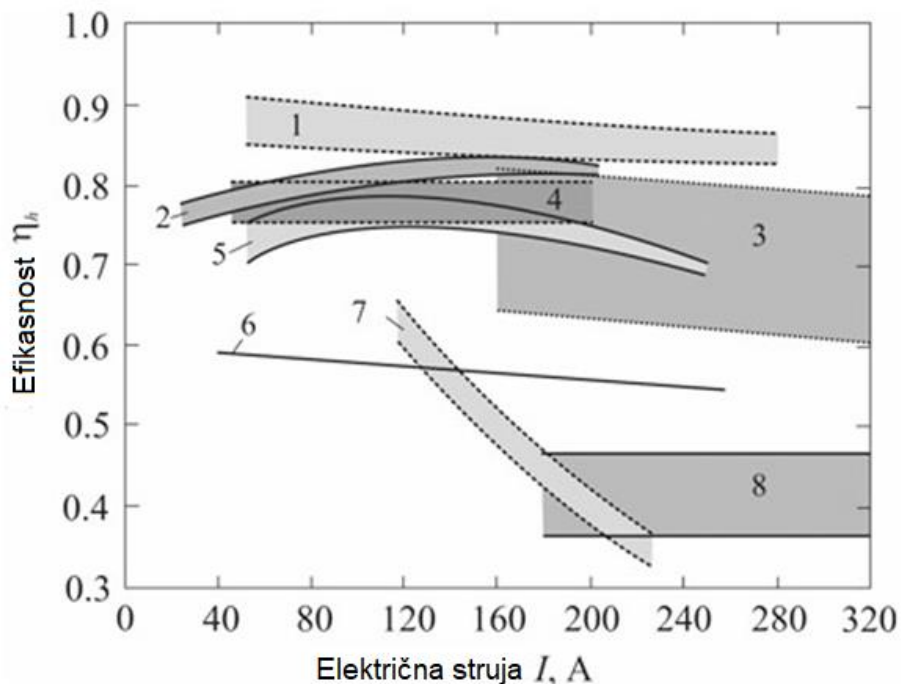
Tablica 8. Efikasnost izvora zavarivanja u ovisnosti o vrsti procesa zavarivanja.

Proces	Efikasnost η
TIG - niska struja, istosmjerni polaritet	0,4 - 0,6
TIG – visoka struja, istosmjerni polaritet	0,6 – 0,8
TIG – obrnuti polaritet	0,2 – 0,4
TIG – izmjenična struja	0,2 – 0,5
Zavarivanje plazmom - „melt in“	0,7 – 0,85
Zavarivanje plazmom - ključanica	0,85 – 0,95
MIG – globularni prijenos	0,6 – 0,75
MIG – spray transfer mode	0,65 – 0,85
Laser - ključanica	0,5 – 0,75

- Niska struja, istosmjerni polaritet: Efikasnost: 0.40–0.60 , ovo podešavanje obično uključuje niži unos topline, što ga čini pogodnim za zavarivanje tanjih materijala ili izvođenje finih, preciznih zavara.
- Visoka struja, istosmjerni polaritet: Efikasnost: 0.60–0.80, korištenje viših struja povećava unos topline, što može biti korisno za zavarivanje debljih materijala. Raspon efikasnosti sugerira da se značajan dio energije učinkovito koristi u procesu zavarivanja.
- Obrnuti polaritet: Efikasnost: 0.20–0.40, obrnuti polaritet (elektroda pozitivna) kod TIG zavarivanja je manje uobičajen i obično rezultira nižom efikasnošću zbog povećane topline na volframovoj elektrodi, što je manje poželjno za većinu primjena.
- Izmjenična struja (AC): Efikasnost: 0.20–0.50, AC se obično koristi za zavarivanje aluminijske i magnezijске, jer pomaže u čišćenju oksidnog sloja na ovim metalima. Efikasnost je niža u usporedbi s ravnim polaritetom zbog izmjenične prirode struje, što može uzrokovati fluktuirajuće unose topline.

Gubici energije kao što je prikazano na slici (13.) uzrokovani su zračenjem visokotemperaturne plazme luka, konvekcijom okolnog plina, prskanjem tekućih kapljica i drugim čimbenicima. Učinkovitost prijenosa η ovisi o različitim čimbenicima kao što su materijal koji se zavaruje, tehnika zavarivanja (s taljivom ili netaljivom elektrodom), zaštitni plin i njegova potrošnja, uvjeti zavarivanja (struja, napon, brzina zavarivanja) i slično [6].

Za zavarivanje s netaljivom elektrodom, eksperimentalne vrijednosti η variraju od 0,21 (kada se zavaruje aluminij izmjeničnom strujom) do 0,91 (kada je bakrena anoda hlađena vodom). Ovisnost učinkovitosti luka i primjenjene struje luka prikazana je na slici (14). Širok raspon vrijednosti η može se objasniti različitim uvjetima zavarivanja i metodama mjerenja. Duljina luka značajno utječe na učinkovitost; što je dulji luk, to je manja učinkovitost, što je prikazano trakom 3 na slici. Gornje vrijednosti odgovaraju duljini luka od 2 mm, a donje duljini od 6 mm [7].



Slika 19 Ovisnost učinkovitosti električnog luka volframovog elektrode η o struji I : 1—anoda hlađena vodom; 2—304 nehrđajući čelik; 3—12Kh18N10T nehrđajući čelik; 4—Legure s cirkonijem; 5—nehrđajući čelik; 6—čelik; 7—čelik; 8—meki čelik [7].

Pomoću nelinearnog modela trodimenzionalnog prijenosa topline, dobivena je formula za učinkovitost luka koja se može vidjeti niže: [7]

$$\eta = 0.947 - 0.00017 \cdot I - 0.057 \cdot l + 0.02 \cdot v \quad (4.7)$$

I – električna struja [A]

l – dužina električnog luka [mm]

v – brzina zavarivanja [mm/s]

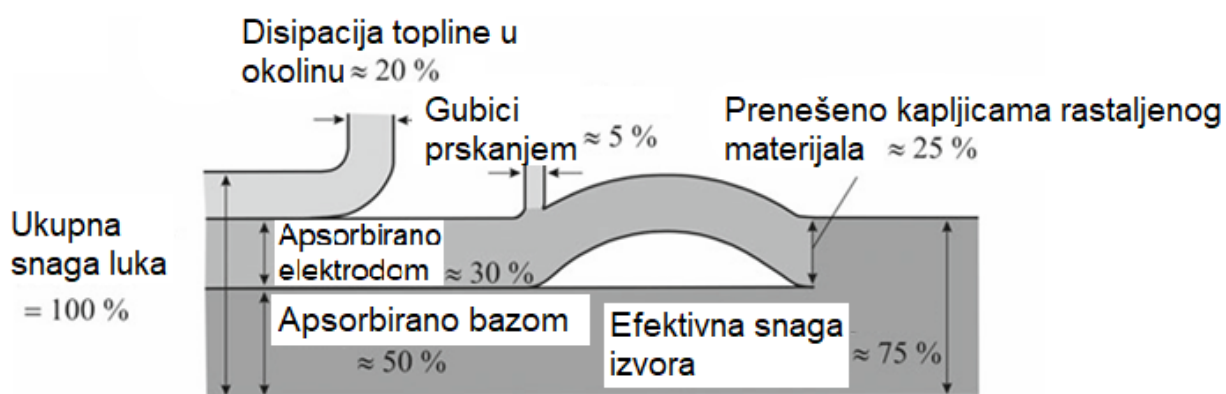
Iz jednadžbe proizlazi da s rastom struje I i duljine luka l , učinkovitost luka opada, dok s rastom brzine v raste. Procesi zavarivanja s netaljivim elektrodama imaju do 25% veću učinkovitost nego što je opisano u trenutnom standardu EN 1011-1 [7].

Ako se poveća tlak zaštitnog plina (argona i helija), učinkovitost luka drastično pada zbog povećanih gubitaka zračenjem. Na primjer, ako je struja 100 A, η iznosi 0,7 pri tlaku p od 0,1 MPa, a η iznosi 0,4 pri tlaku p od 30 MPa [7].

Tijekom zavarivanja s taljivim elektrodom, komponente efektivne snage imaju složeniju prirodu, a učinkovitost luka je, u pravilu, viša nego tijekom zavarivanja s netaljivom elektrodom. Više vrijednosti η objašnjavaju se činjenicom da dio topline, koji topi elektrodu, prelazi s kapljicama u talinu i doprinosi zagrijavanju osnovnog metala [7].

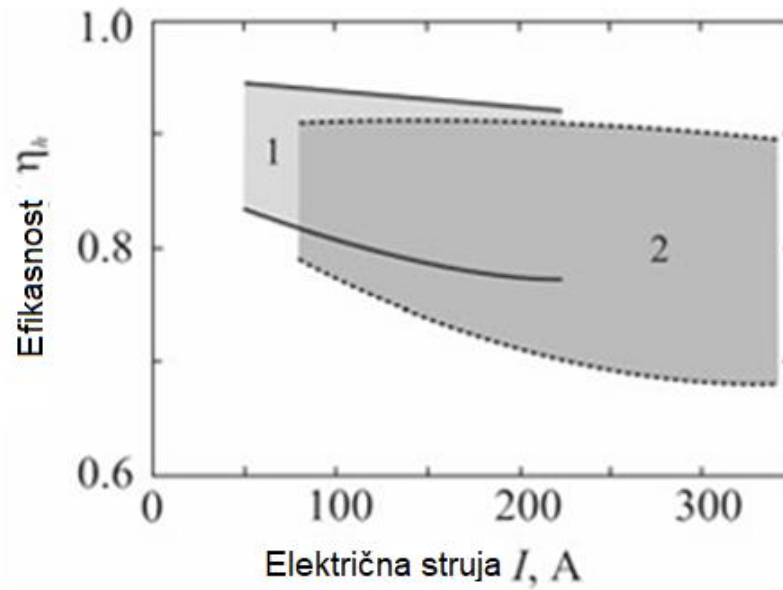
Vrijednost η u većoj mjeri ovisi o položaju luka u odnosu na zavareni materijal. Na primjer, tijekom višeslojnog zavarivanja uskog razmaka, gotovo sva toplina ide u zavareni spoj. Tijekom zavarivanja pod praškom nisko ugljičnog čelika s izmjeničnom strujom, vrijednosti η dosežu čak i do 0,90–0,99 [7].

Na slici niže može se vidjeti ugrubo kako se toplina raspodjeljuje prilikom procesa zavarivanja TIG metodom [7].



Slika 20 Gubitci topline prilikom TIG zavarivanja [7].

Također, na sljedećem grafu može se vidjeti ovisnost efikasnosti električnog luka obzirom na jakost električne struje sa duljinom luka 1-2 mm, (1) promjer žice 0,89 mm, (2) promjer žice 1,2 mm [7].



Slika 21 Efikasnost električnog luka u ovisnosti o jačini električne struje kod TIG zavarivanja [7].

Važno je napomenuti da je modeliranje fizičkih pojava u luku, elektrodi i zavarenom spoju izuzetno složen fizikalno-matematički zadatak. Ovakvo modeliranje se uglavnom provodi u istraživačke svrhe i još uvijek nije postalo dio inženjerske prakse. Zbog toga se razmatranje utjecaja luka na toplinske procese u spoju obično svodi na određivanje površinskih toplinskih tokova prema već objavljenim podacima [7].

5. Distribucija temperature prilikom TIG zavarivanja

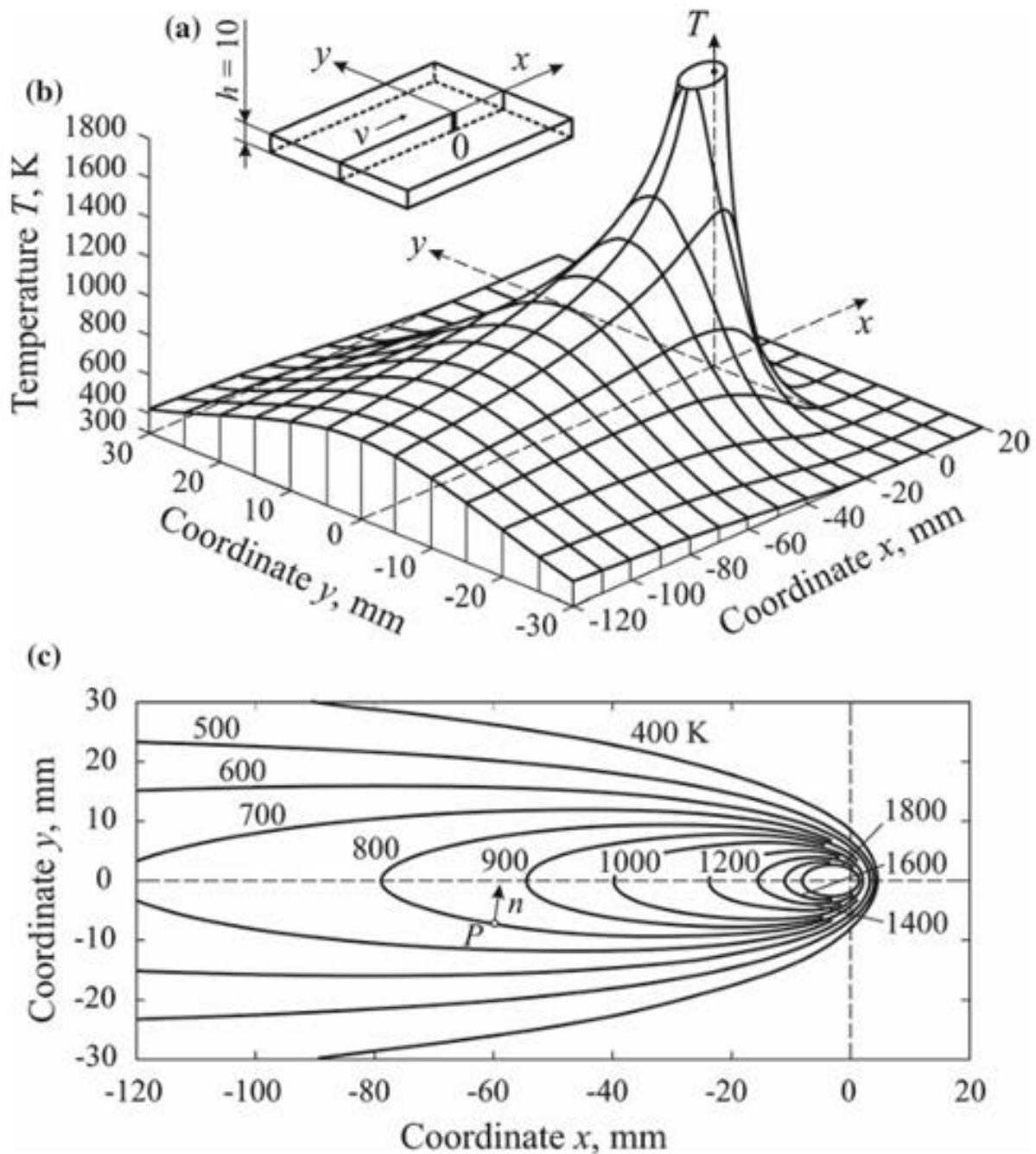
Kada se proučava temperatura pri zavarivanju, posebno temperatura same ploče koja se zavaruje, jasno je da se temperatura mijenja kako u prostoru, tako i u vremenu, što znači da je temperatura funkcija više varijabli. Kako bi se predvidjela ili izračunala temperatura tijekom zavarivanja, prvo se identificiraju relevantne i najvažnije fizikalne pojave koje utječu na raspodjelu temperature. Nakon toga, izrađuje se toplinski matematički model, predstavljen diferencijalnom jednačinom ili jednačinama, koji se zatim rješava nekom od metoda. U zavarivanju je važno izračunati, odnosno predvidjeti distribuciju temperature, jer ona određuje mikrostrukturu materijala u zoni utjecaja topline, kao i zaostala naprezanja i izobličenja zavarene konstrukcije [11].

Zbog ovih razloga, potrebno je predvidjeti kako se toplina širi u metalu. Jedan pristup uključuje korištenje analitičkog matematičkog modela koji povezuje temperaturu s ostalim parametrima zavarivanja [12]. Početkom 20. stoljeća, D. Rosenthal je prvi objavio literaturu koja objašnjava ponašanje toka topline pomičnog izvora topline pomoću matematičkog modela [12]. Primjenjujući Fourierov zakon na pomični izvor topline, stvoren je prvi matematički model izvora topline s homogeno raspodijeljenom toplinom [12]. Međutim, značajno ograničenje ovog modela jest to što se sva energija zavarivanja koncentrira u jednoj točki, pri čemu se zanemaruju oblik područja rastaljenog metala i dubina prodiranja [12].

Trenutno postoje tri glavne kategorije analitičkih rješenja za opisivanje zavarivanja: rješenja temeljena na Gaussovoj funkciji pogreške (1D), Rosenthalovo rješenje (2D i 3D) te integralne funkcije. Analitička rješenja zahtijevaju znatno manje računalne snage u usporedbi s numeričkim rješenjima. Ipak, često su neprecizna zbog različitih pretpostavki i pojednostavljenja inherentnih ovim modelima [12]. Na primjer, u Rosenthalovom modelu pretpostavlja se točkasti izvor topline, zanemaruju se površinski gubici topline i konvekcija u području rastaljenog metala, smatraju se termička svojstva materijala konstantnima, zanemaruje se latentna toplina fuzije te se pretpostavlja da se brzina izmjene topline ne mijenja tijekom vremena. Dodatno, analitička rješenja primjenjuju se na jednostavnu geometriju metala i ne uzimaju u obzir diskontinuitete u materijalu [12]. Naravno, bez tih pretpostavki diferencijalne jednačine su nelinearne i njihovo egzaktno rješenje ne postoji.

Kako je navedeno u ovom radu, fokus će biti na raspodjeli topline, odnosno temperature, u TIG zavarivanju, s posebnim naglaskom na objašnjenje Rosenthalovog matematičkog modela s grafičkim rezultatima. Nakon toga, simulacija će se provesti pomoću Pythona i ANSYS-a kako bi

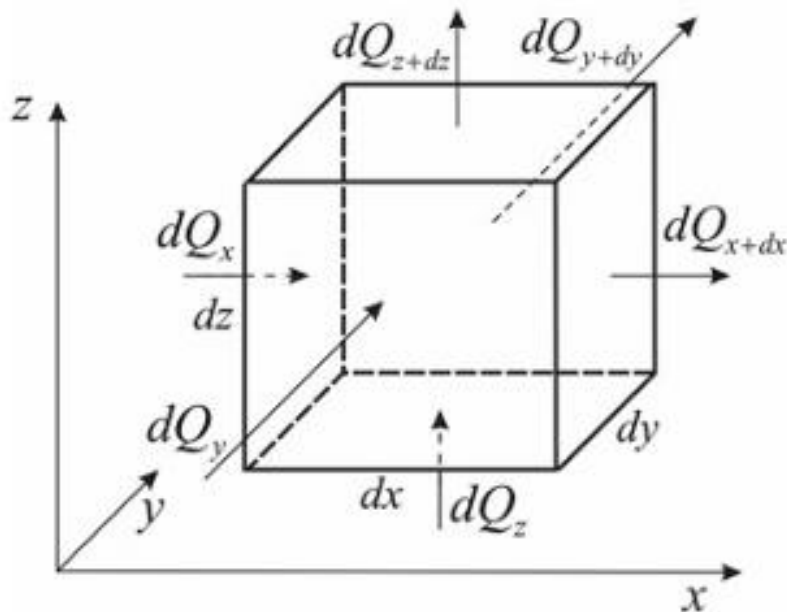
se dobiveni rezultati mogli usporediti. Na donjoj slici prikazana je distribucija temperature u proizvoljnom trenutku tijekom zavarivanja ploče debljine 10 mm s pokretnim izvorom, pri čemu su zanemareni gubici topline kroz zračenje i konvekciju, a pretpostavlja se da se fizikalna svojstva materijala ne mijenjaju. Za lakše rješavanje jednadžbe koristi se uvjet beskonačne ploče u x i y smjeru [7].



Slika 22 Temperaturno polje oko pokretnog linijskog izvora u beskonačnoj ploči debljine 10 mm s površinom ne provodljivom za toplinu (snaga $q = 5000$ W), brzina ($v = 5$ mm/s), toplinska provodljivost ($\lambda = 0.04$ W/mmK) toplinska difuzivnost ($a = 8$ mm²/s), početna temperatura ($T_0 = 300$ K) [7].

5.1. Toplinska jednadžba

Da bi se odredila distribucija temperature na ploči koja se zavaruje, potrebno je najprije odrediti diferencijalnu jednadžbu koja uzima u obzir toplinu koja ulazi u sustav te toplinu koja izlazi iz sustava. Najprije se kreće s opisom kondukcije topline, a potom će se uvrstiti radijacija i konvekcija. Za početak se razmatra infinitezimalno mali volumen, odnosno kocka, prikazana na slici niže koja se nalazi unutar bakrene ploče koja se zavaruje [7].



Slika 23 Infinitezimalni dio volumena tijela kroz koje prolazi toplina [7].

Kako bi se odredila distribucija temperature u čvrstom tijelu, najprije se mora formulirati diferencijalna jednadžba koja povezuje prostornu raspodjelu temperature s promjenom temperature u vremenu. Ova jednadžba temelji se na zakonu očuvanja energije i Fourierovom zakonu provođenja topline. Pretpostavlja se radi općenitosti da toplinska vodljivost duž osi λ_x , λ_y , λ_z može biti različita. Nadalje, unutar tijela neka postoji izvor topline s gustoćom snage q_3 , [Wm^{-3}]. Prema Fourierovom zakonu kondukcije topline, količina topline koja ulazi na površinu pravokutnika $[dy] \cdot [dz]$ duž osi x u vremenu dt je: [7]

$$dQ_x = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} dy \cdot dz \cdot dt \quad (5.1)$$

- dQ_x je količina topline koja se prenosi u x smjeru.

- λ_x je toplinska vodljivost u x smjeru.
- $\frac{\partial T}{\partial x}$ je temperaturni gradijent u x smjeru.

