

# Elektrofuzijsko zavarivanje polimera

---

**Milardović, Marin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences / Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet u Rijeci**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:186:559278>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-06**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences - FHSSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**FILOZOFSKI FAKULTET U RIJECI**  
**ODSJEK ZA POLITEHNIKU**

**ELEKTROFUZIJSKO ZA VARIVANJE**  
**POLIMERA**

**(Završni rad)**

Voditelj diplomskog rada:

**Prof.dr.sc. Marko Dunder**

Pristupnik:

**Marin Milardović**

**Rijeka, 2016.**

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
Filozofski fakultet  
Odsjek za politehniku

Studijski program: Preddiplomski studij politehnike  
Student: Marin Milardović, mat. broj: 0069052456

Tema završnog rada: Elektrofuzijsko zavarivanje  
polimera

Mentor: Prof.dr.sc. Marko Dunder

Rijeka, 2016.

Sveučilište u Rijeci  
**Filozofski fakultet**  
**ODSJEK ZA POLITEHNIKU**  
u Rijeci  
Sveučilišna avenija 4.

**Povjerenstvo za završne i diplomske ispite**

U Rijeci, .6.2016.

## **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

**Pristupnik:** Marin Milardović

**Zadatak:** Elektrofuzijsko zavarivanje polimera

**Rješenjem zadatka potrebno je obuhvatiti sljedeće:**

1. Uvodni dio - Opće značajke polimera i njihova primjena.
2. Karakteristike polimera, podjela, svojstva i način njihove proizvodnje.
3. Postupci zavarivanja polimernih materijala
4. Eksperimentalni dio (elektrofuzijsko zavarivanje komponenata od polietilena visoke gustoće (PE-HD)).
5. Zaključak

U završnom se radu obvezno treba pridržavati **Pravilnika o završnom radu.**

**Zadatak uručen pristupniku:** .6.2015.

**Rok predaje završnog rada:** \_\_\_\_\_.

**Datum predaje završnog rada:** \_\_\_\_\_

**PREDSJEDNIK POVJERENSTVA  
ZA ZAVRŠNE I DIPLOMSKE RADOVE**

**ZADATAK ZADAO:**

**Doc.dr.sc. Tomislav Senčić**

**Prof.dr.sc. Marko Dunder, dipl.ing.**

## **IZJAVA**

Izjavljujem pod punom moralnom odgovornošću da sam Završni rad izradio samostalno, isključivo znanjem stečenim na Filozofskom fakultetu u Rijeci odsjeku za Politehniku, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora prof.dr.sc. Marka Dundera, kome se srdačno zahvaljujem.

Također se zahvaljujem svojim roditeljima i obitelji koji su mi kroz cijelo vrijeme mog školovanja bili najveća podrška.

Marin Milardović

---

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Naziv	Mjerna jedinica
$T_g$	Temperatura staklišta	°C
$T_t$	Temperatura taljenja	°C
$T_r$	Temperatura razgradnje	°C
$E$	Modul elastičnosti	MPa
$\sigma_m$	Rastezna čvrstoća (vlačna čvrstoća)	MPa
$\varepsilon$	Istezanje	-
$X_L$	Induktivna komponenta otpora	$\Omega$
A	Energijski elastično stanje	-
B	Entropijski elastično stanje	-
C	Elastoviskozno stanje	-