Količina topline dQ_{x+dx} , koja se prenosi kroz suprotnu površinu, može se izračunati proširenjem Taylorovog reda i uzimanjem samo prvih dvaju članova jer tada se zadržavaju samo linearne članovi:

$$dQ_{x+dx} = dQ_x + \frac{\partial(dQ_x)}{\partial x} dx = dQ_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (5.2)$$

Da bi se odredila razlika količina topline u volumenu dV , uzrokovanu toplinskom vodljivošću duž x -osi tijekom vremena dt , koristi se izraz:[7]

$$dQ_x - dQ_{x+dx} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \cdot dV \cdot dt \quad (5.3)$$

Nakon iste procedure za y i z osi dobiveno je sljedeće:[7]

$$\Delta Q_y = dQ_y - dQ_{y+dy} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot dV \cdot dt \quad (5.4)$$

$$\Delta Q_z = dQ_z - dQ_{z+dz} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \cdot dV \cdot dt \quad (5.5)$$

Količina topline generirana unutarnjim izvorom topline u zadanom volumenu tijekom vremena dt izražena je kao:[7]

$$dQ_v = q \cdot dV \cdot dt \quad (5.6)$$

Ukupna akumulirana toplina u volumenu tijekom vremena dt povezuje se s promjenom temperature pomoću relacije:

$$dQ = \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} dV \cdot dt \quad (5.7)$$

$$dQ = c_p \rho V \frac{\partial T}{\partial t} dt \quad (5.8)$$

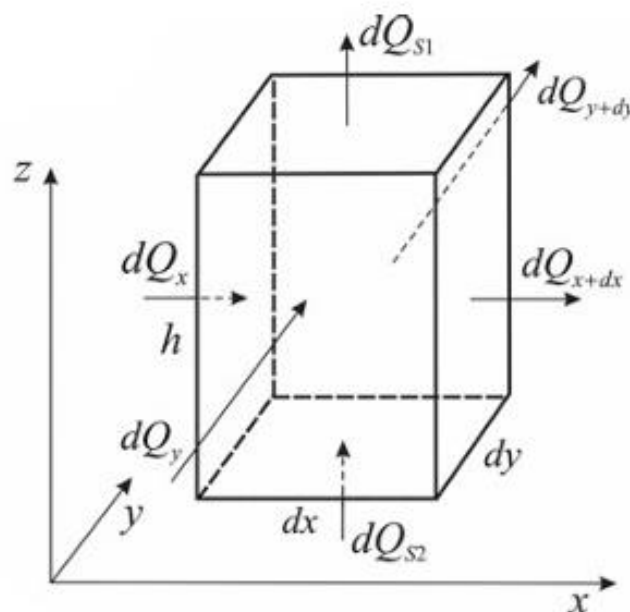
Gdje je H entalpija izražena u jedinicama $[\text{J/g}^{-1}]$, c_p je specifični toplinski kapacitet, izražen $[\text{J/m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$. Konačno, dobivena je diferencijalna jednačbu za prijenos topline u ortotropnom tijelu u koordinatnom sustavu vezanom za tijelo:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (5.9)$$

Ova jednačba omogućava analizu prijenosa topline unutar ortotropnog materijala, uzimajući u obzir toplinske vodljivosti u svim smjerovima i unutarnje izvore topline. Također treba napomenuti da je zavarivanje uvijek praćeno elastičnim i plastičnim deformacijama materijala, što je povezano s apsorpcijom i oslobađanjem energije, međutim to se u daljnim računima neće uzeti u obzir [7]. Ortotropna svojstva su tipična za kompozitne materijale, monokristale, slojevite i vlaknaste materijale, dok su zanemariva za strukturne materijale koji se koriste u zavarivanju.

Izvedena je konačno diferencijalnu jednačbu za prijenos topline za tanku ploču s debljinom h koja omogućava prijenos topline s obje površine. Razmotren je elementarni kvadar čiji je volumen:

$$dV = dx \cdot dy \cdot dh \quad [7].$$



Slika 24 Infinitesimalni volumen, kvadar za analizu toplinskih tokova [7].

Pretpostavlja se da su toplinski tokovi duž z-osi kroz gornju i donju površinu ploče (dQ_{S1}) i (dQ_{S2}) proporcionalni temperaturnoj razlici između površine, T i temperature okoline, $T_{okoline}$ što predstavlja Newtonov zakon hlađenja odnosno konvekcije topline:

$$dQ_{S1} = \alpha_1(T - T_{okoline}) \cdot dx \cdot dy \cdot dt \quad (5.10)$$

$$dQ_{S2} = \alpha_2(T - T_{okoline}) \cdot dx \cdot dy \cdot dt \quad (5.11)$$

gdje su α_1 α_2 koeficijenti izmjene topline za gornju i donju površinu, izraženi u $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}]$. Također se pretpostavlja da je temperatura duž debljine ploče trenutna (toplinska vodljivost λ_z je velika, a debljina h mala, pa je polje temperature dvodimenzionalno odnosno funkcija je prostornih koordinata x i y te vremena t , $T = T(x, y, t)$ [7].

Izjednačavanjem akumulirane topline s toplinom koja se prenosi zbog toplinske vodljivosti kroz površinske i unutarnje izvore, dobivena je diferencijalna jednadžba prijenosa topline za ortotropnu ploču s površinskim izvorom topline u fiksnoj koordinatnoj sustavu.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{h} (T - T_{okoline}) + q \quad (5.12)$$

Rješenje jednadžbe prijenosa topline se znatno pojednostavljuje ako se pretpostavi da je tijelo izotropno, odnosno ako su: toplinska vodljivost λ , specifični toplinski kapacitet po volumenu c_p , koeficijent izmjene topline α , intenzitet izvora q , temperatura okoline $T_{okoline}$ konstantna. U tom slučaju, gornja jednadžba za ploču se svodi na sljedeći oblik:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - bT + \frac{q}{c_p} \quad (5.13)$$

Gdje je koeficijent b koeficijent koji uključuje disipaciju odnosno gubitak topline:

$$b = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{c \cdot p \cdot h} \quad (5.14)$$

Za tanku ploču se uzima da su α_1 i α_2 jednaki.

Dok je koeficijent a odnosno difuzivnost:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (5.15)$$

- $\frac{\partial T}{\partial t}$ je parcijalna derivacija temperature T po vremenu t . Taj član predstavlja „brzinu“ promjene temperature u vremenu.
- $a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$ Ovaj cijeli član predstavlja difuziju topline u prostoru. Član a je difuzivnost materijala.
- $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ i $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ su druge parcijalne derivacije temperature po prostornim koordinatama.
- $\frac{q_z}{c_p}$: q je gustoća volumetrijskog izvora topline, c_p je specifični toplinski kapacitet materijala. Ovaj cijeli član predstavlja izvor topline po jedinici mase.

5.2. Rubni uvjeti toplinske jednadžbe

Diferencijalna jednadžba provođenja topline ima beskonačan skup rješenja. Na primjer, ako funkcija $T(x, y, z, t)$ zadovoljava jednadžbu, tada i funkcija $T(x, y, z, t) + \text{konstanta}$ također zadovoljava. Da bi se izabralo jedno rješenje koje opisuje određeni praktični slučaj, potrebno je definirati geometrijske uvjete (oblik i veličinu tijela), termofizičke parametre (a , c_p , q) i rubne uvjete. Rubni uvjeti uključuju skup početnih i rubnih uvjeta. Početni uvjet se određuje postavljanjem zakona raspodjele temperature unutar tijela u početnom trenutku ($t = 0$):[7]

$$T(x, y, z, 0) = f(x, y, z) \quad (5.16)$$

Kod zavarivanja, uobičajeno je pretpostaviti jednoliku raspodjelu temperature s

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (5.17)$$

gdje je T_0 konstantna vrijednost koja se koristi kao referentna točka temperature. Rubni uvjeti opisuju interakciju površine tijela s okolnim medijem. Uobičajeno je koristiti rubne uvjete prvog, drugog, trećeg i četvrtog tipa u proračunima procesa zavarivanja. U ovom radu koristi će se rubni uvjete treće i četvrte vrste pa će fokus biti stavljen na njih. Toplina se prenosi s površine tijela kroz konvekciju i radijaciju. Kod konvekcijskog prijenosa topline, toplina se prenosi plinom(okoline) ili tekućinom koja je u pokretu zbog različite gustoće nejednako zagrijanih zona ili pod djelovanjem vanjske sile [7].

$$q_{2S,c} = \alpha_c (T_{površine} - T_{okoline}) \quad (5.18)$$

gdje je (α_c) koeficijent konvektivnog prijenosa topline prikazan na slici (23). Ovisi o obliku, veličini i prostornom položaju površine tijela, svojstvima okolnog medija i površine tijela, različiti temperatura ploče i okoline te drugim čimbenicima. S porastom temperature, koeficijent (α_c) prvo brzo raste, a zatim sporije, teži graničnim vrijednostima [7].

Hlađenje tijela kroz prijenos topline zračenjem opisano je Stefan-Boltzmannovim zakonom, prema kojem je gustoća toplinskog toka:[7]

$$q_{2S,r} = \varepsilon C_0 (T_{površine}^4 - T_{okoline}^4) = \alpha_r (T_{površine} - T_{okoline}) \quad (5.19)$$

Prema tome, vrijedi sljedeće:

$$\alpha_r = \varepsilon C_0 (T_{površine} + T_{okoline}) (T_{površine}^2 + T_{okoline}^2) \quad (5.20)$$

gdje je (ε) emisivnost površine, ($0 < \varepsilon < 1$),

(C_0) je Stefan-Boltzmannova konstanta, ($C_0 = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

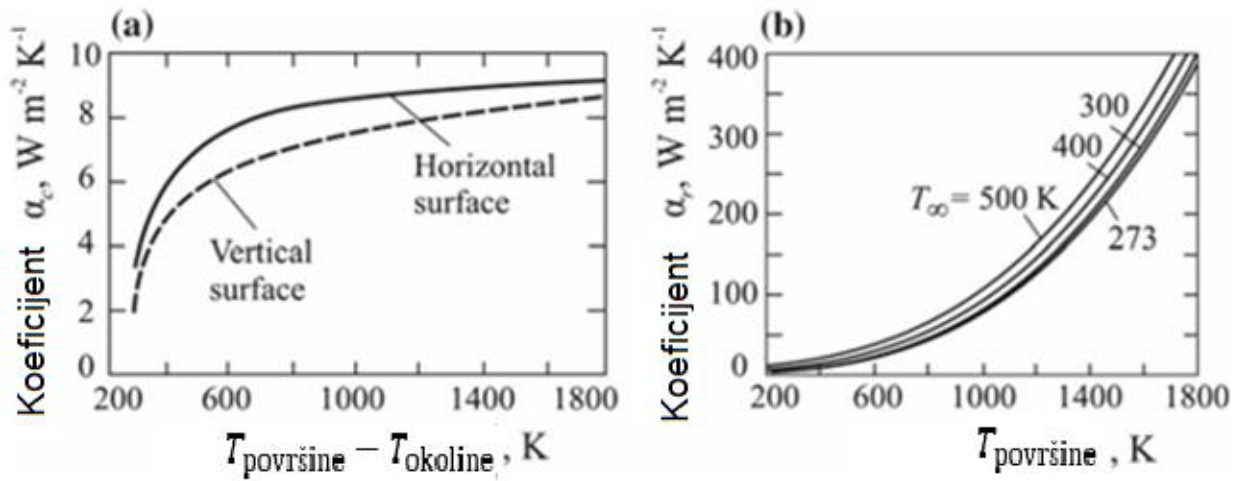
Može se vidjeti da je koeficijent (α_R) proporcionalan koeficijentu (ε) i raste s povećanjem temperature u skladu s četvrtom potencijom temperature, slika (23). Veličina (ε) ovisi o stanju površine. Za polirane metalne površine koeficijent (ε) varira u rasponu od 0,2-0,4, za oksidirane i grube površine čelika unutar raspona od 0,6-0,95, za aluminij unutar raspona od 0,05-0,2. Za polirani bakar iznosi od 0,03 do 0,05 dok za oksidirani bakar iznosi 0,5 do 0,7 [8]. Ukupni prijenos topline može se predstaviti kao suma konvektivnih i radijacijskih komponenti sljedećom jednadžbom:

$$q_S = q_{S,c} + q_{S,r} = \alpha (T_{površine} - T_{okoline}) \quad (5.21)$$

Gdje je:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad (5.22)$$

Koeficijent α predstavlja ukupni prijenos topline s površine te uključuje radijaciju i konvekciju. Na sljedećoj slici prikazano je kako se radijativni i konveksijski koeficijenti ponašaju s porastom temperature [7].



Slika 25 Ovisnost radijativnog koeficijenta prijenosa topline (desno) te konveksijskog koeficijenta (lijevo) o temperaturi, za $\epsilon=1$ u okolini zraka [7].

5.3. Modeliranje toplinskog izvora

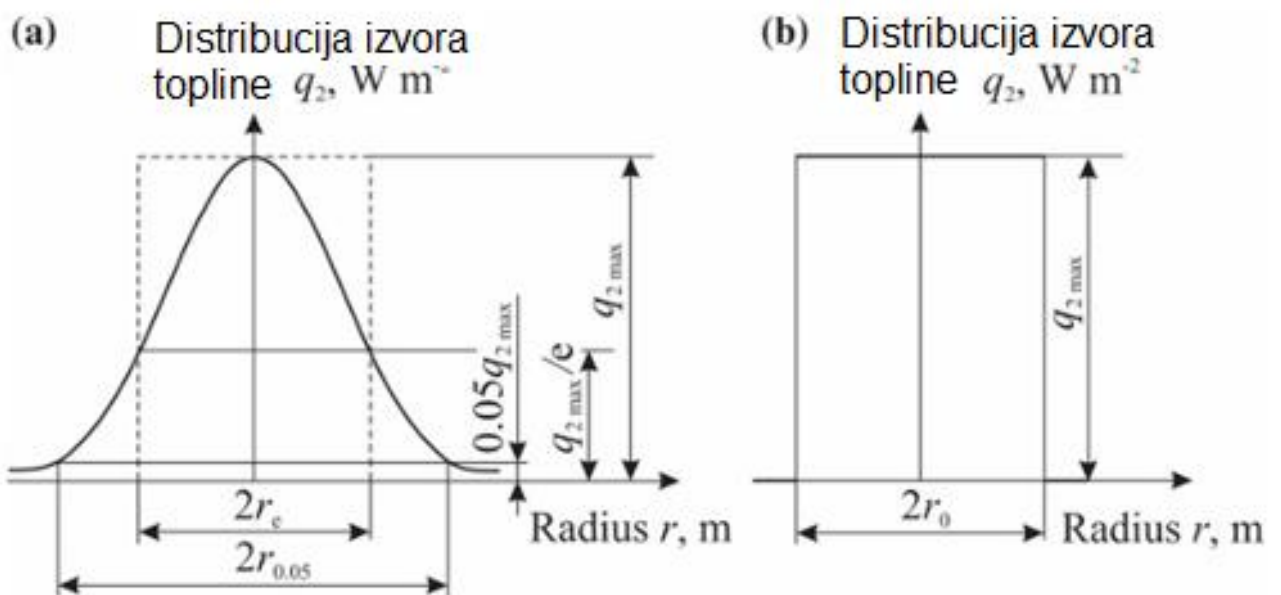
Eksperimenti pokazuju da većina izvora zavarivanja (električni luk, plinski plamen, elektronski snop, plazma, laserski snop itd.) ima aksijalnu simetriju, a radijalna distribucija gustoće toplinskog toka dobro je opisana Gaussovom krivuljom, odnosno normalnom distribucijom [7].

$$q_2(r) = q_{2\max} \exp(-Cr^2) \quad (5.23)$$

gdje $q_{2\max}$ predstavlja gustoću toplinskog toka u središtu izvora topline (gdje je $r = 0$), u jedinicama $[\text{W}/\text{m}^2]$, C je faktor koncentracije toplinskog toka, u $[\text{m}^{-2}]$. Ovi izvori topline nazivaju se normalno distribuirani kružni izvori. Veza između efektivne snage izvora (q) i parametara distribucije $q_2(r)$ uspostavlja se integracijom gustoće toplinskog toka (q_2) preko cijele ravnine:[7]

$$q = \int_0^{\infty} q_2(r) 2\pi r dr = \frac{\pi}{C} q_{2\max} \text{ ili } q_{2\max} = \frac{C}{\pi} q \quad (5.24)$$

Na sljedećoj slici može se vidjeti distribuciju toplinskih izvora zavarivanja. Na lijevoj strani je Gaussova kružna odnosno normalna distribucija (oblik zvona) dok je s desne strane kružna, ali konstantna distribucija (oblik valjka) [7].



Slika 26 (a) Normalna distribucija toplinskog izvora i (b) konstantni cirkularni izvor [7].

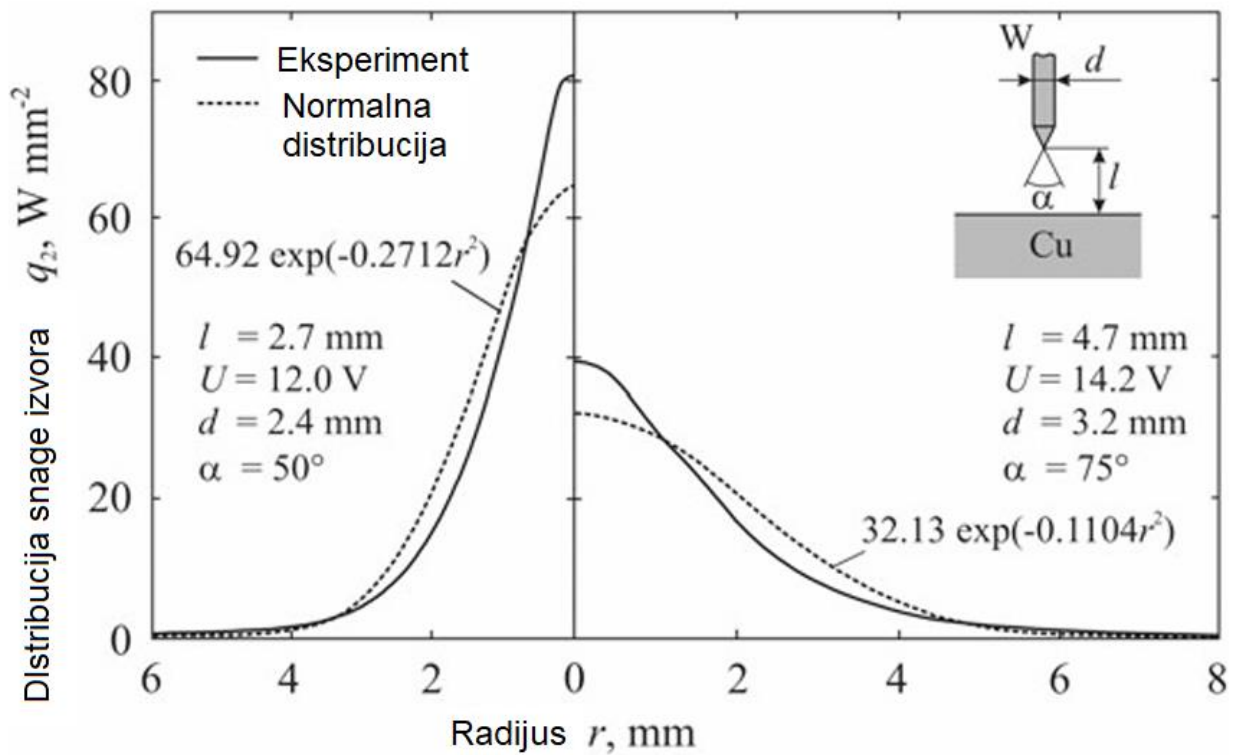
Na sljedećoj slici (27.) može se vidjeti kako izgleda distribucija TIG izvora obzirom na korišteni model Gaussove normalne distribucije te eksperimenta. Na slici su prikazane dvije situacije zavarivanja ali s različitim parametrima.

Na lijevoj strani se koriste sljedeći podaci:

- Promjer elektrode, $d= 2.4$ mm
- Napon, $U=12$ V
- Kut vrha elektrode, $\alpha=50^\circ$
- Dužina električnog luka, $l=2.7$ mm
- Faktor koncentracije toplinskog toka, $C=0.2712$ m⁻²
- Maksimalna gustoća izvora, $q_{2\max}=64.92$ W/m²

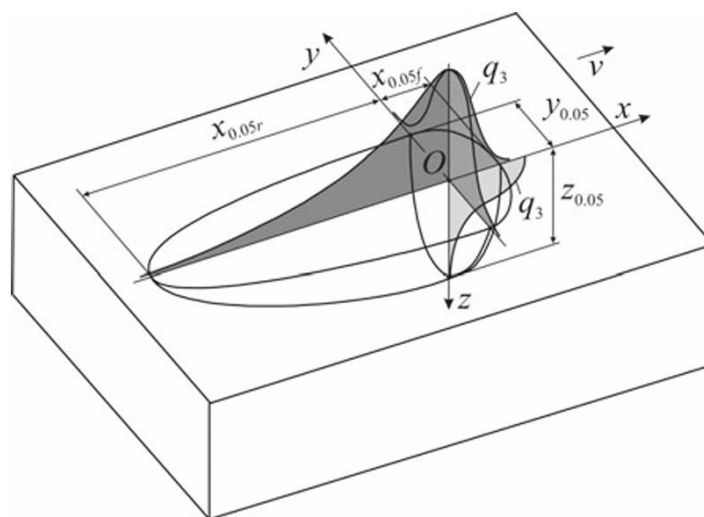
Na desnoj strani:

- Promjer elektrode, $d= 3.2$ mm
- Napon, $U=14.2$ V
- Kut vrha elektrode, $\alpha=75^\circ$
- Dužina električnog luka, $l=4.7$ mm
- Faktor koncentracije toplinskog toka, $C=0.1104$ m⁻²
- Maksimalna gustoća izvora, $q_{2\max}=32.13$ W/m²



Slika 27 Distribucija TIG izvora prema modelu i eksperimentu [7].

Kod modeliranja izvora koristi se također i model elipsoida kao što može se vidjeti dolje na slici (18.). Ovaj model predstavlja kombinaciju normalnih distribucija duž y i z -osi, kao i duž x -osi ispred centra izvora i duž x -osi iza izvora [7].



Slika 28 Normalno distribuirani dvostruki elipsoid sa karakterističnim parametrima, tzv. Goldakov izvor [7].

Općenito, raspodjele izvora topline i njihove kombinacije ovise o metodi zavarivanja. Elipsoid je dobar model jer uzima u obzir nesimetričnost u smjeru zavarivanja, kao što se može vidjeti na gornjoj slici. U analizi distribucije temperature na ploči zavarivanja koristit će se planarni model izvora, koji je jednak po cijelom poprečnom presjeku, te će se usporediti rezultati s Gaussovim izvorom topline.

5.4. Metode rješavanja toplinske jednadžbe pri zavarivanju

Metode za rješavanje problema provođenja topline pri zavarivanju mogu se klasificirati prema obliku rješenja diferencijalne jednadžbe. Funkcionalno-analitičke metode koriste formule za rješavanje problema, dok numeričke metode koriste numeričke vrijednosti funkcije (temperature) na nekim fiksnim vrijednostima argumenta. Dakle, analitičke metode daju nam egzaktne rezultate, odnosno jednadžbe, dok nam numeričke metode daju konkretne brojeve. Metode rješavanja prikazane su u donjoj tablici [7].

Tablica 9 Klasifikacija metoda pri rješavanju toplinske jednadžbe [7].

Metode rješavanja problema provođenja topline	
Funkcionalno analitičke metode	Numeričke metode
Metoda izvora, Greenova metoda	Metoda konačnih razlika
Metoda separacija varijabli, Fourierova metoda	Metoda konačnih elemenata
Metoda integralnih transformacija	Metoda rubnih elemenata

Analitičke metode su uglavnom razvijene za rješavanje linearnih problema teorije provođenja topline. Nelinearni problemi rješavaju se samo u iznimnim slučajevima i uz značajne pretpostavke [7].

Numeričke metode omogućuju rješavanje složenih problema koji se ne mogu riješiti funkcionalno-analitičkim metodama, primjerice za tijela složenog oblika uzimajući u obzir temperaturnu ovisnost svojstava materijala. Metoda konačnih razlika (FDM) i metoda konačnih elemenata (FEM) najčešće su korištene metode u teoriji provođenja topline pri zavarivanju.

U usporedbi s numeričkim metodama, analitičke metode omogućuju dobivanje ilustrativnijih rješenja i lakšu te bržu analizu čimbenika koji utječu na rezultate rješenja. Za analizu funkcionalno-analitičkih rješenja često se moraju primijeniti numeričke metode, primjerice za izračun beskonačnih nizova i određenih integrala [7]. U nastavku ovoga rada bit će ilustrirane obje metode rješavanja. Analitičko Rosenthalovo rješenje, numeričko u Pythonu te numeričko u Ansysu.

5.5. Rješenja toplinske jednadžbe

Obzirom na detaljnu analizu toplinske jednadžbe u prethodnim poglavljima, poznato je da njezino rješavanje nije jednostavno, posebice ako se traže analitička rješenja bez upotrebe numeričkih metoda. Da bi se dobilo analitičko rješenje i pomoću jednadžbe moglo ugrubo izračunati distribuciju temperature oko mjesta zavarivanja, u nastavku će se koristiti analitička rješenja Daniela Rosenthala [12].

Rosenthalove jednadžbe su temelj matematičkih modela za analizu pomičnih izvora topline. U ovom potpoglavlju objašnjene su dva različita analitička modela koja opisuju pomični izvor topline: [12]

- Linearni izvor topline koji se brzo kreće (ili trenutni planarni izvor) na tankoj ploči.
- Linearni izvor topline koji se brzo kreće (ili trenutni planarni izvor) na tankoj ploči s uključenom disipacijom topline.

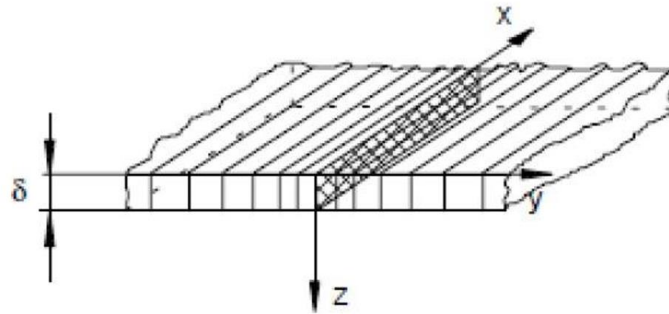
5.5.1. Trenutni planarni izvor na tankoj ploči

Pretpostavke ovog modela su sljedeće:

- Toplinski tok je konstantan.
- Toplinski izvor je planarni i konstantan duž ploče.

- Gubici topline kroz površinu ploče kroz konvekciju i radijaciju se zanemaruju.
- Konvekcija u zoni taljenja je zanemariva.
- Fizikalne veličine materijala se ne mijenjaju s temperaturom i vremenom.
- Latentna toplina taljenja je zanemariva.

Kada se linearni izvor topline giba većom brzinom onda se zapravo govori o trenutnom planarnom toplinskom izvoru kao što vidimo na donjoj slici [12].



Slika 29 Trenutni planarni toplinski izvor [12].

Jednadžba koja opisuje distribuciju temperature prema modelu je:[12]

$$T(y_0, t) - T_0 = \frac{q}{v \cdot \delta \cdot \sqrt{4\pi\lambda\rho c t}} \exp\left(-\frac{y_0^2}{4at}\right) \quad (5.25)$$

Gdje su:

- $T(y_0, t)$ - temperatura u točki y_0 i vremenu t , [K]
- T_0 - početna temperatura (sobna temperatura), [K]
- $q = U \cdot I \cdot \eta$ - snaga toplinskog izvora zagrijavanja, [W]
- v - brzina zavarivanja, [m/s]
- δ - debljina ploče, [m]
- λ - termička provodnost materijala, [W/m·K]
- ρ - gustoća materijala, [kg/m³]
- c - specifični toplinski kapacitet materijala, [J/kg·K]
- a - termička difuzivnost ($a = \frac{\lambda}{\rho c}$), [m²/s]
- t - vrijeme, [s]
- y_0 - udaljenost od izvora topline, u smjeru okomitom na zavar, slika(12.), [m].

Kako bi se izračunala temperaturna distribucija, odnosno temperaturni ciklus u određenoj točki ploče, potrebno je prethodno odrediti fizikalne konstante bakrene ploče koje su relevantne za izračun. $T_0 = 398 \text{ K}$

- $v = 30 \text{ cm/s} = 0.005 \text{ m/s}$
- $\delta = 0.003 \text{ m}$
- $\lambda = 350 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- $\rho = 8930 \text{ kg/m}^3$
- $c = 400 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- $\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{350}{8930 \cdot 400} = 9.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- $y_{01} = 0.03 \text{ m}$
- $I = 120 \text{ A}$
- $U = 14.8 \text{ V}$

- $q = U \cdot I \cdot \eta$ - snaga toplinskog izvora zagrijavanja, [W]

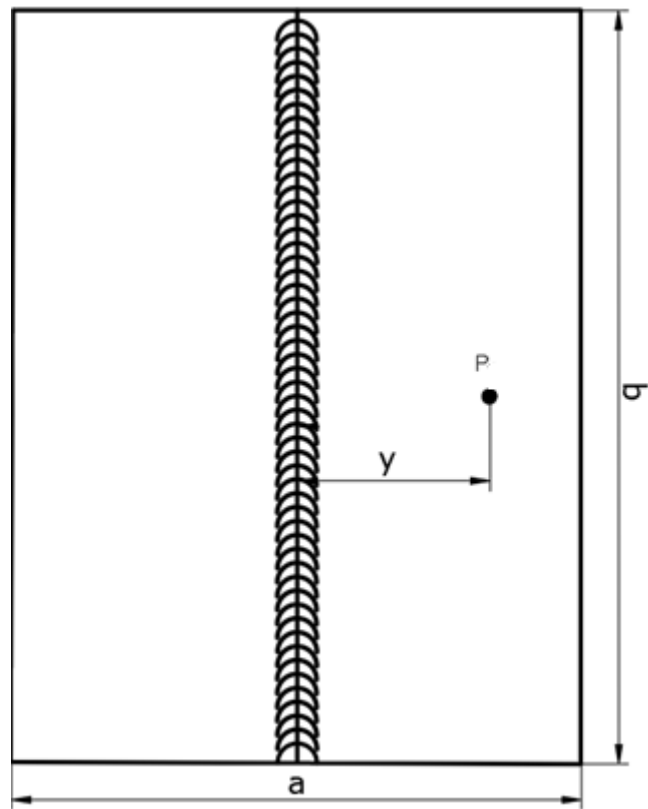
Izračunat je faktor efikasnosti samog procesa da bi se mogla odrediti snaga toplinskog izvora:

$$\eta = 0.947 - 0.00017 \cdot I - 0.057 \cdot l + 0.02 \cdot v$$
$$\eta = 0.947 - 0.00017 \cdot 120 - 0.057 \cdot 3.2 + 0.02 \cdot 5 = 0.8442$$

Snaga izvora je tada:

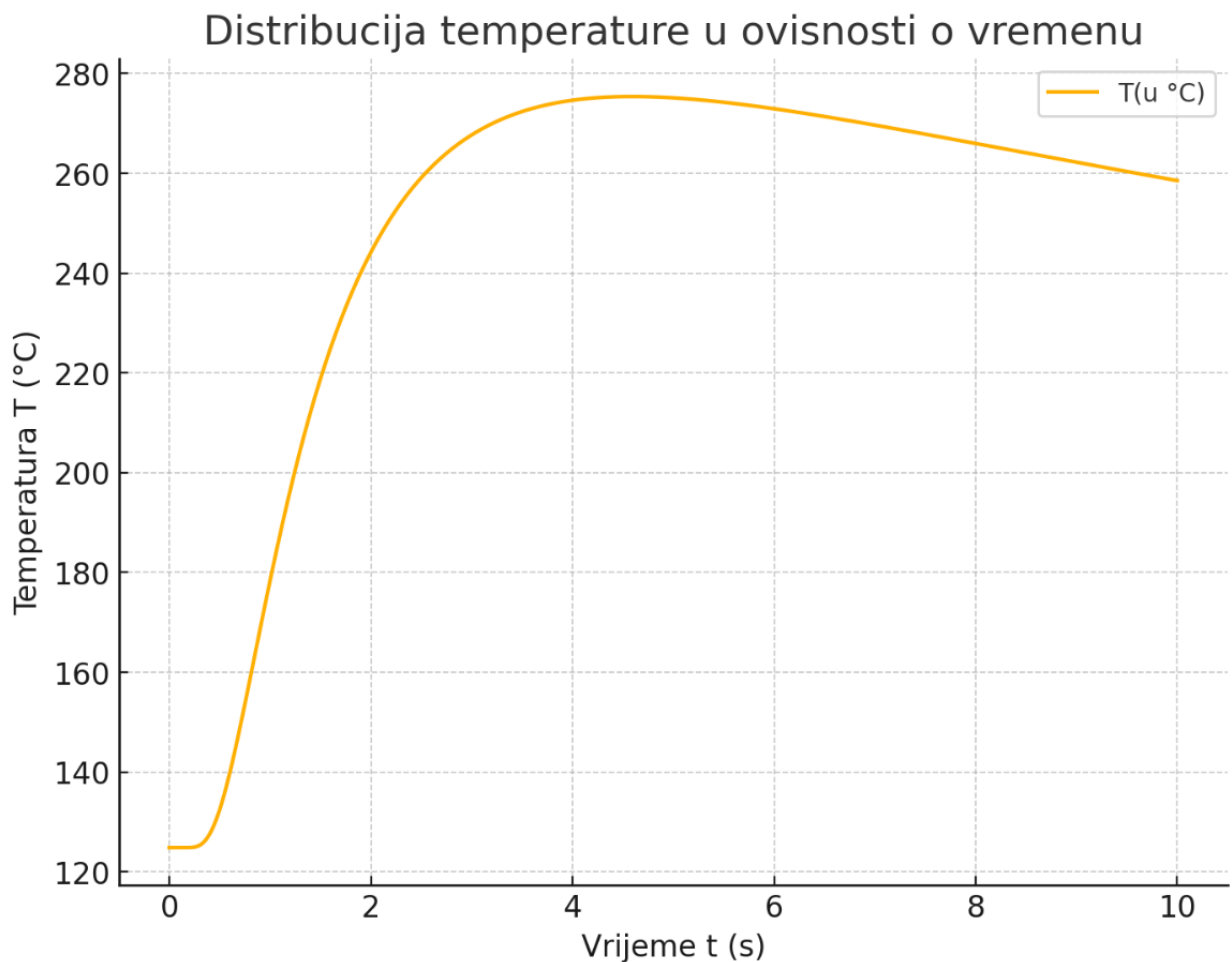
$$q = U \cdot I \cdot \eta = 14.8 \cdot 120 \cdot 0.8442$$
$$q = 1418 \text{ W}$$

Nakon toga se odredio toplinski ciklus u dvjema točkama bakrene ploče (a x b) koja se protaljuje, slika(30.) niže. Kasnije će se isti taj postupak provjeriti eksperimentalno i to na dvjema pločama različitih dimenzija. Točke se nalaze na istom pravcu udaljene 3 cm od mjesta protaljivanja. Toplinski ciklus predstavlja temperaturnu funkciju u ovisnosti o vremenu u nekoj točki.



Slika 30 bakrena ploča za zavarivanje.

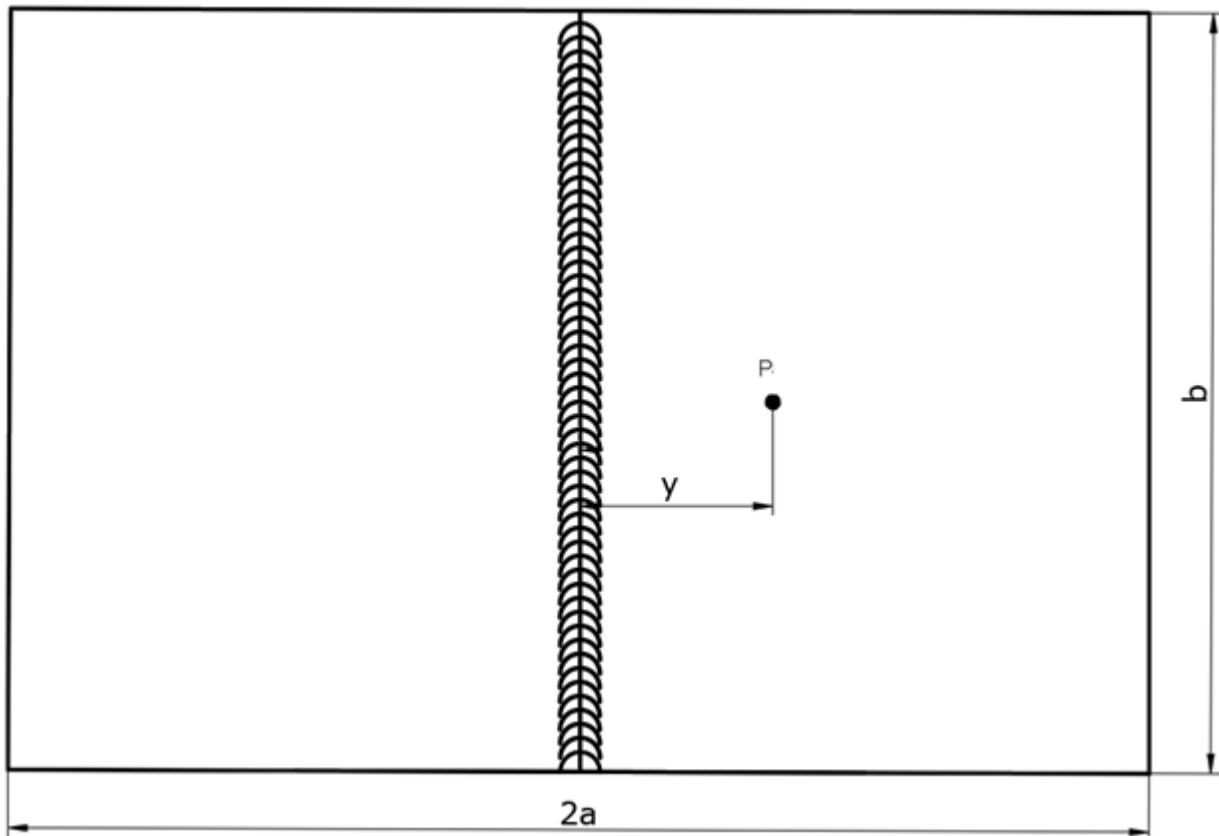
Graf funkcije temperature u ovisnosti o vremenu za mjernu točki izgleda ovako:



Slika 31 Graf temperaturne distribucije za ploču dimenzija 190 mm x 75 mm.

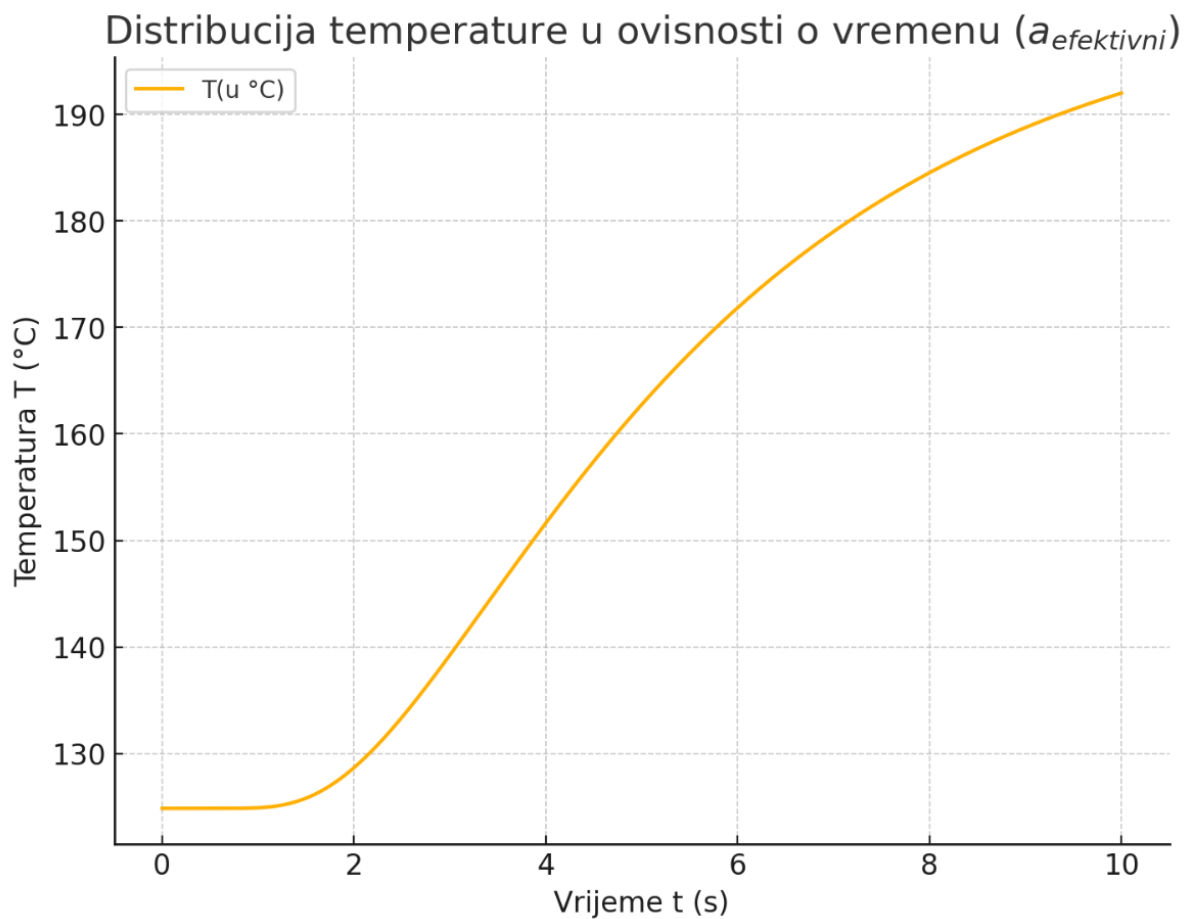
Potrebno je napomenuti da je analiza u egzaktnom smislu napravljena samo za jednu točku za razliku od eksperimenta, zato što u samoj jednadžbi nema varijable koja bi uključivala razliku u temperaturnoj distribuciji za neku udaljeniju točku po dužini. Sa grafa se može vidjeti trend temperature kako se elektroda približava odnosno kako se udaljava od mjesta mjerenja. Kako se elektroda približava, temperatura raste po eksponencijalnoj krivulji dok se udaljava onda pada približno po krivulji korijena. Maksimalna postiziva temperatura u tom slučaju iznosi $T_{\max}=275,4$ °C.

Niže je razmotreno kako će se temperatura raspodijeliti na duplo široj ploči od istog materijala prilikom protaljivanja istom metodom s istim parametrima, osim toplinske difuzivnosti.



Slika 32 Bakrena ploča dimenzija $2a \times b$.

S obzirom na to da su sva dostupna analitička rješenja prilikom rješavanja toplinske jednadžbe pretpostavljala ploču beskonačnih dimenzija, u samim rješenjima ne postoji varijabla koja predstavlja širinu ploče. Iz eksperimentalnih iskustava poznato je da se toplina „više“ raširi u tijelima većeg volumena. Stoga se očekuje da će kod šire ploče na istim točkama, udaljenima od mjesta zavarivanja, temperatura biti niža, jer se unesena toplina morala rasporediti, odnosno zagrijati veću količinu materijala. Kako bi se riješio ovaj problem, umjesto konstante difuzivnosti uvodi se efektivna konstanta difuzivnosti $\alpha_{\text{efektivno}}$ koja će uzeti u obzir dimenzije same ploče, tako da će šira ploča efektivno imati veću konstantu difuzivnosti. Kako bi se odredila efektivna konstanta difuzivnosti, upotrebljava se pojednostavljeni model u kojem manja ploča ima toliko puta manju difuzivnost koliko joj je puta manji volumen. Pa efektivna difuzivnost postaje upola manja.



Slika 33 Graf temperaturne distribucije za ploču dimenzija 190 mm x 150 mm.

Maksimalna temperatura u oba slučaja iznosi:

- S koeficijentom difuzivnosti a : $T=275,40\text{ }^{\circ}\text{C}$
- S koeficijentom difuzivnosti $a/2$: $T=191,99\text{ }^{\circ}\text{C}$

Kasnije su izračunate distribucije temepratura pomoću simulacija te su dodatno provjerene eksperimentom.

5.5.2. Trenutni planarni izvor s uključenim gubitcima

Pretpostavke ovog modela su sljedeće:[7]

- Toplinski tok je konstantan.
- Toplinski izvor je planarni i konstantan duž ploče.
- Gubici topline kroz površinu ploče kroz konvekciju i radijaciju se izračunavaju preko faktora disipacije, b .
- Konvekcija u zoni taljenja je zanemariva.
- Fizikalne veličine materijala se ne mijenjaju s temperaturom i vremenom.
- Latentna toplina taljenja je zanemariva.

Jednadžba koja opisuje takvu distribuciju temperature je:

$$T(y_0, t) - T_0 = \frac{q/(v \cdot \delta)}{c \cdot \rho \cdot (4 \cdot \pi \cdot a \cdot t)^{1/2}} \cdot \exp\left(-\frac{y_0^2}{4at} - bt\right) \quad (5.26)$$

Veličina b predstavlja disipaciju topline kroz gornji i donji dio ploče. Izračunava se prema izrazu:

$$b = \frac{2\alpha}{c \cdot \rho \cdot h} \quad (5.27)$$

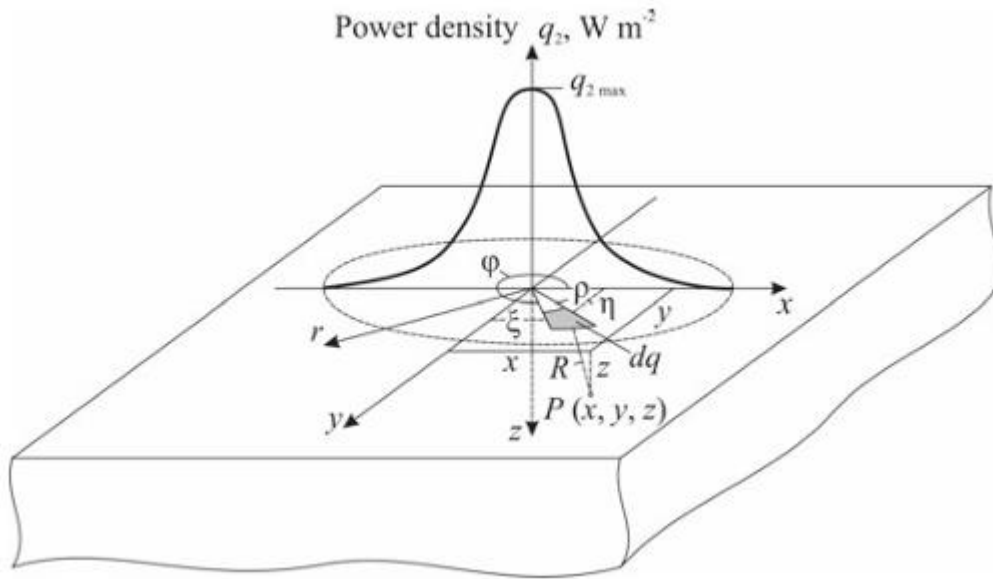
Gdje su:

- α – koeficijent izmjene topline, [W/m²·K]
- c – specifični toplinski kapacitet, [J/kg·K]
- ρ – gustoća materijala, [kg/m³]
- δ – debljina ploče, [m]

Dakle, faktor b povećava brzinu smanjivanja eksponencijalne funkcije temperature, što za posljedicu daje niže temperature na ploči zavarivanja. Predstavljeni model jednadžbe razlikuje se od prethodnog modela samo za faktor disipacije, b .