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Makromolekula polietena (polietilena) dobiva se spajanjem molekula etena (etilena) .....	3
Slika 2.2. Podjela polimera s obzirom na građu makromolekula.....	5
Slika 2.3. Građa plastomera, elastomera i duromera.....	6
Slika 3.1. Dijagram stanja polimernih materijala tijekom zavarivanja .....	9
Slika 3.3. Pribor za zavarivanje (na električnu energiju) .....	11
Slika 3.4. Prikaz zavarivanja polimernog materijala vrućim plinom .....	12
Slika 3.3. Shematski prikaz zavarivanja vrućim elementom.....	12
Slika 3.4. Prikaz zavarivanja strujama visoke frekvencije.....	13
Slika 3.5. Zavarivanje trenjem .....	14
Slika 3.6. Oblici koji se mogu zavariti trenjem.....	15
Slika 3.7. Zavarivanje ultrazvukom .....	16
Slika 3.8. Postupak polifuzijskog zavarivanja .....	16
Slika 4.1. Elektrofuzijsko zavarivanje.....	17
Slika 4.2. Shematski prikaz elektrofuzijskog zavarivanja PE cijevi .....	19
Slika 4.4. Shematski prikaz „On-line monitoring sustava“ .....	21
Slika 4.5. Izmjereni napon na promjeru cijevi 160 mm .....	22
Slika 4.6. Izmjereni naponi za promjer cijevi a) 32 mm i b) 225 mm .....	23
Slika 4.7. Izmjerene jakosti struje za promjer cijevi a) 32mm i b) 225 mm .....	23
Slika 4.8. „Off-line“ izračunat otpor za promjer cijevi a) 32mm i b) 225mm.....	23
Slika 4.9. „Off-line“ izračunata snaga za promjer cijevi a) 32mm i b) 225mm .....	24
Slika 4.10. „Off-line“ izračunata količina energije za promjer cijevi a) 32mm i b) 225mm... ..	24

## **POPIS TABLICA**

Tablica 2.1. Tablica najčešće korištenih polimera .....	7
Tablica 2.2. Pregled nekih svojstava polimernih materijala .....	7



# SADRŽAJ

IZJAVA .....	I
POPIS OZNAKA .....	II
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
SADRŽAJ .....	V
1.UVOD .....	1
2.KARAKTERISTIKE POLIMERA .....	3
2.1.Struktura polimera.....	3
2.1.1. Polimerizacija.....	3
2.2.2. Stupanj polimerizacije.....	4
2.2.Podjela polimera.....	4
2.2.1. Podjela s obzirom na postanak .....	4
2.2.2. Podjela polimera s obzirom na građu makromolekula.....	5
2.2.3.Podjela s obzirom na ponašanje na povišenoj temperaturi .....	5
2.3. Svojstva polimera .....	7
2.3.1. Mehanička svojstva .....	8
2.3.2. Tribološka svojstva .....	8
2.3.3. Električna svojstva .....	8
2.3.4. Kemijska postojanost .....	8
3.POSTUPCI ZAVARIVANJA POLIMERNIH MATERIJALA .....	9
3.2. Zavarivanje toplim zrakom ili plinom.....	11
3.3.Zavarivanje zagrijanim elementom .....	12
3.4.Zavarivanje strujama visoke frekvencije.....	13
3.5. Zavarivanje trenjem.....	14
3.6. Zavarivanje ultrazvukom.....	15

3.7. Polifuzijsko zavarivanje .....	16
4. ELEKTROFUZIJSKO ZAVARIVANJE KOMPONENATA POLIETILENA VISOKE GUSTOĆE (PE-HD) .....	17
4.1. Elektrofuzijsko zavarivanje .....	17
4.2. Prednosti polietilena .....	18
4.3. Priprema za zavarivanje .....	18
4.4. Postupak zavarivanja .....	19
4.5. Ispis podataka .....	20
4.6. Eksperimentalno snimanje parametara zavarivanja .....	21
4.7. Rezultati mjerenja .....	22
5. ZAKLJUČAK .....	25
LITERATURA .....	26

## 1.UVOD

Riječ plastika je prvi put korištena kao imenica oko 1909. godine i obično se koristi kao sinonim za polimere, izraz koji je prvi put korišten 1866. Plastike su jedinstvene po tome što imaju izrazito velike molekule odnosno makromolekule. Potrošački i industrijski proizvodi izrađeni od plastike uključuju pakiranja za hranu i pića, kućanske potrepštine, kućišta za računala, premaze i ljepila, odjeću, medicinske uređaje, boje, sigurnosne štitove, igračke, objektivne, zupčanike, pumpe, ventilatore, cijevi, elektroničke i električne proizvode, komponente za automobile itd.