5.5.3. Normalno distribuirani (Gaussov) toplinski izvor na tankoj ploči

Analizira se kružni disk izvor energije Q koji ima normalnu distribuciju i koncentracijski faktor C . Ovaj izvor se primjenjuje u trenutku ($t = 0$) na ravninu ($z = 0$), ravne tanke ploče, kao što je prikazano na donjoj slici (30). Da bi se opisao izvor, korišten je koordinatni sustav (ζ, η) , pri čemu se središte koordinatnog sustava podudara sa središtem izvora. Radijalna distribucija gustoće energije dana je jednačinom: [7]



Slika 34 Model za zagrijavanje beskonačne tanke ploče normalnim kružnim izvorom topline [7].

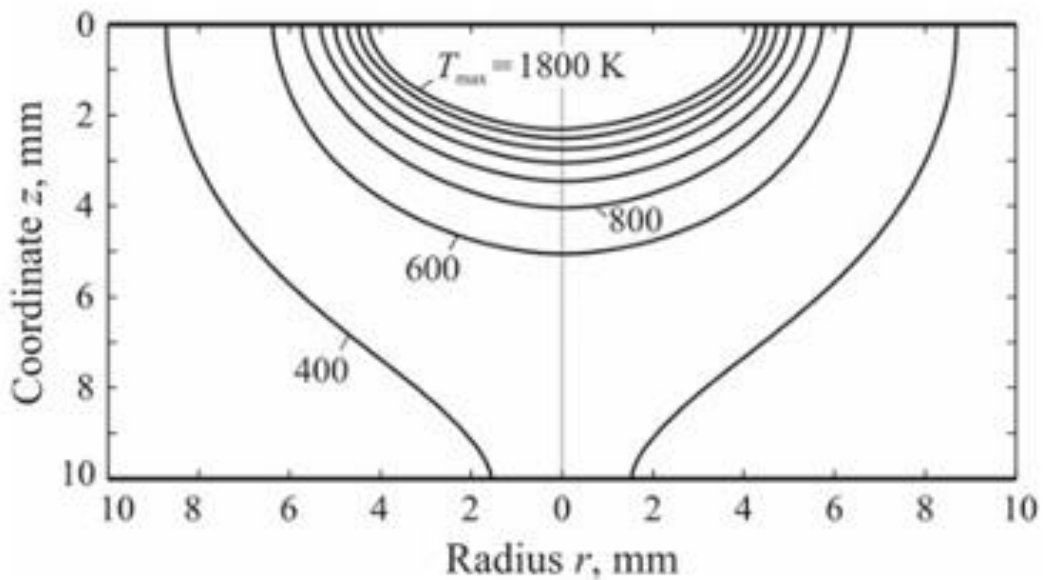
$$Q_2(\rho) = Q_{2\max} \exp(-C\rho^2) = \frac{C}{\pi} \cdot Q \cdot \exp(-C\rho^2) \quad (5.28)$$

Kada se podjeli izvor na beskonačno mali broj konačnih izvora i prointegrira u granicama integracije oblike izvora, dolazi se do jednačine za temperaturnu distribuciju na beskonačnoj ploči prilikom zagrijavanja izvora koji ima oblik normalne 3D Gaussove krivulje. Temperaturna distribucija prikazana je donjom jednačinom: [7]

$$T(r, t) - T_0 = \frac{Q/h}{4\pi\lambda(t + t_0)} \exp\left(-\frac{r^2}{4a(t + t_0)} - bt\right) \quad (5.29)$$

$$\text{gdje je: } t_0 = \frac{1}{4ac} \quad (5.30)$$

Na sljedećoj slici može se vidjeti primjer distribucije temperature na ploči sa modeliranim normalnim 3D izvorom.



Slika 35 Temperaturno polje na beskonačnoj ravnoj ploči prilikom zagrijavanja modeliranim 3D normalnim izvorom sa vrijednostima: $Q=2000$ J, $C=0.1$ mm², $T_0=300$ K, $a=8$ mm²/s, $c\rho=0.005$ J/mm³·K [7].

Ako bi se koristio eliptični izvor opisan ranije, tzv. Goldakov izvor zagrijavanja, temperaturna distribucija izgledala bi ovako:[7]

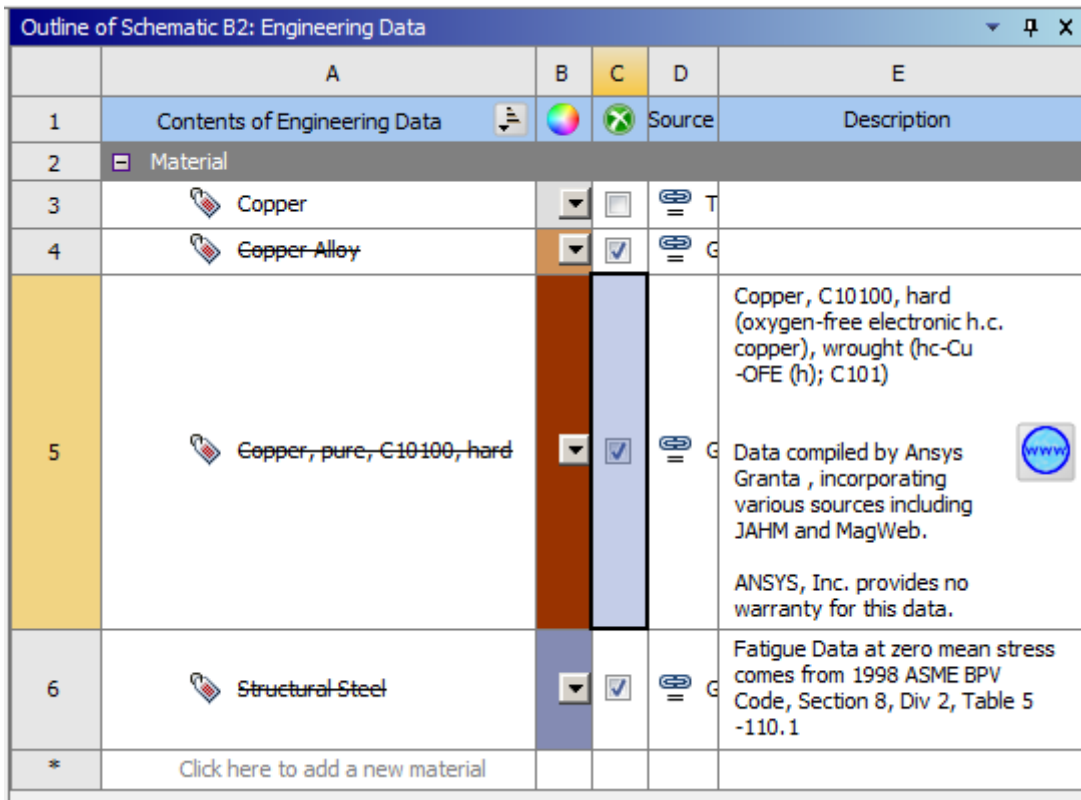
$$T(x, y, t) - T_0 = \frac{Q/h}{4\pi\lambda\sqrt{(t + t_{0x})(t + t_{0y})}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a(t + t_{0x})} - \frac{y^2}{4a(t + t_{0y})} - bt\right) \quad (5.31)$$

gdje su parametri izvora dani:

$$t_{0x} = \frac{1}{4aC_x} \quad \text{i} \quad t_{0y} = \frac{1}{4aC_y} \quad (5.32)$$

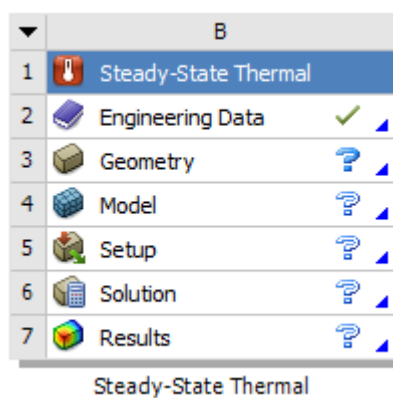
6. ANSYS simulacija

Odrađena je simulacija protaljivanja ETP bakrenih ploča u programu ANSYS. Na početku same simulacije odredili su se početni i rubni uvjeti koji su se ugradili u samu simulaciju. Na sljedećoj slici prikazan je odabir materijala ploče ispitivanja, odnosno ETP bakar- C11000.



Slika 36 odabir materijala ploče protaljivanja..

Odabran je modul analize u programu pod nazivom 'Steady state thermal', koji je predviđeni za termodinamičke analize.



Slika 37 modul za analizu termodinamike zavarivanja.

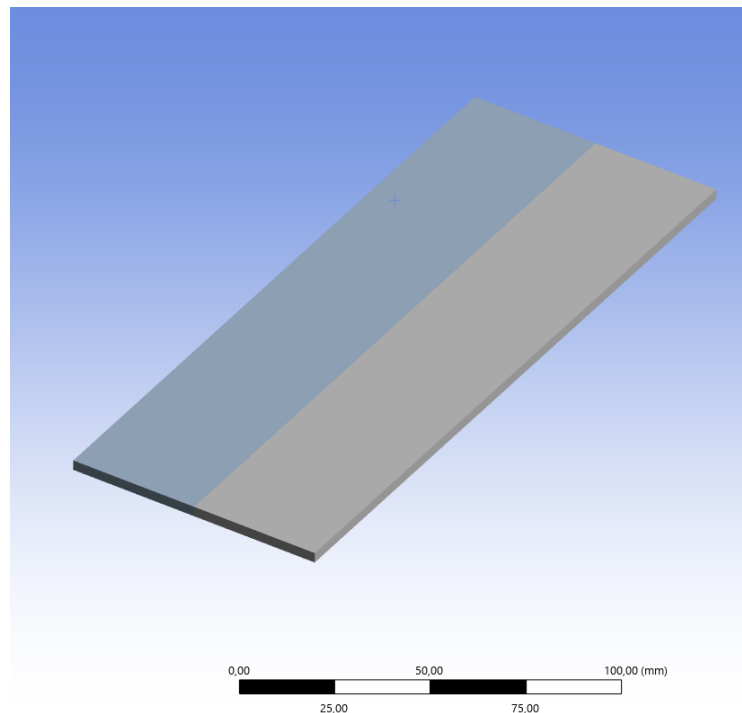
ANSYS koristi metodu konačnih elemenata (FEM - Finite Element Method) za rješavanje termodinamičkih procesa u okviru svojih analiza, uključujući steady state thermal analizu. U ovom kontekstu, metoda konačnih elemenata omogućava podjelu složenih geometrija na manje, diskretne elemente (npr. trokuti ili kvadrati u 2D, odnosno tetraedri ili heksaedri u 3D), pri čemu se za svaki element rješavaju osnovne jednačbe koje opisuju prijenos topline. U slučaju „steady state thermal“ analize, ANSYS rješava Fourierovu jednačbu prijenosa topline:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + Q = 0 \quad [6.1]$$

gdje je:

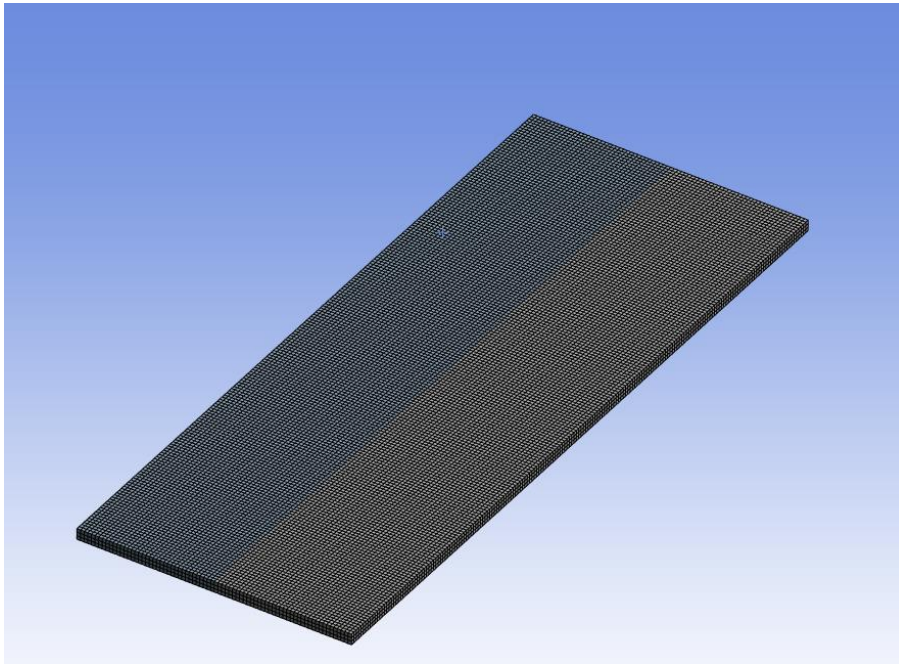
- T temperatura,
- k toplinska vodljivost,
- Q unutarnji izvori topline (ako postoje).

Ova metoda omogućava rješavanje prijenosa topline putem različitih mehanizama kao što su kondukcija, konvekcija i zračenje (radijacija). Za svaki element, ANSYS sastavlja sustav linearnih jednačbi koje se zatim rješavaju numerički kako bi se dobila raspodjela temperature u sustavu u stacionarnom stanju, tj. kada se uvjeti prijenosa topline više ne mijenjaju s vremenom. U samom modulu odabrao se program za crtanje geometrije u kojem su nacrtane ploče, slika(36):



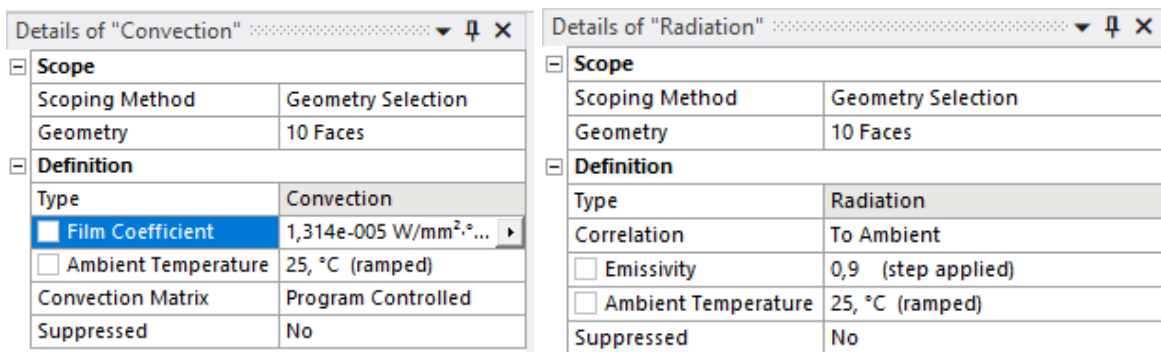
Slika 38 dizajn ploča zavarivanja.

U modulu se nakon toga iz zadanog modela stvorila mreža od manjih dijelova kao na slici ispod da bi se analizirala termodinamika procesa zavarivanja, metodom konačnih elemenata. Konačni elementi su oblika kvadra dok je njihov broj $n= 18989$.



Slika 39 stvaranje mreže konačnih elemenata.

Postavljeni su početni uvjeti simulacije kao što je ambijentalna temperatura $T_{amb}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Također su primijenjeni uvjeti disipacije topline u vidu zračenja i konvekcije na svaki dio površine ploče, prikazano na slici niže.



Slika 40 uvjeti toplinske analize, konvekcija(lijevo) i zračenje(desno).

Konačno je u simulaciju primijenjen pokretni izvor topline koji predstavlja volframovu elektrodu sa zadanim parametrima, na slici niže:

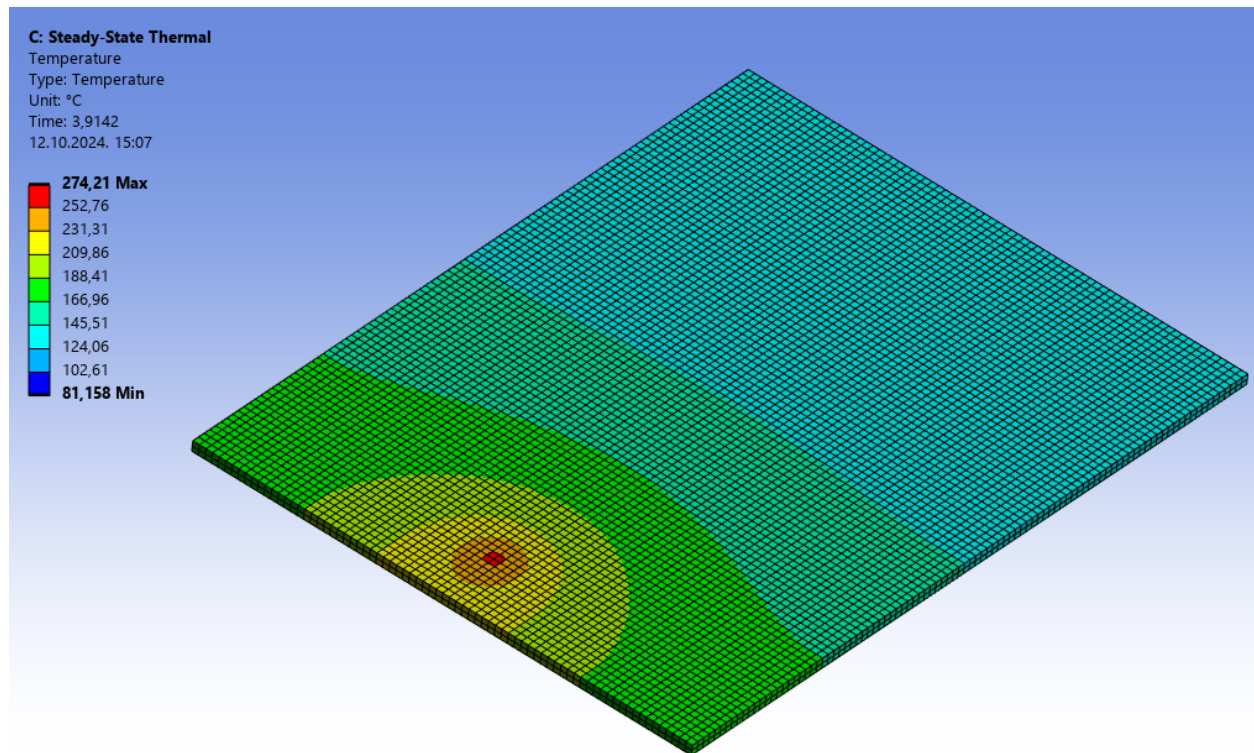
Details of "Moving Heat Flux" ▾ ⌵ ✕	
[-] Geometry	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
[-] Path	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Edge
[-] Start Point	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Vertex
[-] Definition	
Index	1
First Patch?	Yes
Last Patch?	Yes
Velocity	5 mm/s
Radius of the Beam	5 mm
Source Power Intensity	2,5 W/mm ²
Start Time	0 s
End Time	36 s
Number of Segments	200
Minimum Steps for Cooling Phase	20
Material Removal	No
Melting Temperature	800 °C

Slika 41 parametri pokretnog izvora topline protaljivanja.

Pri postavljanju podataka pokretnog izvora topline odabran je put kojim će se izvor gibati, brzina gibanja, radijus kruga u kojem se dovodi toplina te intenzitet samog izvora. Također je određeno prema parametrima vrijeme trajanja protaljivanja bakrenih ploča. Intenzitet izvora se izračunao kao omjer snage izvora, uključujući i gubitke te površine (sfere) u koju se propagira energija. U simulacijama su se analizirale obje ploče protaljivanja.

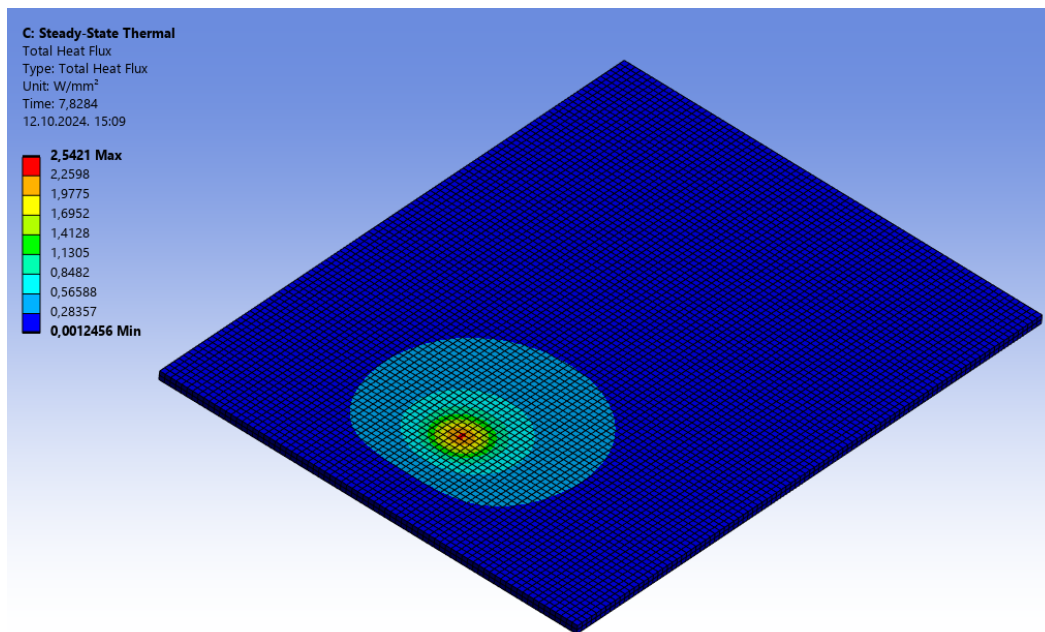
6.1. Rezultati analize simulacije ploče (195 mm x 150 mm)

Nakon postavljanja rubnih i početnih uvjeta simulirao se eksperiment. Na sljedećoj slici niže prikazana je distribucija temperature u nekom trenutku u početku protaljivanja.



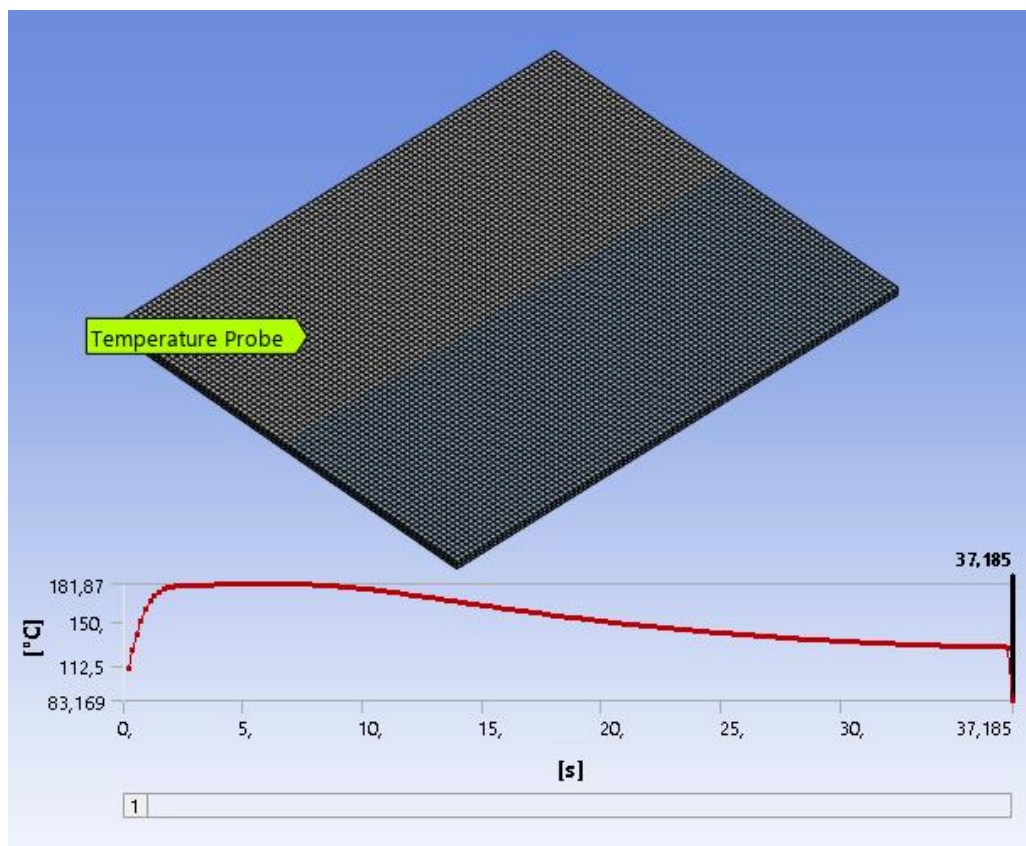
Slika 42 Temperaturna distribucija na ploči protaljivanja dimenzija 195 mm x 150 mm.

Maksimalna izmjerena temperatura bila je približno 274 °C i to središtu protaljivanja dok je najmanja izmjerena na rubovima ploče što je i očekivano. Također je napravljena analiza temperaturne distribucije u dvjema točkama T_1 i T_3 kao na slici (42.) niže. Za razliku od eksperimenta gdje su bile četiri temperaturne točke mjerenja u simulaciji se zbog simetrije samog zadatka nisu mjerile simetrične točke jer je analiza pokazala da su temperature identične u svakom trenutku. Također se analizirao toplinski tok s ploča što je prikazano na slici (41.). Maksimalna vrijednost toplinskog toga je 2,54 W/mm² što zapravo predstavlja izvor koji zagrijava ploču.



Slika 43 Toplinski tok na ploči protaljivanja dimenzija 195 mm x 150 mm.

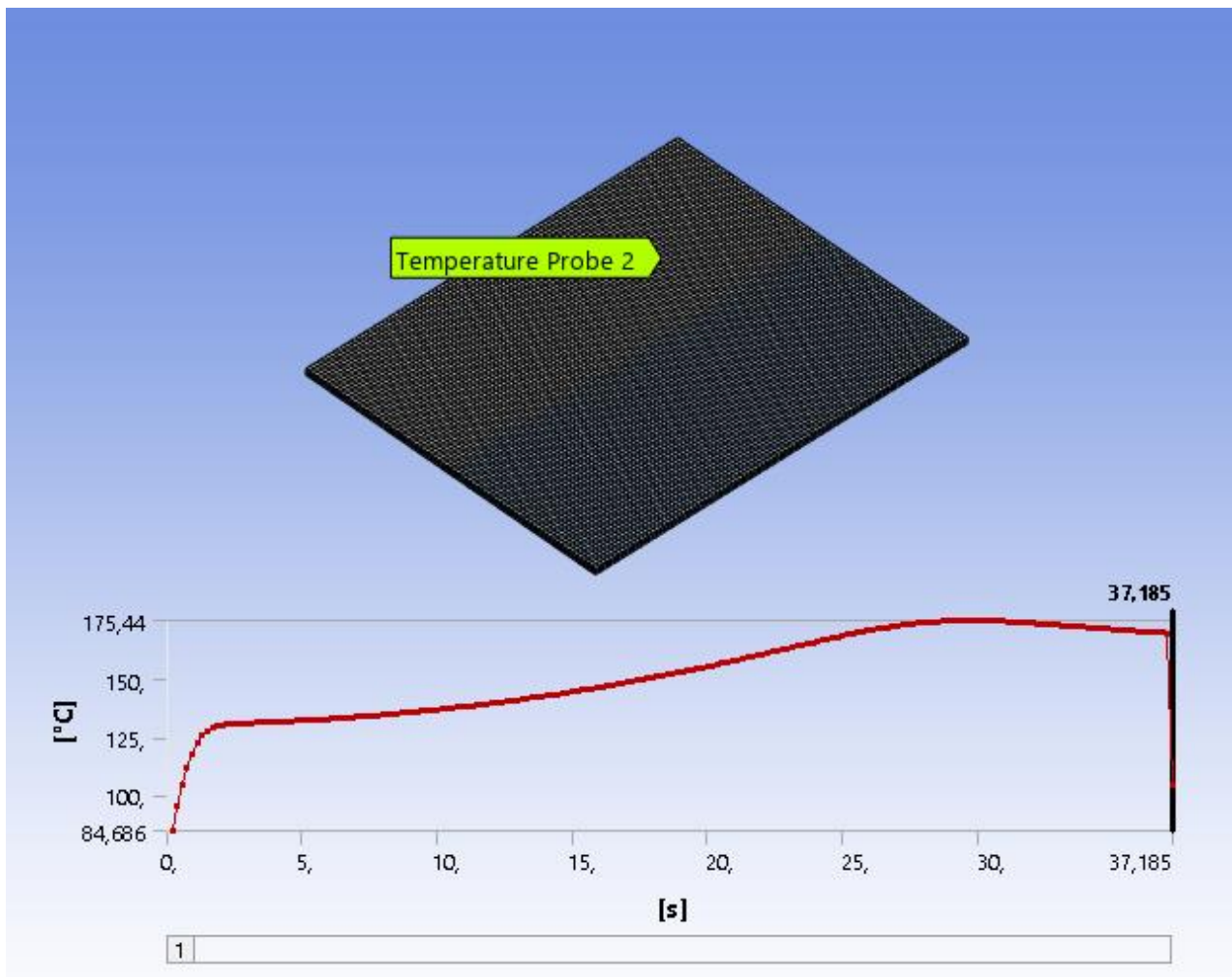
Na ploču su postavljene dvije temperaturne sonde koje su izmjerile distribuciju temperature u ovisnosti o vremenu. Prvi termopar odnosno temperaturna sonda je smještena na koordinatama (-30 mm, 0 mm, 40 mm). Distribucija temperature prikazana je na sljedećem grafu:



Slika 44 Temperaturna distribucija na ploči(195 mm x 150 mm) u ovisnosti o vremenu u temperaturnoj sondi T_1 .

Maksimalna temperatura u toj točki izmjerena je $T_1=181,87\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tijekom procesa protaljivanja dolazi do naglog porasta temperature, što se može vidjeti u početnom dijelu grafa. Maksimalna temperatura dosegnuta na toj udaljenosti iznosi približno $181,87^{\circ}\text{C}$. Nakon dostizanja maksimalne vrijednosti, temperatura počinje postupno opadati, što ukazuje na završetak intenzivnog zagrijavanja i početak faze hlađenja.

Na sljedećoj slici je prikazan drugi termopar iste ploče udaljen za 100 mm od prvog termopara ali na istoj udaljenosti od mjesta protaljivanja (30 mm).

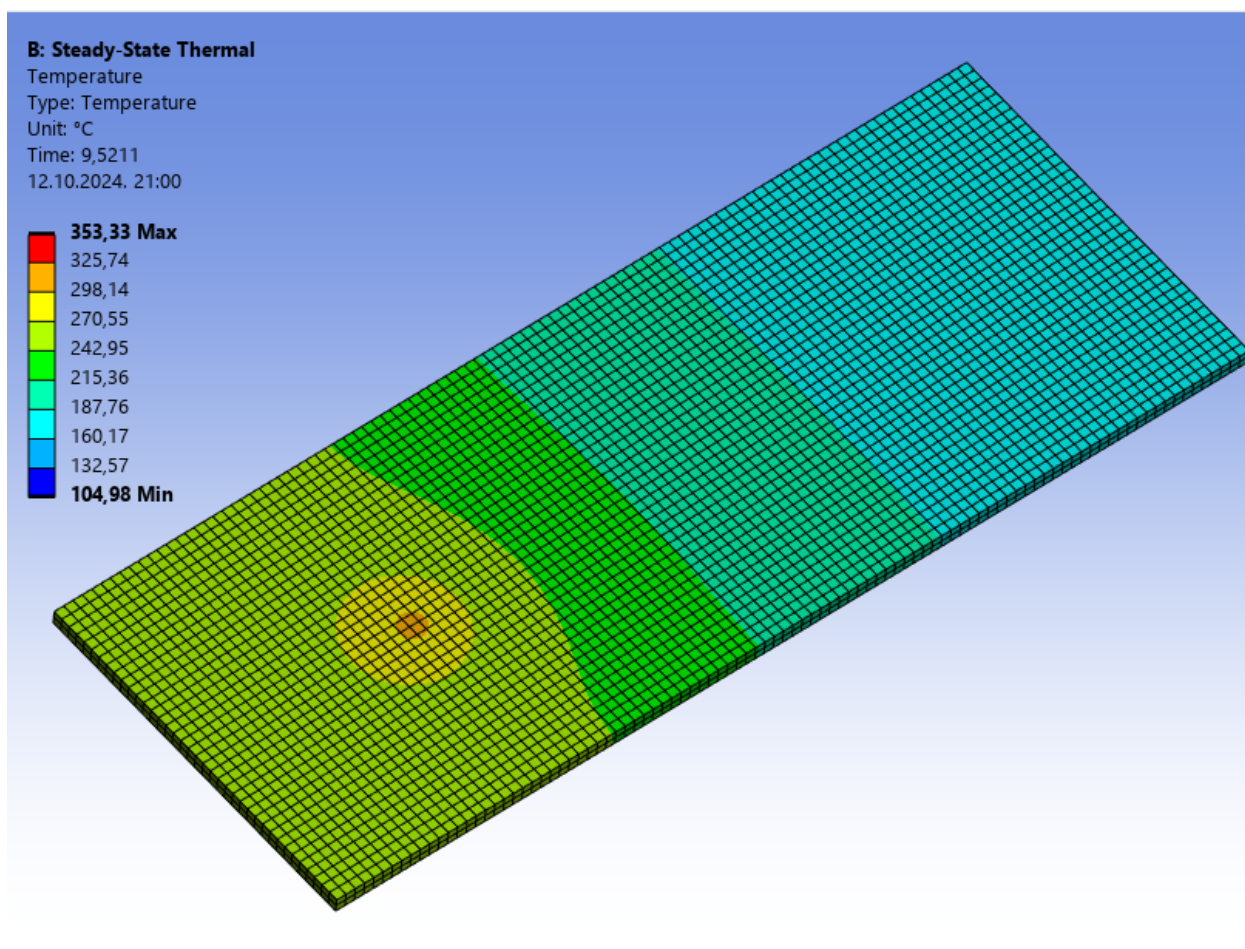


Slika 45 Temperaturna distribucija na ploči (195 mm x 150 mm) u ovisnosti o vremenu u temperaturnoj sondi T_3 .

Maksimalna temperatura u toj točki izmjerena je $T_1=175,87\text{ }^{\circ}\text{C}$. Iz grafa je vidljivo da se sonda 3 sporije zagrijava od sonde 1 što je očekivano pošto je sonda 3 udaljenija od mjesta protaljivanja.

6.2. Rezultati analize simulacije ploče (195 mm x 75 mm)

Na sljedećoj slici niže prikazana je distribucija temperature u nekom trenutku u početku protaljivanja.

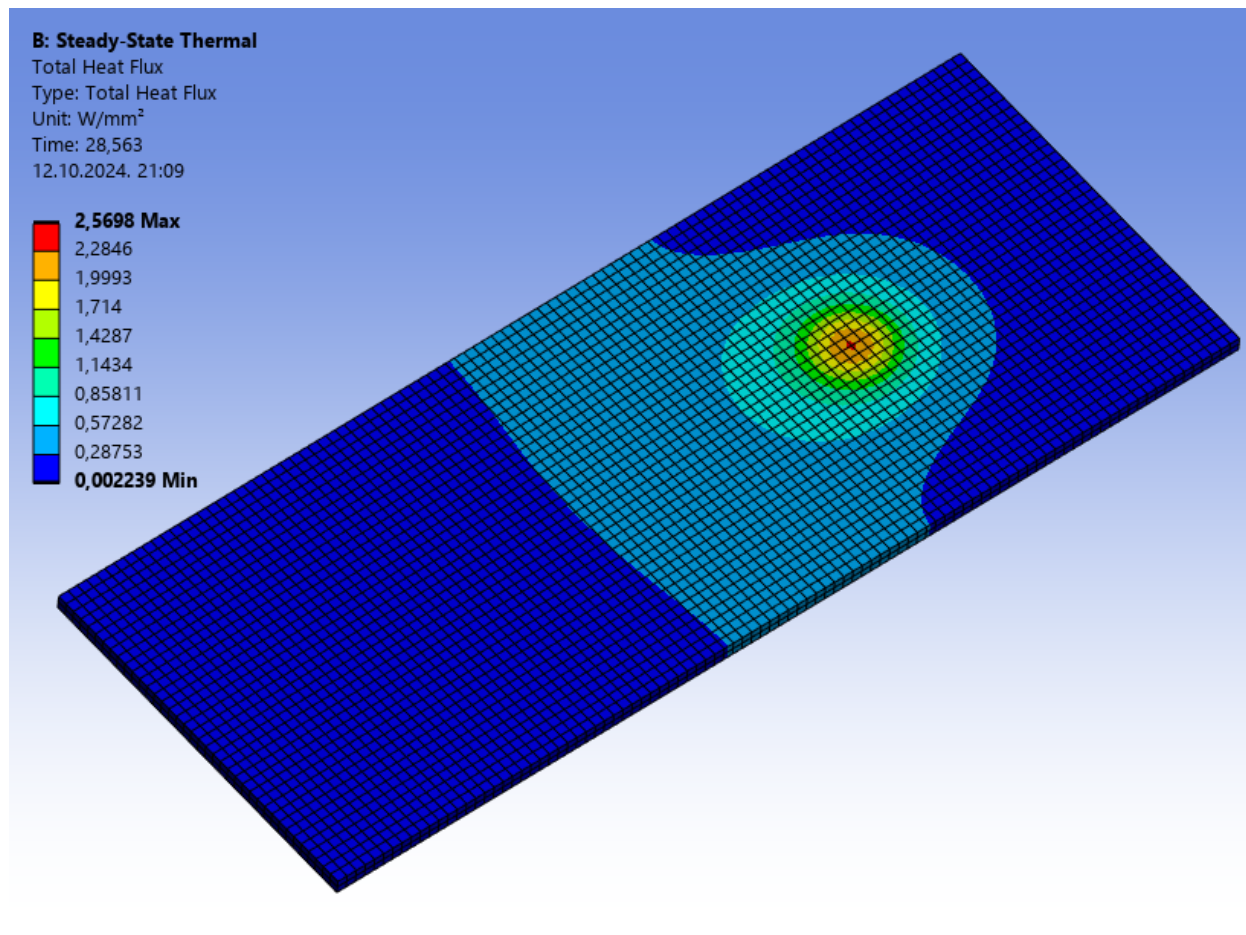


Slika 46 Temperaturna distribucija na ploči protaljivanja dimenzije 195 mm x 75 mm.

Za razliku od ploče većih dimenzija, na manjoj ploči je očekivano postignuta veća temperatura. Veći temperaturni maksimum na manjoj ploči može se objasniti kroz nekoliko specifičnih fizikalnih čimbenika. Prvo, toplinska vodljivost i prijenos ostaju isti ako je materijal ploče jednak. Međutim, zbog manje površine manje ploče, toplinska energija se koncentrira na manjem području. Veća ploča ima veću površinu pa su gubitci zbog konvekcije i radijacije veći s obzirom da su proporcionalni s veličinom površine. Na većoj ploči, toplina se lakše raspršuje prema rubovima, što rezultira nižim maksimalnim temperaturama. Također, manji volumen materijala kod manje ploče akumulira toplinsku energiju brže, što dovodi do bržeg lokalnog zagrijavanja.

Nasuprot tome, veća ploča ima veći volumen materijala, što omogućuje bolju raspodjelu topline i smanjuje vršnu temperaturu.

Kod veće ploče, toplina se prenosi na veće udaljenosti i raspršuje kroz šire područje, dok kod manje ploče toplina ostaje koncentrirana u užem području, što rezultira višim temperaturama u lokaliziranom području. Dinamiku toplinskog toga prikazan je na slici 47 niže:



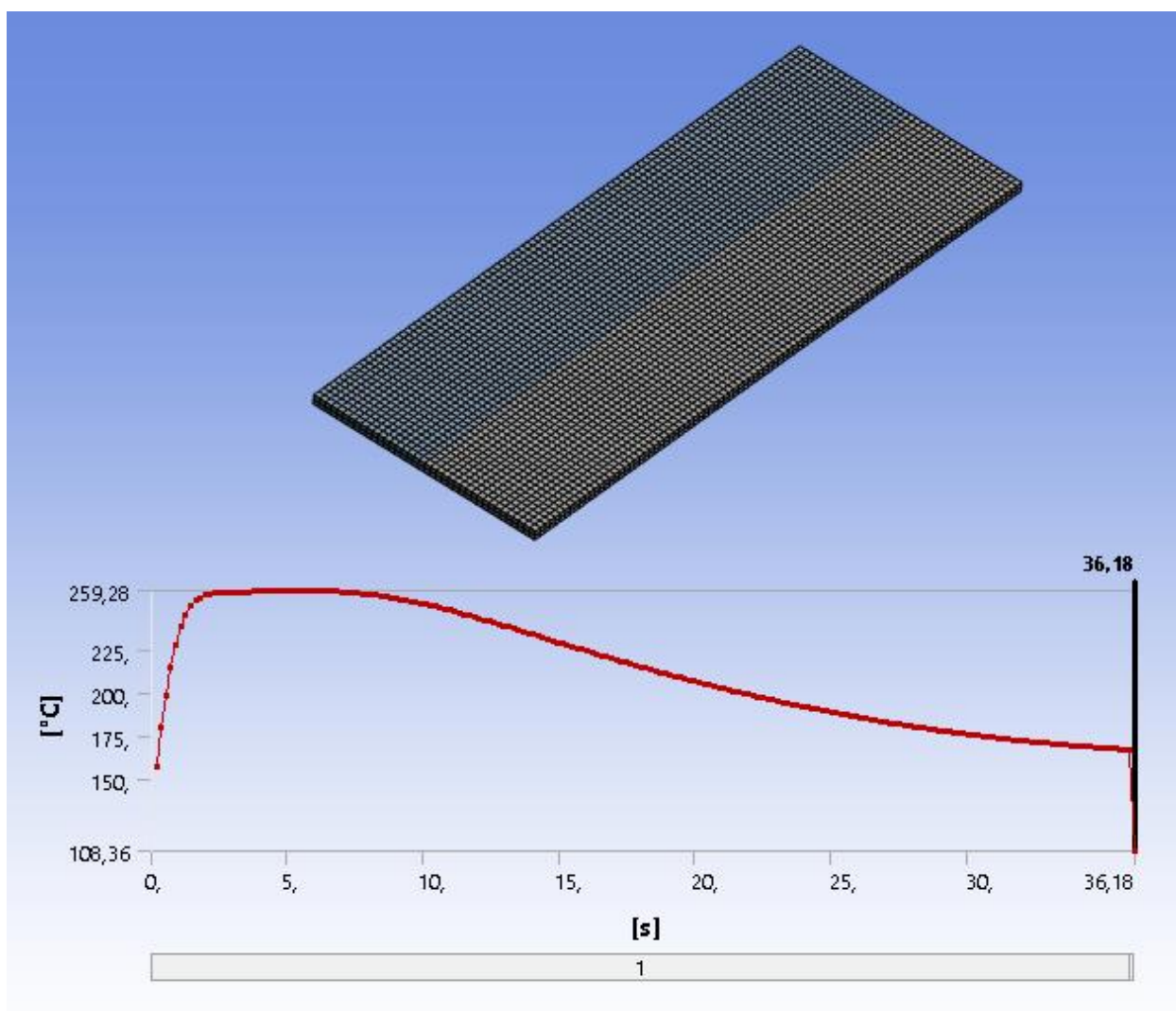
Slika 47 Toplinski tok na ploči (195 mm x 75 mm) protaljivanja.

Na temelju prikaza distribucije toplinskog toka na ploči, može se zaključiti sljedeće:

1. **Najveći toplinski tok:** Najveća vrijednost toplinskog toka nalazi se u području gdje je ploča najviše zagrijana, što je u skladu s očekivanjima, budući da se toplina najviše prenosi iz regije s najvišom temperaturom. Ova zona je jasno prikazana crvenom bojom, s maksimalnom vrijednošću toplinskog toka od 2,5698 W/mm².
2. **Distribucija toka:** Toplinski tok se progresivno smanjuje kako se udaljavamo od središta izvora topline, što je normalno jer se toplina širi kroz materijal prema hladnijim područjima. Tok je najniži na rubovima ploče, gdje vrijednosti padaju na minimalne razine (0,002239 W/mm²), što znači da rubovi ploče ne prenose značajnu količinu topline.