Zbog svojih brojnih jedinstvenih i različitih svojstava, polimeri sve više zamjenjuju metalne dijelove u automobilima, civilnim i vojnim zrakoplovima, željeznicama i brodovima, sportskoj opremi, igračkama, kućanskim aparatima i uredskoj opremi. Te zamjene odražavaju prednosti polimera u smislu sljedećih karakteristika:

- relativno niska cijena i jednostavnost proizvodnje kompliciranih izradaka u velikim količinama
- otpornost na koroziju i na kemikalije
- niska električna i toplinska provodljivost
- mala gustoća
- smanjenje buke
- širok izbor boja i prozirnih folija
- postoje još neke karakteristike koje mogu i ne moraju biti poželjne (ovisno o namjeni) kao na primjer niska čvrstoća i krutost, visoki koeficijent toplinske ekspanzije, mogu se koristiti samo na temperaturama manjim od 350 °C, s vremenom opada dimenzijska stabilnost.

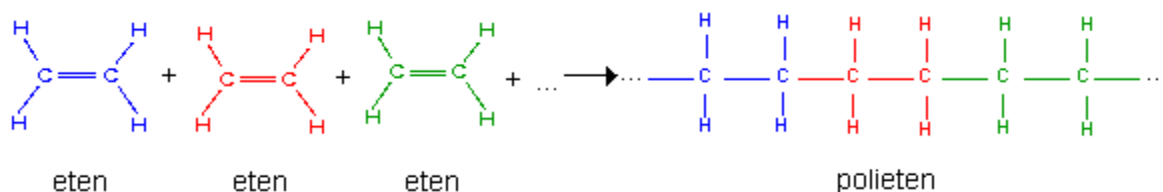
Riječ plastika potječe od grčke riječi plastikos, što znači „sposobno da bude oblikovano“, dok je naziv polimer složenica grčkih riječi poly i meros što bi značilo „mnogo dijelova“. Plastika se može s relativnom lakoćom formirati, obrađivati i spajati u razne oblike. Potreba za dodatnom završnom obradom je, ako je uopće potrebna, minimalna. To svojstvo daje važnu prednost nad metalima. Plastika je dostupna na tržištu u raznim oblicima kao što su folije, ploče, šipke i cijevi različitih poprečnih presjeka.

Najraniji polimeri su se izrađivali od prirodnih organskih materijala. Najčešći primjer je celuloza. Najraniji sintetički polimer je razvijen 1906. godine. Razvoj moderne tehnologije polimera je započeo 1920. kada su se sirovine potrebne za izradu polimera uzimale iz ugljena i naftnih proizvoda.

## 2.KARAKTERISTIKE POLIMERA

### 2.1.Struktura polimera

Svojstva polimera u velikoj mjeri ovise o strukturi pojedinih molekula polimera, njihovim oblicima, veličinama i o rasporedu molekula koje grade polimernu strukturu. Polimerne molekule su karakteristične po svojoj veličini, koja ih razlikuje od ostalih organskih kemijskih sastava. Polimeri su dugolančane molekule koje su formirane polimerizacijom. Osnovna građevna jedinica polimera je monomer. Većina monomera su organski materijali u kojima su ugljikovi atomi spojeni kovalentnim vezama s drugim atomima (poput vodika, kisika, dušika, fluora, klora, silicija i sumpora). Na slici 2.1 prikazana je makromolekula polietilena.



Slika 2.1. Makromolekula polietena (polietilena) dobiva se spajanjem molekula etena (etilena)

#### 2.1.1. Polimerizacija

Monomeri se mogu povezati u polimere u ponavljajućim dijelovima kako bi se stvorile duže i veće molekule. Taj kemijski proces se naziva polimerizacija. Iako postoji nekoliko varijacija, dva procesa polimerizacije su bitna. To su kondenzacijska i adicijska polimerizacija.

Kondenzacijska polimerizacija je polimerizacija tijekom koje se stvaraju veze između dvije vrste reaktivnih monomera. Karakteristika ove reakcije je da se niskomolekulni nusprodukti reakcije (kao što je voda) izdvajaju.