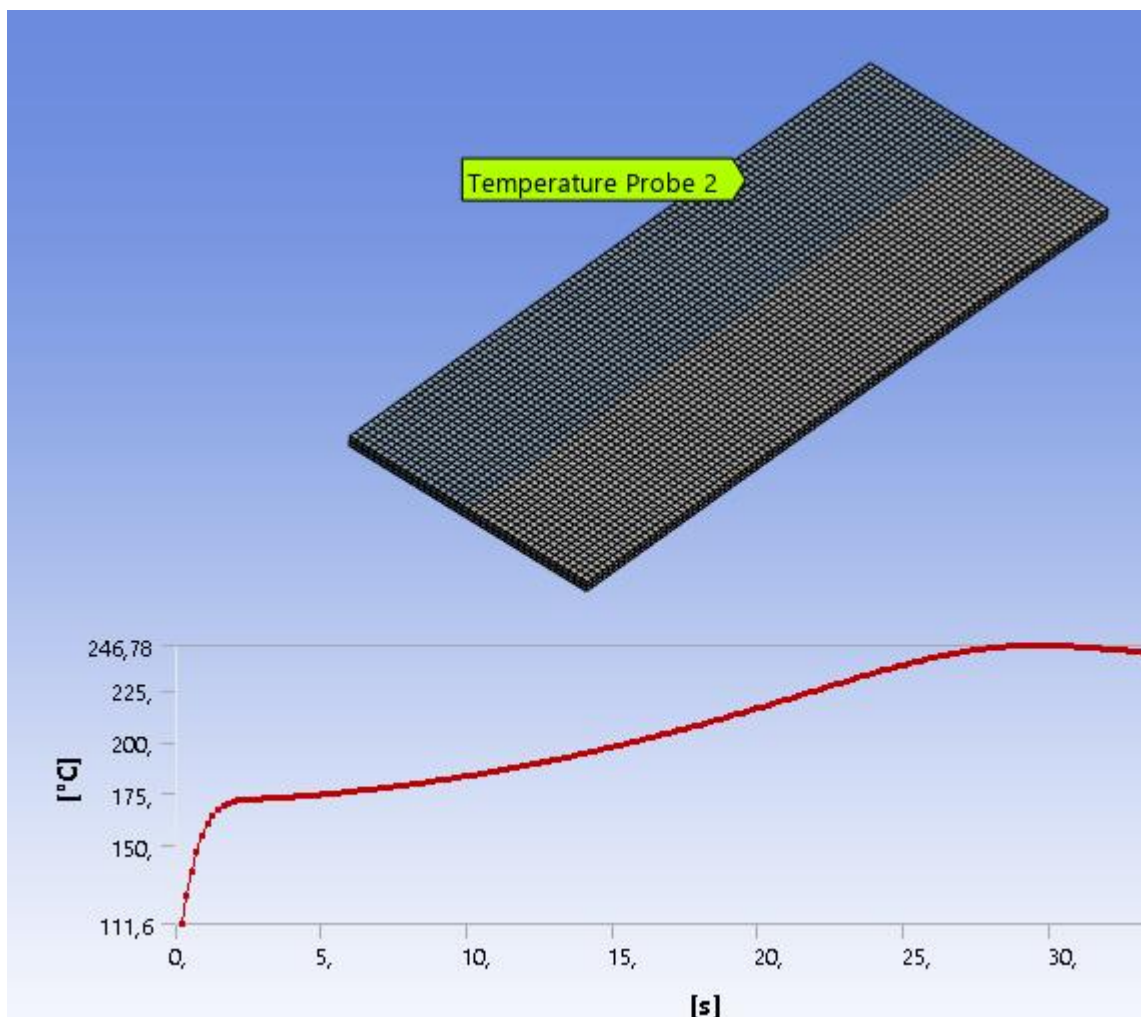
3. **Toplinski tok slijedi temperaturu:** Karta toplinskog toka korelira s kartom distribucije temperature. Toplina se prirodno kreće od toplijih prema hladnijim dijelovima ploče. Ploča na taj način disipira energiju prema rubovima, pri čemu tok slabi što je udaljeniji od zagrijanog središta.
4. **Koncentracija toka:** Uočljiva je koncentracija toplinskog toka u uskom području oko izvora topline, što sugerira da se energija ne raspodjeljuje ravnomjerno po ploči, već je najviše lokalizirana blizu izvora. Ovakav obrazac odgovara pokretnom izvoru topline koji uzrokuje intenzivno lokalno zagrijavanje.

Na ploču su postavljene dvije temperaturene sonde koje su izmjerile distribuciju temperature u ovisnosti o vremenu. Prvi termopar odnosno temperaturena sonda je smještena na koordinatama (-30 mm, 3 mm, 40 mm). Distribucija temperature prikazana je na sljedećem grafu:



Slika 48 Temperaturna distribucija na ploči dimenzija (195 mm x 75 mm) u ovisnosti o vremenu u temperaturnoj sondi T_1 .

Graf pokazuje brzo zagrijavanje do 259°C, nakon čega slijedi postepeno hlađenje. Hlađenje je sporije, što ukazuje na postupnu disipaciju topline. To potvrđuje očekivano ponašanje materijala pri zagrijavanju i hlađenju. Na sljedećoj slici možemo vidjeti funkciju temperature o vremenu za termopar T₃.



Slika 49 50 Temperaturna distribucija na ploči dimenzija (195 mm x 75 mm) u ovisnosti o vremenu u temperaturnoj sondi T₃.

Na temelju rezultata druge temperature sonde, uočava se postupno povećanje temperature koje doseže vršnu vrijednost od 246,78°C. Tijekom prvih nekoliko sekundi dolazi do brzog inicijalnog zagrijavanja, nakon čega slijedi sporiji, stabilniji porast temperature. Budući da je izvor topline pokretan, temperatura kod druge sonde nije dostigla maksimalne vrijednosti kao kod prve sonde, što je uzrokovano kraćim vremenskim intervalom u kojem je područje oko sonde bilo izloženo izravnom utjecaju izvora topline. Također, kako se izvor pomicao dalje od sonde, zagrijavanje je bilo slabije zbog disipacije topline i udaljenosti od glavne zone zagrijavanja. Rezultati jasno ilustriraju učinak pokretnog izvora topline i udaljenosti na distribuciju temperature po materijalu.

6.3. Zaključak simulacije

Na temelju provedenih simulacija na dvjema pločama, gdje je mjerenje temperature provedeno na jednakim mjestima od mjesta protaljivanja, došlo se do nekoliko zaključaka:

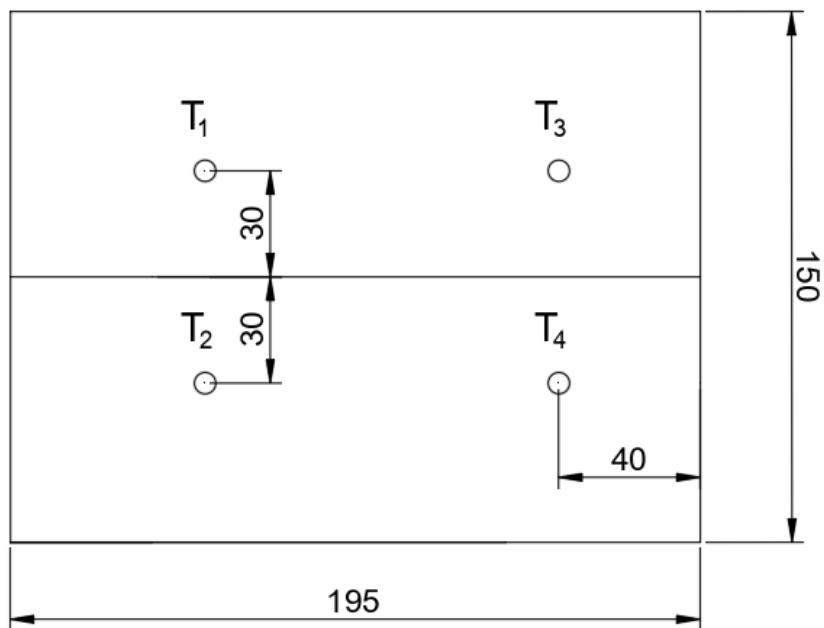
- Distribucija temperature: Zabilježeno je da su maksimalne temperature bile različite ovisno o udaljenosti sonde od izvora topline, unatoč tome što je izvor prošao preko obje ploče pod istim uvjetima. Senzori bliže izvoru topline postigli su više temperature u kraćem vremenu, dok su udaljeniji senzori zabilježili niže vršne temperature zbog smanjenja intenziteta toplinskog toka.
- Utjecaj veličine ploče: Manja ploča pokazala je veće lokalne vršne temperature, dok je veća ploča imala ravnomjerniju distribuciju topline, što je povezano s većom sposobnošću veće ploče da disipira toplinu. Na manjoj ploči toplinska energija ostaje koncentriranija oko izvora, dok veća ploča omogućava šire rasipanje topline.
- Dinamika zagrijavanja i hlađenja: U obje simulacije, toplina se akumulirala brže dok je izvor prolazio pored mjernih točaka, no hlađenje je bilo sporije nakon prolaska izvora. Ovaj fenomen je uočljiv kod svih senzora, pri čemu su udaljeniji senzori pokazivali postupnije zagrijavanje i sporiji pad temperature zbog udaljenosti od glavnog izvora topline.

Ovi rezultati potvrđuju utjecaj veličine ploče i udaljenosti od pokretnog izvora na distribuciju topline i brzinu akumulacije energije.

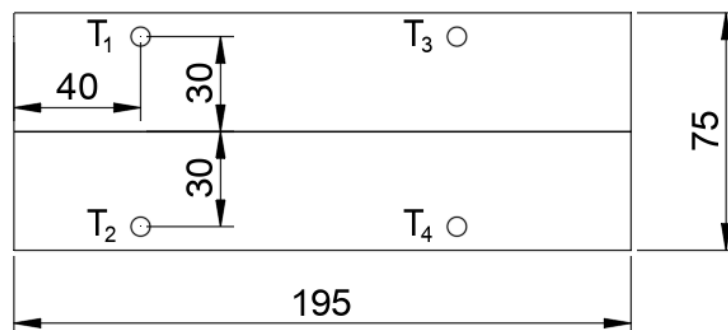
7. Eksperimentalno određivanje distribucije temperature TIG protaljivanja ETP bakrenih ploča

7.1. Opis eksperimentalnog rada

U eksperimentu se izmjerila temperatura u ovisnosti o vremenu usljed protaljivanja ETP bakrenih ploča različitih dimenzija pomoću TIG elektrode, u četiri točke na svakoj ploči kao što je to prikazano na slici niže. Temperatura se mjerila pomoću K- termoparova koji su se povezali s uređajem za precizno mjerenje temperature (Fluke 1586A Super-DAQ).



Slika 51 Eksperimentalna bakrena ploča (150 mm x 195 mm) za ispitivanje temperaturne distribucije prilikom TIG protaljivanja.



Slika 52 Eksperimentalna bakrena ploča (150 mm x 195 mm) za ispitivanje temperaturne distribucije prilikom TIG protaljivanja.

Na ispitnim pločama mogu se vidjeti pozicije (T_1 , T_2 , T_3 i T_4) koje predstavljaju mjesta na kojima su se pozicionirali termoparovi kako bi se pomoću njih, indirektno (preko razlike generiranog napona) mogla odrediti temperatura. U eksperimentu su korištene dvije ploče jednakih dužina ali različitih širina (slika 48 i 49). Termoparovi su u oba slučaja bili jednako udaljeni od pravca protaljivanja, odnosno 30 mm. Glavni cilj eksperimentalnog rada je bio utvrditi distribuciju temperature na mjestima mjerenja u ovisnosti o samoj geometriji ploče. Debljine ploča su jednakih dimenzija odnosno 3 mm. TIG elektroda odnosno pištolj zavarivanja bio je upravljan uređajem za automatizirano vođenje (PROMOTECH Rail Bull).

7.2. Materijal ploča

Materijal od kojeg su izrađene ploče u ovom eksperimentu je bakar Cu-ETP, lim debljine 3 mm. Cu-ETP je elektrolitički rafinirani bakar koji sadrži kisik. Zbog preostalog sadržaja kisika, smatra se da legura nije prikladna za zavarivanje jer je podložna osjetljivosti na vodikovu lomljivost, opisanu ranije. Ovaj materijal se primjenjuje u izradi industrijskih radijatora, električnih vodova, krovova, odvoda itd. Atest materijala potvrđuje karakteristike korištenog materijala, bakra Cu-ETP, koje su prikazane u tablici (11) niže [17]:

Tablica 10 Atest materijala ploča korištenih u eksperimentu [17]

Karakteristike	Min.	Max.	Rezultat
% Cu	99,900	-	99,900 %
Vlačna čvrstoća R_m	240,0	300,0	248,9 MPa
Istezanje A50	15,0	-	39,8 %
Granica elastičnosti	180,00	-	216,8 MPa
Električna provodljivost	57,00	-	57,1 SIM

7.3. Tehnička oprema

Oprema koja se koristila tijekom eksperimenta:

- Precizni skener temperature (Fluke 1586A Super-DAQ)
- K- termoparovi
- TIG uređaj za zavarivanje (Vartig 2005 AC/DC)
- Uređaj za automatizirano vođenje elektrode (PROMOTECH Rail Bull)

7.3.1. Precizni skener temperature: Fluke 1586A Super-DAQ

1586A Super-DAQ omogućava prikupljanje vremenski označenih, preciznih mjerenja temperature i električnih vrijednosti za tehničare, inženjere i osoblje za kontrolu kvalitete. Ova mjerenja koriste se za provjeru kontrole procesa, analizu interaktivnih sustava, osiguravanje usklađenosti s normama kvalitete ili za korelaciju povezanih događaja u istraživanju i razvoju ili otklanjanju kvarova. Podaci i statistike mjerenja mogu se pregledavati u tabličnom obliku za sve aktivne kanale. Korištenjem funkcije grafičkog prikaza, do četiri kanala (slika 44.) mogu se prikazati istovremeno, omogućujući brz pregled postavki testa i rezultata prije detaljne analize na računalu.



Slika 53 sučelje temperaturnog skenera [18].

Kada je konfiguriran s DAQ-STAQ multiplekserom, Super-DAQ postiže točnost najkvalitetnijih stolnih referentnih termometara, omogućujući kalibraciju PRT-ova, RTD-ova,

termistora ili termoparova. Efikasnost u laboratoriju može se značajno povećati kada je Super-DAQ povezan s Fluke Calibration suhom komorom ili kupkom, te se pokreću automatizirane rutine ispitivanja senzora. 1586A je idealan za brojne primjene, kao što su toplinsko mapiranje, validacija temperature, kalibracija senzora u procesu i drugo. Te se primjene koriste u raznim industrijama, uključujući farmaceutsku, biotehnološku, prehrambenu, zrakoplovnu i automobilsku industriju. 1586A Super-DAQ omogućuje očitavanje PRT-ova, termoparova i termistora uz vrhunsku preciznost:

- PRT-ovi: $\pm 0,005$ °C (uz korištenje vanjskog DAQ-STAQ multipleksera)
- Termoparovi: $\pm 0,5$ °C (uz korištenje High-Capacity modula i interne CJC funkcije)
- Termistori: $\pm 0,002$ °C

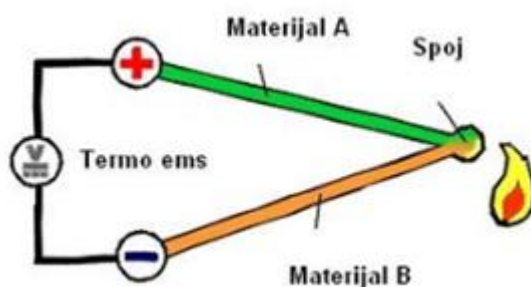


Slika 54 Precizni skener temperature (Fluke 1586A Super-DAQ) [18].

U eksperimentu su bili korišteni K termoparovi kao posrednici između ploče i uređaja. Bilo je korišteno 4 kanala na koje su se povezivali termoparovi.

7.3.2. Termometri - termoparovi

Termoparovi koriste Seebeckov efekt, pri kojem razlika u temperaturi između dva termopara rezultira stvaranjem elektromotorne sile – napona. Taj napon može se mjeriti čak i kad nema struje u strujnom krugu, što se naziva otvoreni krug. Termoparovi su osnovni alat za mjerenje temperature, gdje svaki par materijala ima određenu, fiksnu i ponovljivu vezu između napona i temperature. Ta veza omogućuje precizno mjerenje temperature na temelju promjene napona. Primjer termopara može se vidjeti na donjoj slici [19]:



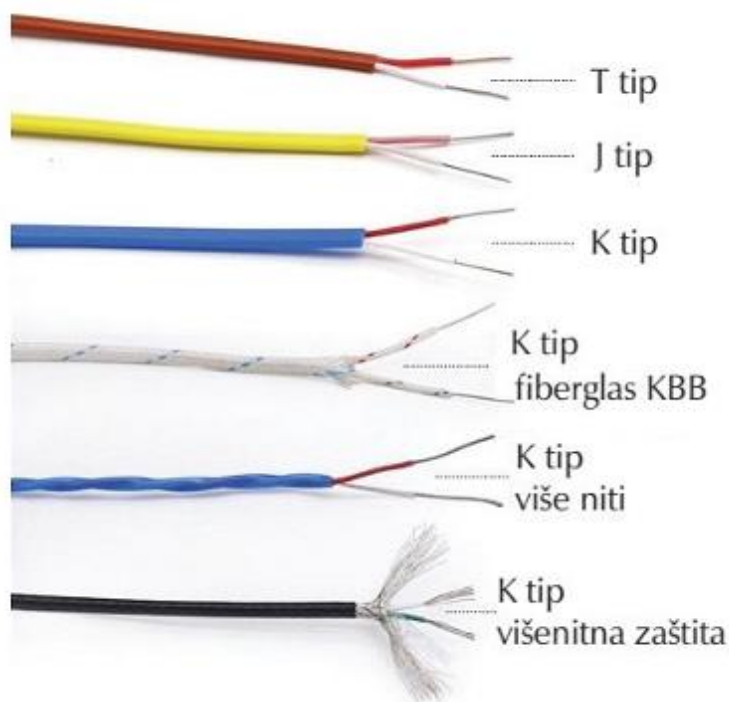
Slika 55 primjer funkcioniranja termopara [19].

Važne činjenice o termoparovima:

- Termoparovi se sastoje od dvije međusobno izolirane žice izrađene od različitih materijala.
- Krajevi žica su spojeni na vrhu, a mali napon koji se mjeri na krajevima koristi se za izračun temperature.
- Napon se ne generira na spoju žica, već na dijelu žice gdje se mijenja temperatura, a ovisi o trenutnoj temperaturi tog dijela.
- S vremenom, posebno pri visokim temperaturama, žice oksidiraju i mijenja im se struktura, zbog čega ih je potrebno zamijeniti.
- Termoparovi istog tipa, bez obzira na promjer žice (bilo 0,005 mm ili 5 mm), daju isti naponski signal. Bitan je samo sastav žica, poput T, J, K, N, R, S itd [19].

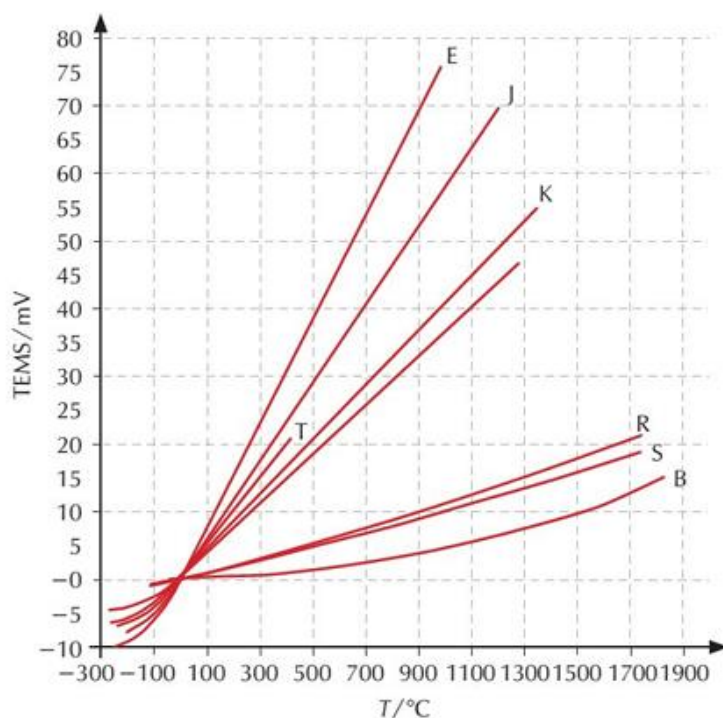
Termopar tipa K odnosi se na bilo koji temperaturni senzor koji sadrži vodiče od kroma i alumela i zadovoljava izlazne zahtjeve definirane u standardima ANSI/ASTM E230 ili IEC 60584 za termoparove tipa K. To može biti senzor za uranjanje, površinski senzor, žica ili neki drugi tip senzora ili kabela. Uobičajene oznake boja za termoparove tipa K: Žice tipa K obično su dostupne u dvije oznake boja. Prema standardu ANSI/ASTM E230, koriste se žuti priključci i/ili žuti i crveni vodiči, dok se prema standardu IEC 60584 koriste zeleni priključci i/ili zeleni i bijeli vodiči [20].

Na sljedećoj slici mogu se vidjeti izvedbe i označavanje termoparova bojama. U eksperimentu je bio korišten KBB tip termopara.



Slika 56 izvedbe i označavanje termoparova [19].

Pri odabiru termopara važno je uzeti u obzir temperaturni raspon, osjetljivost, otpornost na kemikalije, abraziju i vibracije, te kompatibilnost s opremom. Također, važno je razmotriti kemijsku inertnost i magnetičnost materijala, dok su neki tipovi specifično prilagođeni za posebne primjene. Na sljedećem grafu je prikazan temperaturni raspon više vrsta termopara.



Slika 57 Temperaturni raspon ovisno o tipu termopara [20].

7.3.3. TIG uređaj

Vartig izvori zavarivanja dizajnirani su za zavarivanje prema TIG postupku, a također omogućuju zavarivanje elektrodom s oblogom. Preporučuju se za zavarivanje konstrukcijskih čelika, nehrđajućeg čelika, aluminijskih i bakrenih materijala. Opremljeni su digitalnim prikazom parametara zavarivanja te LED signalizacijom za radne režime. U donjoj tablici su dane tehničke karakteristike uređaja za zavarivanje:

Tablica 11 Tehničke karakteristike Vartig 2005 AC/DC uređaja [18].

TIP	Vartig 2005 AC/DC (G i W)
Priključni napon:	1 x 230 V
Osigurač (spori):	20 A
Područje zavarivanja TIG DC:	5 – 170 A
Područje zavarivanja TIG AC/DC:	5 – 200 A
Područje zavarivanja REL:	5 – 170 A
Intermitencija TIG AC/DC:	40% - 200 A 60% - 160 A / 170 A 100% - 130 A / 130 A
Napon zavarivanja REL/TIG:	20-26,8V / 10-16,8V
Promjer elektrode:	Ø 1,5 – 4 mm
Hlađenje izvora:	prisilno - ventilator
Masa:	18 kg
Dimenzije (mm):	440 x 222 x 480



Slika 58 Uređaj za TIG zavarivanje, Vartig 2005 AC/DC [18].