Adicijska polimerizacija je polimerizacija u kojoj se spajanje odvija bez nusprodukata. Naziva se „lančana reakcija“ zbog velike brzine kojom se dugačke molekule tvore istovremeno, obično u roku od par sekundi. Ta brzina je znatno veća nego kod kondenzacijske polimerizacije.

Tijekom polimerizacije monomeri se spajaju kovalentnim vezama, stvarajući polimerni lanac. Zbog njihove snage kovalentne veze se nazivaju primarnim vezama. Polimerni lanci su, pak, međusobno spojeni sekundarnim vezama, kao što su na primjer Van der Waalsove veze, vodikove veze i ionske veze.

### **2.2.2. Stupanj polimerizacije**

Stupanj polimerizacije utječe na veličinu polimernog lanca, a definira se kao omjer molekularne mase polimera i molekularne mase ponavljajuće jedinice. Na primjer polivinilklorid (PVC) ima mjernu masu 62.5, dakle stupanj polimerizacije PVC-a molekularne mase 50 000 je  $50000/62.5=800$ . Što je veći stupanj polimerizacije, to je veća viskoznost polimera<sup>1</sup>. S jedne strane, visoka viskoznost negativno utječe na mogućnost oblikovanja i time povećava ukupnu cijenu obrade. S druge strane, visoki stupanj polimerizacije može rezultirati jačim polimerima.

## **2.2.Podjela polimera**

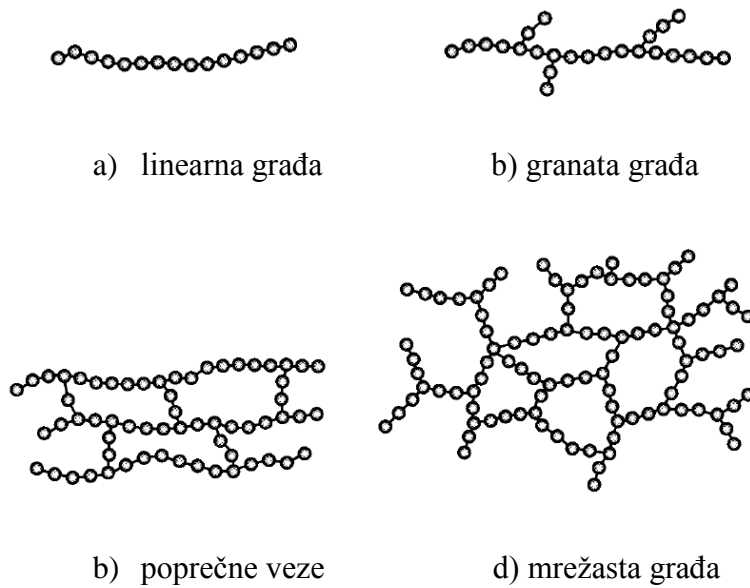
### **2.2.1. Podjela s obzirom na postanak**

- prirodni (biopolimeri)- celuloza, škrob, keratin, kaučuk
- polusintetski polimeri - biopolimeri koji su kemijski modificirani
- organski sintetski polimeri - polimeri koji su dobiveni polimerizacijom iz jednostavnih organskih spojeva
- anorganski sintetski polimeri - polimeri dobiveni polimerizacijom iz jednostavnih organskih i anorganskih spojeva, a lanac makromolekule nije iz ugljikovih atoma

---

<sup>1</sup> Viskoznost- otpornost tekućine na protok

### 2.2.2. Podjela polimera s obzirom na građu makromolekula



Slika 2.2. Podjela polimera s obzirom na građu makromolekula

- linearni polimeri (a) - Nazvani su tako zbog svoje ponavljajuće strukture.
- granati polimeri (b) - Bočni ogranci lanca su povezani na glavni lanac tijekom sinteze polimera. Ogranci ometaju relativno gibanje molekulnih lanaca, što rezultira povećanoj otpornosti na deformacije. Gustoća razgranatih polimera je niža nego kod linearnih.
- poprečno vezani polimeri (c) - Poprečne veze imaju veliki utjecaj na svojstva polimera. Imaju veću tvrdoću, čvrstoću, krutost, krhkost i imaju bolju dimenzijsku stabilnost.
- mrežasti polimeri (d) - Sastoje se od prostornih (trodimenzionalnih) mreža od tri ili više aktivnih kovalentnih veza. Poprečno povezani polimeri koji imaju puno poprečnih veza se isto smatraju mrežastim polimerima.