Slika 59 Vartig 2005 AC/DC korišten u eksperimentu, slika je autorovo djelo.

Postupci zavarivanja uređaja uključuju TIG AC/DC i DC u zaštiti plinova, TIG pulsno zavarivanje te REL zavarivanje s obloženom elektrodom. Područja primjene obuhvaćaju montažne i remontne radove te upotrebu u radionicama i lakšoj industriji. Karakteristike uređaja ističu se izvrsnom kvalitetom zavara, digitalnim prikazom svih funkcija, visokofrekventnim HF paljenjem

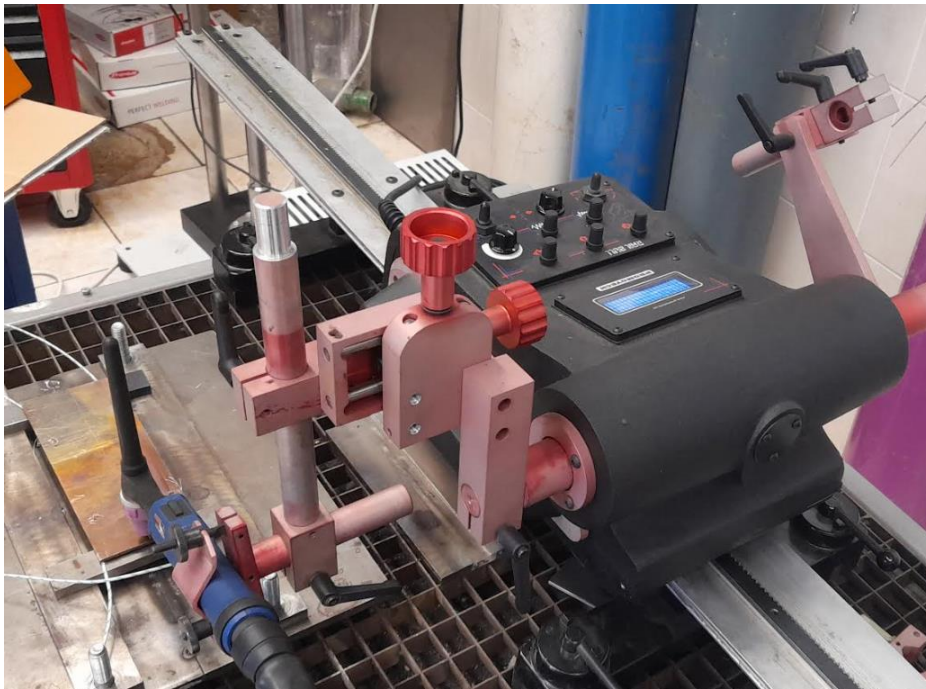
bez kontakta, mogućnošću odabira 2. ili 4. taktnog zavarivanja, funkcijom „HOT START“ koja omogućuje povećanje struje zavarivanja na početku procesa te funkcijom „ANTI STICKING“ koja automatski isključuje struju zavarivanja nakon lijepljenja elektrode [17].

7.3.4. Uređaj za automatizirano vođenje elektrode

Uređaj PROMOTECH Rail Bull koristi se za automatizirano pravocrtno pomicanje TIG pištolja te je namijenjen za TIG-MIG-MAG zavarivanje ili plazma rezanje. Može raditi u raznim položajima zavarivanja, uključujući PA (ravno), PB (vodoravno okomito), PC (vodoravno), PD, PE (iznad glave), PF (okomito gore) i PG (okomito dolje). Uređaj se kreće po feromagnetskim i neferomagnetskim materijalima putem pogonskog sustava sa zupčastom letvom i tračnicama. Tračnice se pričvršćuju na ravne ili zakrivljene površine magnetskim ili vakuumskim jedinicama, dok minimalni radijus zakrivljenosti za polufleksibilnu stazu iznosi 5 metara. Karakteristike uređaja navedene su u tablici (12) niže [17]:

Tablica 12 Karakteristike uređaja Promotech Rail Bull [17]

Napon	115-230 V, 50-60 Hz
Snaga	100 W
Položaj zavarivanja	PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG
Promjer pištolja	16-22 mm; pa do 35mm (izborno)
Horizontalna vučna sila	350 N
Vertikalna vučna sila	150 N
Težina	20 kg
Horizontalna brzina	0-120 cm/min
Vertikalna brzina	0-110 cm/min
Hod zupčaste letve	0-190 mm
Raspon podešavanja poprečnog klizača	0-35 mm (gore/dolje, lijevo/desno)



Slika 60 Automatizirano vođenje TIG pištolja u eksperimentu, slika je autorovo djelo.

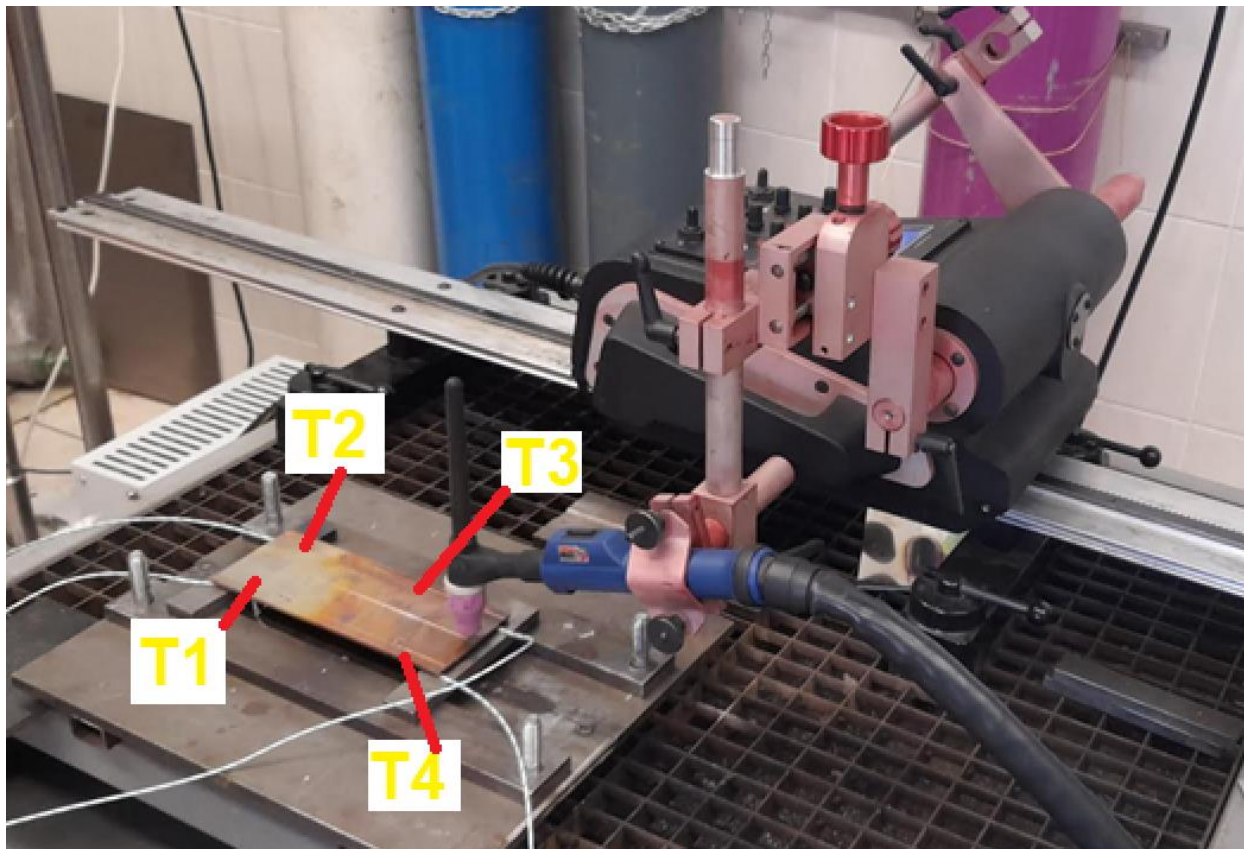
Na sljedećoj slici je prikazan ekran uređaja te sučelje pomoću kojeg su se definirali parametri gibanja elektrode.



Slika 61 Sučelje uređaja za automatizirano vođenje TIG pištolj, slika je autorovo djelo.

7.4. Rezultati mjerenja

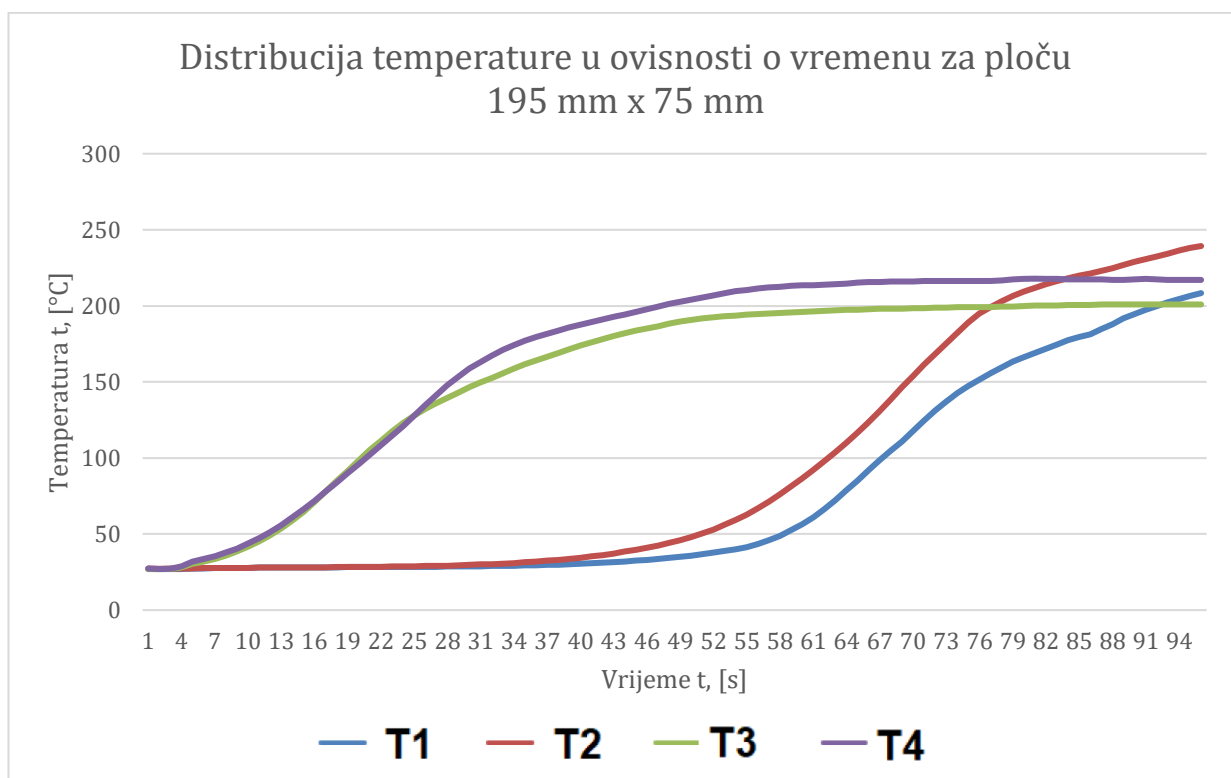
U prvom djelu mjerenja je određena temperaturna distribucija pomoću četiri K- termopara na ploči dimenzija (195 mm x 75 mm). U drugom djelu eksperimenta je izmjerena temperaturna distribucija na većoj ploči, dimenzija (195 mm x 150 mm). Parametri eksperimenta su u oba mjerenja bili jednaki, kao što je opisano u računskom djelu temperaturne distribucije. Slika eksperimenta s manjom pločom može se vidjeti niže:



Slika 62 eksperimentalni postav za određivanje temperaturne distribucije ploče 195 mm x 75 mm, slika je autorovo djelo.

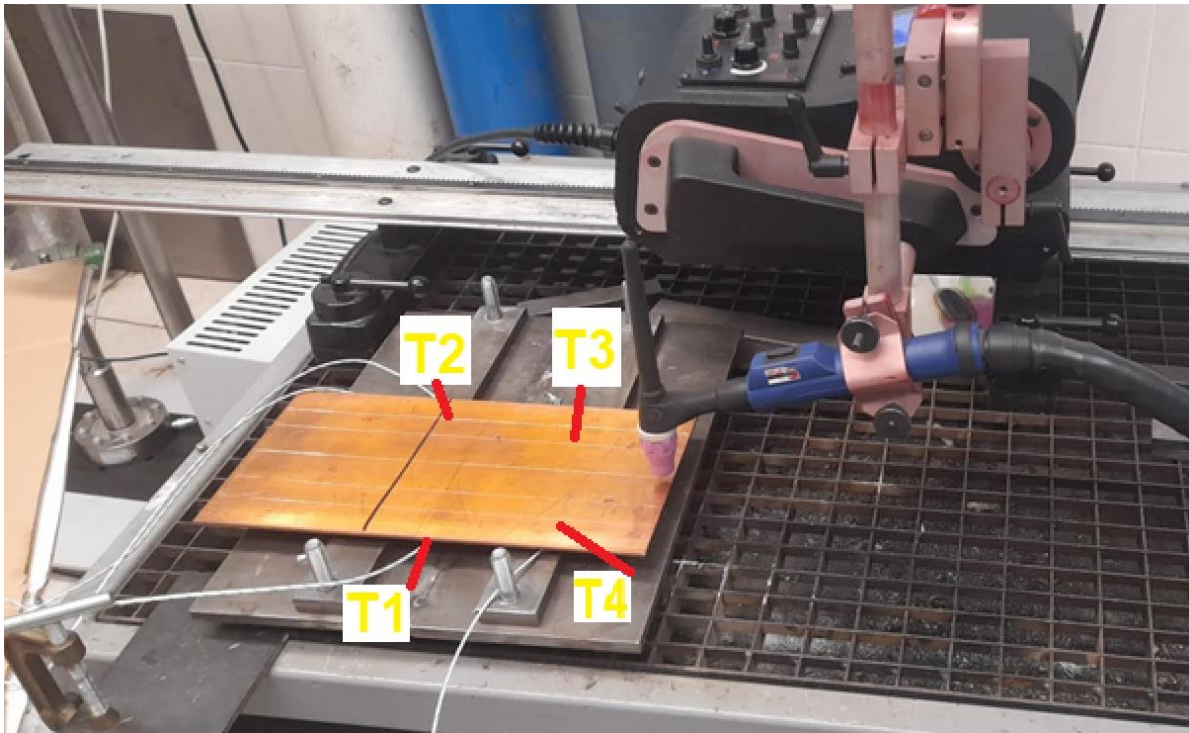
Termoparovi T_4 i T_3 su početni mjeritelji što se lako uočava na snimljenim kanalima. Nakon njih dolaze kanali T_1 i T_2 . Temperaturna distribucija sva četiri kanala odnosno termopara prikazana je na donjem grafu. Primjećuje se da funkcija temperature u promatranim točkama najprije eksponencijalno raste te nakon toga pada, što sugerira da se nakon prolaska elektrode temperatura počinje smanjivati. Primjećuje se također da se temperatura razlikuje između kanala T_1 i T_2 isto kao i između T_3 i T_4 iako se teoretski ne bi trebala, pošto se točke nalaze na istim udaljenostima od mjesta protaljivanja. Mogući razlozi odstupanja su sljedeći:

- **Kontakt senzora s površinom:** Ako termoparovi nisu bili pravilno postavljeni ili nisu imali jednak kontakt s površinom ploče, to može uzrokovati razlike u izmjerenim temperaturama. Loš kontakt može smanjiti učinkovitost prijenosa topline između ploče i senzora.
- **Lokalne varijacije na površini:** Površinska nepravilnost na mjestu gdje su postavljeni termoparovi, poput mikro-ogrebotina ili nejednakosti, mogla je utjecati na točnost mjerenja, uzrokujući male razlike u temperaturi čak i pri simetričnom postavljanju.
- **Postavljanje termoparova u odnosu na izvor topline:** Ako termoparovi nisu bili točno pozicionirani u simetričnim točkama u odnosu na pokretni izvor topline, čak i mali pomaci mogu rezultirati različitim temperaturnim krivuljama, osobito ako se radi o pokretnom zavarivanju koje brzo prolazi preko površine.



Slika 63 graf ovisnosti temperature u vremenu u četiri točke ispitivanja.

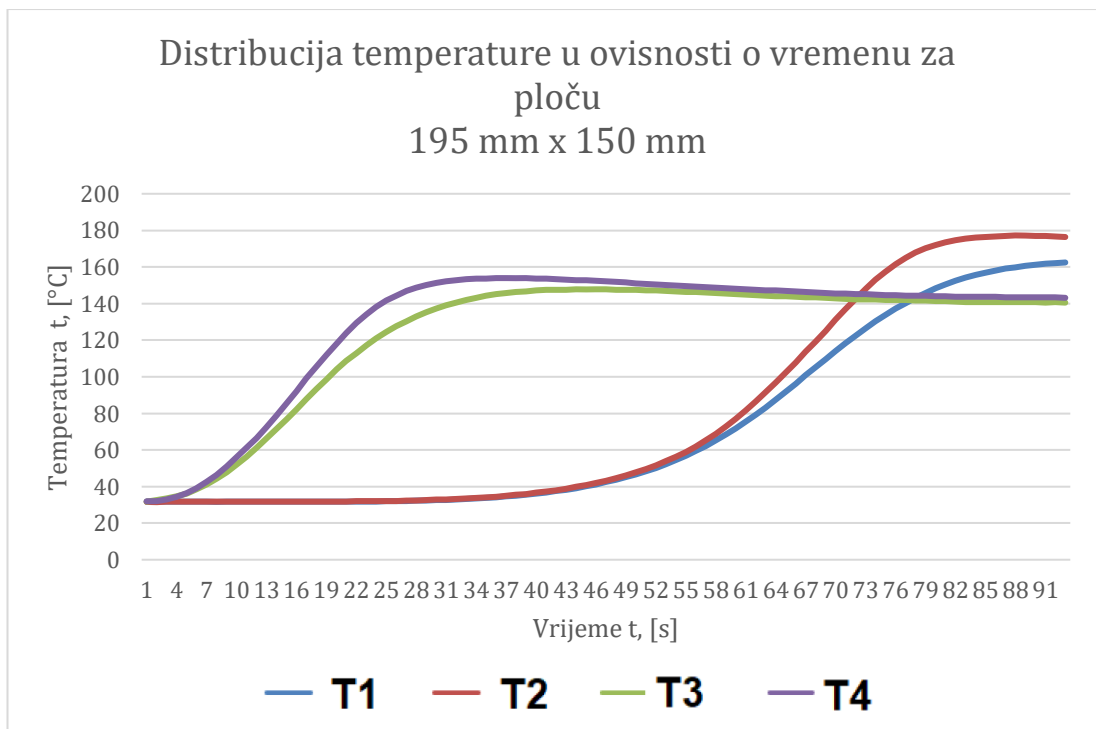
Na slici niže prikazan je proces protaljivanja ploče dimenzija (190 mm x 150 mm) uz jednake parametre protaljivanja.



Slika 64 eksperimentalni postav za određivanje temperaturne distribucije ploče 195 mm x 150 mm.

Slika je autorovo djelo.

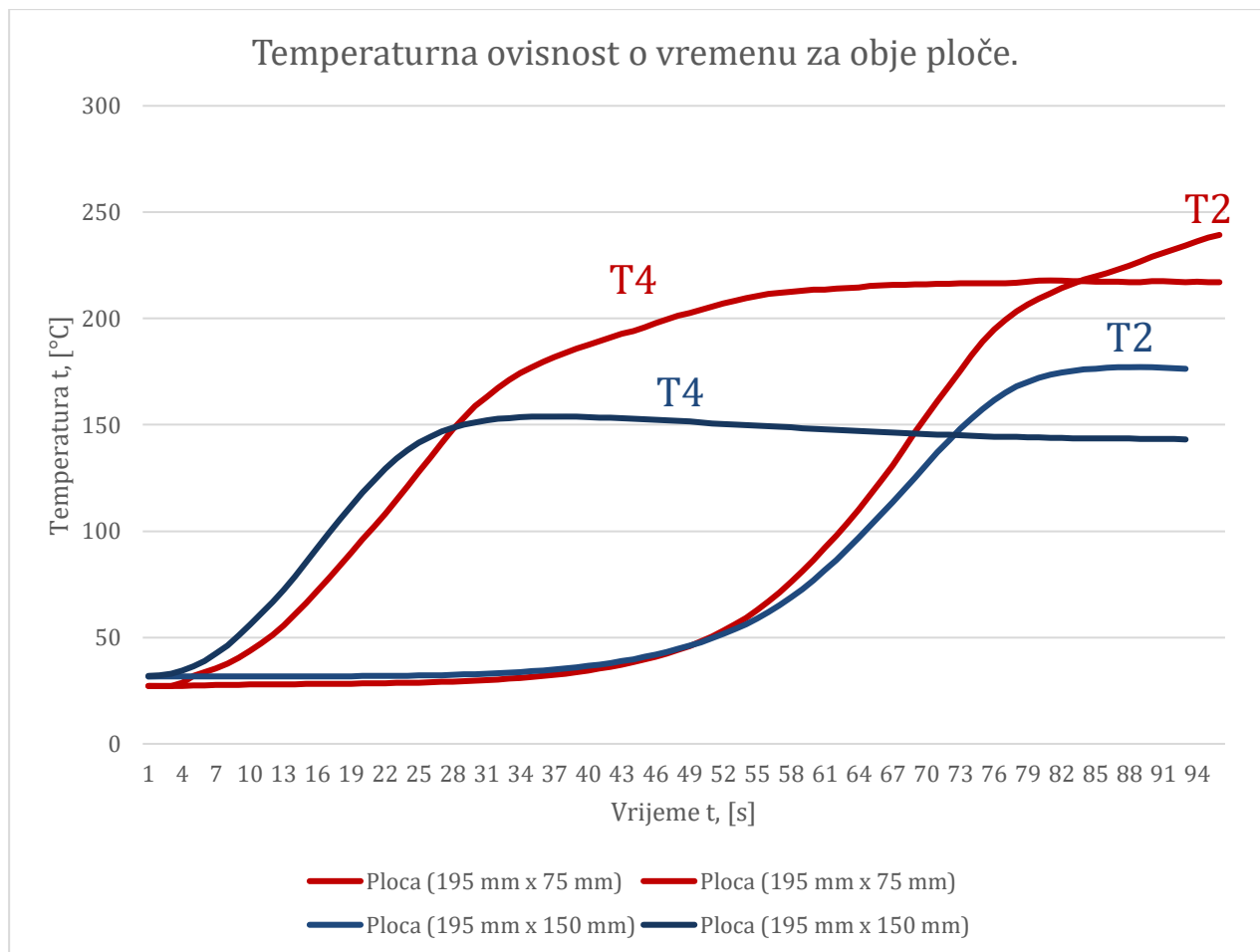
Na donjem grafu prikazana je temperaturna distribucija za veću ploču.