### 2.2.3. Podjela s obzirom na ponašanje na povišenoj temperaturi




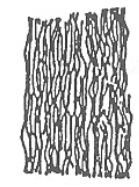



- Plastomeri (termoplasti) - Plastomeri su linearne ili granate građe. Njihove makromolekule su povezane slabim Van der Waalsovima vezama. Porastom temperature iznad temperature staklišta,  $T_g$ , ili temperature taljenja,  $T_m$ , plastomeri omekšavaju i lakše ih je formirati u željeni oblik. Hlađenjem im se vraća prvobitna

tvrdća i čvrstoća. U praksi, međutim, ponavljano grijanje i hlađenje dovodi do degradacije ili termalnog starenja termoplasta.

Neki primjeri termoplasta su polietilen (PE-LD), polistiren („stiropor“), polivinilklorid (PVC), polipropen (PP), polikarbonat (PC) itd.

- Duromeri (duroplasti) - Duromeri su mrežaste građe. Njihove makromolekule su povezane kovalentnom vezom. Polimerizacijom ne polimeriziraju do umrežavanja nego samo do 1. stupnja, pa su kao sirovina slični plastomerima. Proizvodi se oblikuju iz sirovina kojima se dodaju niskomolekulski spojevi koji služe za umrežavanje makromolekula. Povišenjem temperature ne omekšaju, već dolazi do raspada, tj. kidanja kovalentnih veza između makromolekula. Zato se ne mogu ponovno preoblikovati kao plastomeri. Netopivi su, netaljivi i ne mogu bubriti.
- Elastomeri - Elastomere čini velika skupina amorfni polimera koji imaju nisku temperaturu staklišta. Imaju karakterističnu sposobnost prolaska kroz velike elastične deformacije bez pucanja, mekani su i imaju nizak modul elastičnosti. Nakon prestanka naprezanja se odmah vrata u početnu duljinu. Građeni su od rahlo prostorno umreženih makromolekula. Netopivi su i bubre. Kemijski umreženi elastomeri su netaljivi, dok su fizikalno umreženi taljivi.

Građa plastomera, duromera i elastomera je prikazana na slici 2.3.

Vrste polimera Struktura	PLASTOMERI				ELASTOMERI		DUROMERI
	amorfni		kristalasti		elasto-plastomeri	umreženi	
	linearna	granata	linearna		rahlo umrežena		
shematski prikaz strukture							
strukturna svedenost	amorfna		djelomice kristalna, izotropna	djelomice kristalna, anizotropna	amorfna do slabo svedena		amorfna

Slika 2.3. Građa plastomera, elastomera i duromera [1]



U tablici 2.1. prikazani su najčešće korišteni polimeri.

Tablica 2.1. Tablica najčešće korištenih polimera [1]

Oznaka	Naziv na hrvatskom	Vrsta*	Oznaka	Naziv na hrvatskom	Vrsta*
ABS	akrilnitril/butadien/stiren	P	PIB	poliizobutilen	P
BR	butadienski kaučuk	E	PMMA	poli(metil-metakrilat) ( <i>pleksiglas</i> )	P
CA	celulozni acetat	P	POM	poli(oksimetilen)	P
CN	celulozni nitrat ( <i>celuloid</i> )	P	PP	polipropilen	P
CR	polikloroprenski kaučuk	E	PPO	poli(fenilen oksid)	P
EP	epoksidna smola	D	PPS	poli(fenil-sulfid)	P
NBR	akrilonitril/butadien kaučuk	E	PS	polistiren (polistirol)	P
NR	prirodni kaučuk	E	PSU	polisulfon	P
PA	poliamid ( <i>najlon</i> )	P	PTFE	poli(tetrafluor-etilen) ( <i>teflon</i> )	P
PBT	poli(butilen-tereftalat)	P	PUR	poliuretan ( <i>linearni</i> )	EP
PC	polikarbonat	P	PVC	poli(vinil-klorid)	P
PE	polietilen	P	PVDF	poli(viniliden-fluorid)	P
PEEK	poli(eter-eter-keton)	P	SAN	poli(stiren/akrilonitril)	P
PET	poli(etilen-tereftalat)	P	SBR	stiren-butadien kaučuk	E
PF	fenol-formaldehidna smola ( <i>bakelit</i> )	D	TPUR	poliuretan ( <i>elastoplastomerni</i> )	EP
PI	poliimid	P	UP	nezasićena poliesterska smola	D

\* P – plastomer, D – duromer, E – elastomer, EP – elastoplastomer

### 2.3. Svojstva polimera

Svojstva materijala su reakcije ili promjena stanja materijala izazvana raznim (unutarnjim ili vanjskim) djelovanjima. [2]

Svojstva polimernih materijala se mogu podijeliti na svojstva prikazana tablicom 2.2.

Tablica 2.2. Pregled nekih svojstava polimernih materijala [3]

Funkcijska (uporabna) svojstva	Naziv svojstva
MEHANIČKA	čvrstoća, istezljivost, modul elastičnosti, tvrdoća, žilavost
TRIBOLOŠKA	faktor trenja, otpornost na trošenje
TOPLINSKA	toplinska provodnost, toplinska rastezljivost, temperatura omekšavanja, postojanost oblika pri povišenoj temperaturi
ELEKTRIČNA	električna vodljivost, električni otpor, čvrstoća proboja, dielektrična svojstva

POSTOJANOST	kemijska postojanost
OSTALA SVOJSTVA	gustoća, propusnost svjetla, indeks loma

### 2.3.1. Mehanička svojstva

Mehanička svojstva se dijele u dvije skupine:

- Kratkotrajna mehanička ispitivanja - Udarnim opterećenjem se ispituje žilavost, a statičkim opterećenjem čvrstoća, modul elastičnosti i tvrdoća.
- Dugotrajna mehanička ispitivanja - Statičkim opterećenjem se ispituje statička izdržljivost (puzanje), a dinamičkim opterećenjem dinamička izdržljivost (umor materijala).

### 2.3.2. Tribološka svojstva

Tribološka svojstva polimera obuhvaćaju ponašanje polimera u uvjetima trenja. Polimeri imaju dobra tribološka svojstva što podrazumijeva mali faktor trenja i dobru otpornost na trošenje. Prednosti polimernih materijala u odnosu na druge konstrukcijske materijale su sljedeće:

- nema mikrozavarenih spojeva
- udubine neravnina popunjavaju se proizvodima trošenja polimernog materijala
- neosjetljivost prema stranim česticama[4]

### 2.3.3. Električna svojstva

Većina polimera su slabi električni vodiči zato jer elektroni tvore kovalentne veze između atoma vezanih na makromolekularni lanac što sprečava njihovo gibanje.