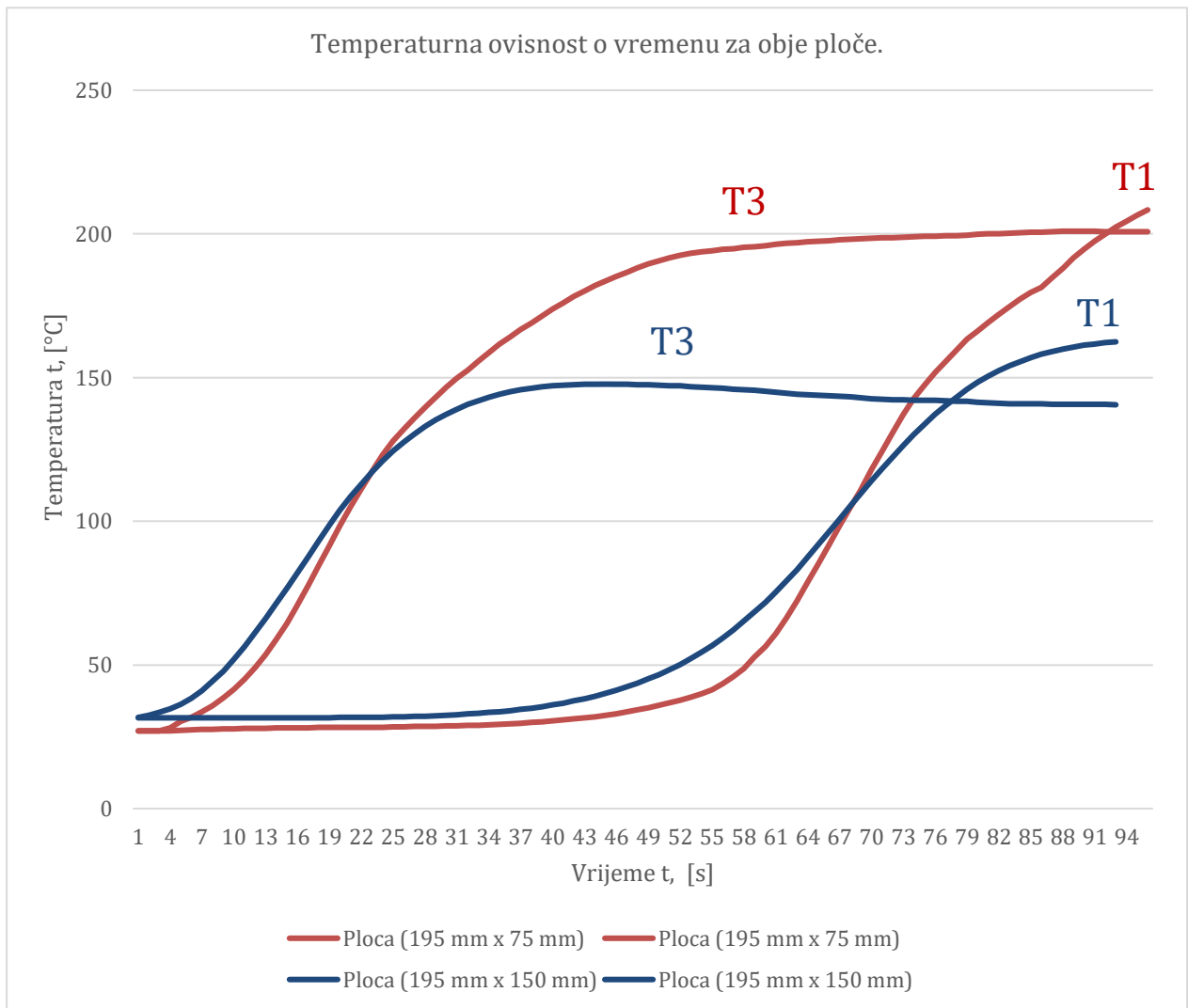
Slika 65 graf ovisnosti temperature u vremenu u četiri točke ispitivanja.

Iz rezultata mjerenja ploče dimenzija (190 mm x 150 mm) možemo zaključiti da se kanali 3 i 4 bolje slažu nego kanali 1 i 2 kao i u prethodnoj analizi. Temperatura je na većoj ploči protaljivanja u globalu manja. Dakle, svaki kanal mjeri manju maksimalnu temperaturu nego li kod ploče dimenzija (190 mm x 75 mm) zbog razloga koji su spomenuti ranije, što se može vidjeti u grafovima niže.

Na donjem grafu mogu se vizualno usporediti temperature za obje ploče na kanalima T₁ i T₃ te kanalima T₂ i T₄.



Slika 66 Usporedni graf temperatura za obje ploče za termoparove (T₂ i T₄) s iste strane protaljivanja.



Slika 67 Usporedni graf temperatura za obje ploče za termoparove (T1 i T3) s iste strane protaljivanja.

Radi preglednosti samoga grafa nisu prikazane distribucije za sve kanale već za kanale s jedne strane mjesta protaljivanja. U sljedećoj tablici je dan prikaz maksimalnih određeni odnosno izmjerenih temperatura, za egzaktno rješenje, ANSYS simulacijsko rješenje i rješenje dobiveno mjerenjem.

Tablica 13 Usporedna tablica maksimalnih temperatura određenih u računanju, simulaciji i eksperimentu.

	Egzaktno rješenje (formula)	ANSYS simulacija	Eksperiment
Ploča dimenzija 190 mm x 75 mm	$T_1=275,44\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_1=246,28\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_1=239,3\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$T_2=275,44\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_2=246,28\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_2=208,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$T_3=275,44\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_3=259,28\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_3=200,94\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$T_4=275,44\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_4=259,28\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_4=217,88\text{ }^{\circ}\text{C}$
Ploča dimenzija 190 mm x 150 mm	$T_1=192\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_1=175,44\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_1=162,47\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$T_2=192\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_2=175,44\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_2=177,15\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$T_3=192\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_3=181,87\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_3=153,87\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$T_4=192\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_4=181,87\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_4=147,87\text{ }^{\circ}\text{C}$

Kada se uspoređuju rezultati između egzaktnog rješenja, ANSYS simulacije i eksperimenta može se zaključiti da je egzaktno rješenje „najrobusnije“. To je očekivani rezultat, zato što u svojim pretpostavkama ta jednadžba zanemaruje gubitke topline u vidu konvekcije te radijacije. Sama jednadžba uopće u obzir ne uzima dimenzije ploče osim njezine debljine. S druge strane, ANSYS simulacija je uzela u obzir disipaciju topline u vidu konvekcije i radijacije i rješenja se slažu obzirom na simetričnost termoparova. Međutim, ANSYS simulacija ne predviđa nesavršenosti materijala, hrapavost površine te skrivene varijable u obliku disipacije topline kroz vođenje dodatnim kontaktima između ploče i postolja. Eksperiment pokazuje blago neslaganje u temperaturama zrcanih termoparova. Najveće neslaganje eksperimenta i simulacije je u trendu između termoparova koji su najbliže početnoj točki izvora te između onih koji su dalje. Eksperiment pokazuje jasno, da su termoparovi bliže početnoj točki izvora postigli veće maksimalne temperature od termoparova koji su dalje od početne točke izvora. Simulacija s druge strane pokazuje obrnuti trend, više maksimalne temperature su postigli termoparovi koji se nalaze dalje od početne točke izvora.

8. Zaključak

U zaključku rada na temelju teorijskog dijela o unosu i provođenju topline pri TIG zavarivanju bakra, potvrđena su glavna predviđanja eksperimentom protaljivanja umjesto klasičnog zavarivanja kako bi se minimizirao utjecaj faznih promjena materijala. Ovaj eksperimentalni pristup omogućio je točniju analizu distribucije temperature, posebno jer je bakar poznat po svojoj visokoj toplinskoj vodljivosti. Smanjivanjem utjecaja faznih promjena, eliminirani su potencijalni izvori netočnosti koji bi mogli utjecati na rezultate mjerenja temperature i samih distribucija, jer niti egzaktna rješenja niti ANSYS simulacija ne uzimaju u obzir fazne promjene.

Tijekom eksperimenta, korištene su bakrene ploče na kojima su postavljeni termoparovi u nekoliko ključnih točaka, a pokretni izvor topline je prolazio pored tih točaka. Na temelju dobivenih podataka o temperaturnim promjenama na različitim mjestima ploča, identificirane su razlike u maksimalnim temperaturama i dinamici hlađenja, ovisno o udaljenosti od izvora topline. Simetrično postavljeni termoparovi na ploči, iako su trebali pokazati jednake rezultate, očitovali su male razlike u distribucijama temperature zbog različitih čimbenika, kao što su mikroskopski pomaci u postavljanju termoparova ili male varijacije u uvjetima eksperimenta.

Eksperimentalni rezultati su također pokazali važnost brzine pomicanja izvora topline i veličine ploče u smislu disipacije topline. Manje ploče su pokazale veće temperaturne maksimume zbog manje površine za disipaciju topline, dok su veće ploče omogućile ravnomjerniju distribuciju topline, čime su smanjeni lokalni temperaturni maksimumi. Rezultati dobiveni u eksperimentu bili su u glavnom u skladu s teoretskim predviđanjima. Distribucija temperature pokazala je očekivane gradijente od izvora topline prema vanjskim rubovima ploča, pri čemu je toplinska energija najviše bila koncentrirana oko samog izvora. Daljnjom optimizacijom eksperimentalnih uvjeta i preciznijim mjerenjima moguće je postići još točnije rezultate, koji bi mogli doprinijeti boljem razumijevanju procesa provođenja topline kod materijala s visokim koeficijentom toplinske vodljivosti, poput bakra.

Ovi zaključci imaju praktičnu primjenu u industriji, posebno u poboljšanju tehnika TIG zavarivanja, gdje su točna kontrola unosa topline i minimizacija toplinskih gubitaka ključni za postizanje kvalitetnih zavara i smanjenje deformacija zavarenih spojeva.

9. Literatura

- [1] Wikipedia suradnici. (2024, 30. svibnja). Bakar. U *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Preuzeto s <https://en.wikipedia.org/wiki/Copper>
- [2] Alfirević, I., Bjelovučić, D., Budin, I., Matijašević, B., Modlic, B., Mulc, A., Šikić, Z., & Taboršak, D. (1996). *Inženjerski priručnik IP4: Proizvodno strojarstvo, Prvi svezak: Materijali*. Školska knjiga.
- [3] Copper Development Association Inc. (n.d.). Metallurgy of Copper-Base Alloys. Preuzeto 31. svibnja 2024., s https://copper.org/resources/properties/703_5/
- [4] American Welding Society. (2007). *Copper and alloys*. American Welding Society.
- [5] Copper Development Association Inc. (CDA). (n.d.). *Copper and Copper Alloys: Composition, Properties and Applications*. Preuzeto 1. lipnja 2024., s https://www.copper.org/publications/pub_list/pdf/a1360.pdf
- [6] Messler, R. W., Jr. (2004). *Principles of welding: Processes, physics, chemistry, and metallurgy*. Wiley-VCH.
- [7] Karkhin, V. A. (2019). *Thermal processes in welding*. Springer.
- [8] Traidia, A. (2011). *Multiphysics modelling and numerical simulation of GTA weld pools* (Doktorska disertacija). Ecole Polytechnique. Preuzeto 15. travnja 2024. s <https://pastel.hal.science/pastel-00709055>
- [9] Branilović, D. (n.d.). *Utjecaj zaštitnog plina pri TIG zavarivanju Cr-Ni čelika na geometrijske značajke zavara* (Završni projekt preddiplomskog studija). Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [10] Pintarić, M. (2020). *TIG zavarivanje spremnika iz nehrđajućeg čelika* (Završni rad). Sveučilište Sjever. Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:409142>.
- [11] Barac, A., Živić, M., Holik, M., Končić, R., & Samardžić, I. (2019). *Comparison of experimental and analytical solutions of temperature field in a submerged arc welding*. U *Engineering technologies in manufacturing of welded constructions and products, SBW 2019*. Preuzeto s https://dtzsb.unisb.hr/wp-content/uploads/radovi_2019/14_Zivic.pdf
- [12] Šantak, I., Barac, A., Holik, M., & Živić, M. (2023). Python-based calculation and display of temperature field distribution in arc welding. U *12. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2023 „Strojarske tehnologije u izradi zavarenih konstrukcija i proizvoda, SBZ 2023“*, Slavonski Brod i Požega, Hrvatska. Preuzeto s https://dtzsb.unisb.hr/wp-content/uploads/SBZ_2023_paper_346-352.pdf
- [13] Bionda, F. (2018). *Automatizirano TIG zavarivanje cijevi iz nehrđajućih čelika* (Diplomski rad). Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.

- [14] Živčić, M. (1985). TIG zavarivanje. *Časopis zavarivanje*, 1-3, Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, FSB.
- [15] American Welding Society. (1987). *Handbook for GTAW – Gas Tungsten Arc Welding*. American Welding Society.
- [16] Hrvatski zavod za norme. (2008). *HRN EN ISO 15614-6:2008: Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja metala — Ispitivanje postupaka zavarivanja — 6. dio: Bakar i legure bakra* (ISO 15614-6:2006; EN ISO 15614-6:2006).
- [17] Makovec, D. (2023). *Automatizirano plazma rezanje lima bakra Cu-ETP pomoću komprimiranog zraka* (Diplomski rad). Sveučilište Sjever, Koprivnica. Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:360079>.
- [18] Fluke Corporation. 1586A Super-DAQ Precision Temperature Scanner. <https://www.fluke.com/en-us/product/calibration-tools/temperature-calibrators/fluke-calibration-1586a>.
- [19] Servus. Vartig 1705-2005. Preuzeto https://servus.hr/wp-content/uploads/2017/10/Vartig_1705-2005.pdf, 10.10.2024.
- [20] Veliki, T. (2024). *Procesna mjerenja: Nastavna skripta*. Sveučilište Sjever, Koprivnica.
- [21] Bušić, M. (2024). *Dokumentacija u proizvodnji zavarenih konstrukcija: Nastavna skripta*. Sveučilište Sjever, Varaždin.
- [22] Bušić, M. (2024). *Suvremene proizvodne tehnologije: Nastavna skripta*. Sveučilište Sjever, Varaždin.

Popis slika

Slika 1 elementarni bakar u prirodnom stanju [1].	2
Slika 2 Grafikon prikazuje svojstva bakra (gustoća ρ , specifični toplinski kapacitet c , entalpija H , toplinska vodljivost λ i toplinska difuznost a) kao funkcije temperature T [7].	4
Slika 3 Proizvodi od bakra i bakrenih legura [5].	8
Slika 4 Ovisnost temperature predgrijavanja o debljini bakrene ploče i postupku zavarivanja [4].	9
Slika 5 Osnovna oprema potrebna za ručno TIG zavarivanje [9].	11
Slika 6 Princip procesa TIG zavarivanja [10].	13
Slika 7 Raspodjela temperature oko vrha elektrode do radnog dijela prilikom TIG zavarivanja upotrebom jakosti električne struje $I=200$ A, na tlaku $p=1$ atm te upotrebom argona kao zaštitnog plina [7].	13
Slika 8 Položaj volframove elektrode kao i dodatnog materijala u odnosu na materijal zavarivanja [14].	14
Slika 9 Način izvođenja čeonog i kutnog spoja pri TIG zavarivanju [10].	14
Slika 10 Strmo-padajuća karakteristika izvora struje kod TIG zavarivanja [13].	15
Slika 11. Vrste struja, polaritet, penetracija te kapacitet elektrode [10].	16
Slika 12 Na slici su prikazane krivulje potencijala (u voltima) u odnosu na udaljenost od katode (u milimetrima) za različite materijale katode: volfram (W), molibden (Mo), i volfram s torijem oksidom (W + Th ₂ O). Krivulje pokazuju kako se napon mijenja s udaljenošću od katode za različite materijale [7].	17
Slika 13 Načini spajanja bakrenih dijelova TIG metodom. A=1.6 mm, B= 2.4 mm, C=3.2 mm, D=4 mm, R=3.2 mm, T= debljina [4].	20
Slika 14 Učinak zaštitnog plina i temperature predgrijavanja na penetraciju zavarenog spoja u bakru TIG zavarivanju s 300 A istosmjernje struje pri brzini zavarivanja od (3-4 mm/s) [4].	21
Slika 15 utjecaj zaštitnih plinova na dubinu penetracije i širine zavara [13].	22
Slika 16 temperaturna raspodjela električnog luka u ovisnosti o zaštitnom plinu [6].	24
Slika 17 Glavni fizikalni procesi prilikom TIG zavarivanja [8].	25
Slika 18 Uzroci gubitka tijekom transfera topline do mjesta zavarivanja [6].	30
Slika 19 Ovisnost učinkovitosti električnog luka volframovog elektrode η o struji I : 1—anoda hlađena vodom; 2—304 nehrđajući čelik; 3—12Kh18N10T nehrđajući čelik; 4—Legure s cirkonijem; 5—nehrđajući čelik; 6—čelik; 7—čelik; 8—meki čelik [7].	32
Slika 20 Gubitci topline prilikom TIG zavarivanja [7].	33

Slika 21 Efikasnost električnog luka u ovisnosti o jačini električne struje kod TIG zavarivanja [7].	34
Slika 22 Temperaturno polje oko pokretnog linijskog izvora u beskonačnoj ploči debljine 10 mm s površinom ne provodljivom za toplinu (snaga $q = 5000 \text{ W}$), brzina ($v = 5 \text{ mm/s}$), toplinska provodljivost ($\lambda = 0.04 \text{ W/mmK}$) toplinska difuzivnost ($a = 8 \text{ mm}^2/\text{s}$), početna temperatura ($T_0 = 300 \text{ K}$) [7].	36
Slika 23 Infinitesimalni dio volumena tijela kroz koje prolazi toplina [7].	37
Slika 24 Infinitesimalni volumen, kvadar za analizu toplinskih tokova [7].	40
Slika 25 Ovisnost radijativnog koeficijenta prijenosa topline (desno) te konvekcijskog koeficijenta(lijevo) o temperaturi, za $\varepsilon=1$ u okolini zraka [7].	43
Slika 26 (a) Normalna distribucija toplinskog izvora i (b) konstantni cirkularni izvor [7].	44
Slika 27 Distribucija TIG izvora prema modelu i eksperimentu [7].	46
Slika 28 Normalno distribuirani dvostruki elipsoid sa karakterističnim parametrima, tzv. Goldakov izvor [7].	46
Slika 29 Trenutni planarni toplinski izvor [12].	49
Slika 30 bakrena ploča za zavarivanje.	51
Slika 31 Graf temperaturne distribucije za ploču dimenzija 190 mm x 75 mm.	52
Slika 32 Bakrena ploča dimenzija 2a x b.	53
Slika 33 Graf temperaturne distribucije za ploču dimenzija 190 mm x 150 mm.	54
Slika 34 Model za zagrijavanje beskonačne tanke ploče normalnim kružnim izvorom topline [7].	56
Slika 35 Temperaturno polje na beskonačnoj ravnoj ploči prilikom zagrijavanja modeliranim 3D normalnim izvorom sa vrijednostima: $Q=2000 \text{ J}$, $C=0.1 \text{ mm}^{-2}$, $T_0=300 \text{ K}$, $a=8 \text{ mm}^2/\text{s}$, $c \cdot \rho=0.005 \text{ J/mm}^3 \cdot \text{K}$ [7].	57
Slika 36 odabir materijala ploče protaljivanja.	59
Slika 37 modul za analizu termodinamike zavarivanja.	59
Slika 38 dizajn ploča zavarivanja.	60
Slika 39 stvaranje mreže konačnih elemenata.	61
Slika 40 uvjeti toplinske analize, konvekcija(lijevo) i zračenje(desno).	61
Slika 41 parametri pokretnog izvora topline protaljivanja.	62
Slika 42 Temperaturna distribucija na ploči protaljivanja dimenzija 195 mm x 150 mm.	63
Slika 43 Toplinski tok na ploči protaljivanja dimenzija 195 mm x 150 mm.	64
Slika 44 Temperaturna distribucija na ploči(195 mm x 150 mm) u ovisnosti o vremenu u temperaturnoj sondi T_1 .	64

Slika 45	Temperaturna distribucija na ploči (195 mm x 150 mm) u ovisnosti o vremenu u temperaturnoj sondi T ₃ .	65
Slika 46	Temperaturna distribucija na ploči protaljivanja dimenzije 195 mm x 75 mm.	66
Slika 47	Toplinski tok na ploči (195 mm x 75 mm) protaljivanja.	67
Slika 48	Temperaturna distribucija na ploči dimenzija (195 mm x 75 mm) u ovisnosti o vremenu u temperaturnoj sondi T ₁ .	68
Slika 49	50 Temperaturna distribucija na ploči dimenzija (195 mm x 75 mm) u ovisnosti o vremenu u temperaturnoj sondi T ₃ .	69
Slika 51	Eksperimentalna bakrena ploča (150 mm x 195 mm) za ispitivanje temperaturne distribucije prilikom TIG protaljivanja.	71
Slika 52	Eksperimentalna bakrena ploča (150 mm x 195 mm) za ispitivanje temperaturne distribucije prilikom TIG protaljivanja.	71
Slika 53	sučelje temperaturnog skenera [18].	73
Slika 54	Precizni skener temperature (Fluke 1586A Super-DAQ) [18].	74
Slika 55	primjer funkcioniranja termopara [19].	75
Slika 56	izvedbe i označavanje termoparova [19].	76
Slika 57	Temperaturni raspon ovisno o tipu termopara [20].	77
Slika 58	Uređaj za TIG zavarivanje, Vartig 2005 AC/DC [18].	78
Slika 59	Vartig 2005 AC/DC korišten u eksperimentu.	78
Slika 60	Automatizirano vođenje TIG pištolja u eksperimentu.	80
Slika 61	Sučelje uređaja za automatizirano vođenje TIG pištolja.	80
Slika 62	eksperimentalni postav za određivanje temperaturne distribucije ploče 195 mm x 75 mm.	81
Slika 63	graf ovisnosti temperature u vremenu u četiri točke ispitivanja.	82
Slika 64	eksperimentalni postav za određivanje temperaturne distribucije ploče 195 mm x 150 mm.	83
Slika 65	graf ovisnosti temperature u vremenu u četiri točke ispitivanja.	83
Slika 66	Usporedni graf temperatura za obje ploče za termoparove (T ₂ i T ₄) s iste strane protaljivanja.	84
Slika 67	Usporedni graf temperatura za obje ploče za termoparove (T ₁ i T ₃) s iste strane protaljivanja.	85

Sveučilište Sjever



SVEUČILIŠTE
SIEVER

IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, MIHAEL ŽELIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom

*Alvos i provodenje papira pri HIG
zavarivanju
bakra i bakrenih legura*

(upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
MIHAEL ŽELIĆ
(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.