### 2.3.4. Kemijska postojanost

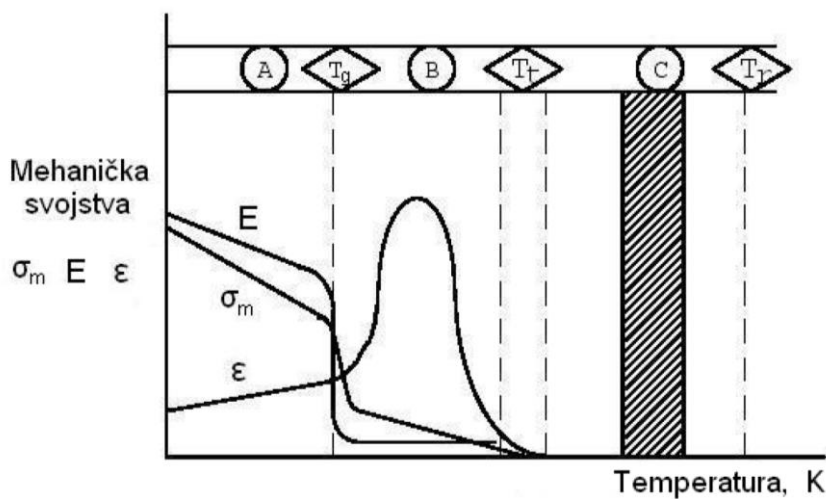
Polimeri imaju bolju kemijsku postojanost od metala i promjene su najčešće samo fizikalne, što znači da molekularna struktura ostaje nepromjenjiva. Dobra im je postojanost na djelovanje kiselina, lužina i otopina soli, dok je dosta slabija na organska otapala.

### 3.POSTUPCI ZAVARIVANJA POLIMERNIH MATERIJALA

Zavarivanjem se mogu spajati plastomerni materijali i fizikalno umreženi elastoplastomeri. Zavarivanje se vrši primjenom topline i tlaka s dodavanjem ili bez dodavanja dodatnog materijala.

Površine koje se spajaju se zagrijavaju do određene temperature. Porastom temperature zagrijavanja iznad temperature taljenja materijal dolazi u termoplastično stanje u kojemu je moguće provođenje zavarivanja kao posljedica difuzije molekula dodirnih površina. Pritiskom zagrijanih površina se ostvaruje zavareni spoj.

Da bi se postigao pravilno zavareni spoj treba biti precizno određena temperatura zavarivanja za određeni materijal, ispravan pritisak i brzina zavarivanja. Ponašanje plastičnih masa pri povišenim temperaturama te objašnjenje pojedinih promjena koje se događaju tokom zavarivanja može objasniti dijagram stanja (slika 3.1.).



A – energijski elastično stanje


$T_g$  – temperatura staklastog prijelaza

B – entropijski elastično stanje

$T_t$  – temperatura taljenja

C – elastoviskozno stanje

$T_r$  – temperatura razgradnje

 – područje primjene

$E$  – modul elastičnosti

$\sigma_m$  – rastezna čvrstoća

$\epsilon$  – istezanje

Slika 3.1. Dijagram stanja polimernih materijala tijekom zavarivanja [5]

Kod sobne temperature plastična masa je u krutom stanju. Dovođenjem topline raste temperatura, te materijal mekša jer olabavljaju sekundarne sile. One ne popuštaju odmah, ali lanci dobivaju mogućnost gibanja. Takvo toplinsko gibanje se zove Brownovo gibanje. Kod svih materijala povišenjem temperature opada čvrstoća, ali je kod plastičnih masa ta pojava mnogo izraženija. Promjene svojstava koje kod metala nastaju pri 500 °C, kod plastičnih masa se pojavljuju već na 50 °C. Iz dijagrama (slika 3.1.) se vidi da istežanje raste s povišenjem temperature, dok jako pada na niskim temperaturama.

Nagli pad čvrstoće s rastućom temperaturom ide sve do točke mekšanja ( $T_0$ ). Sad su sekundarne veze već prilično popustile, gibaju se segmenti lanaca, te je oslobođeno takozvano „mikro“ Brownovo gibanje. Prijelazom  $T_0$  materijal dolazi u termoelastično područje. Sekundarne veze i dalje nisu pokidane, ali su jako oslabljene. U termoelastičnom području materijal ima nagli porast istežanja, ono dostiže maksimum i onda opet naglo pada. Vlačna čvrstoća i elastičnost i dalje opadaju.

Daljnijim povećanjem temperature se dolazi do temperature tečenja ( $T_t$ ). Na toj temperaturi popuštaju sekundarne veze i oslobađa se „makro“ Brownovo gibanje, što znači da se neometano gibaju cijeli lanci. Istežanje i vlačna čvrstoća su u ovom području minimalni.

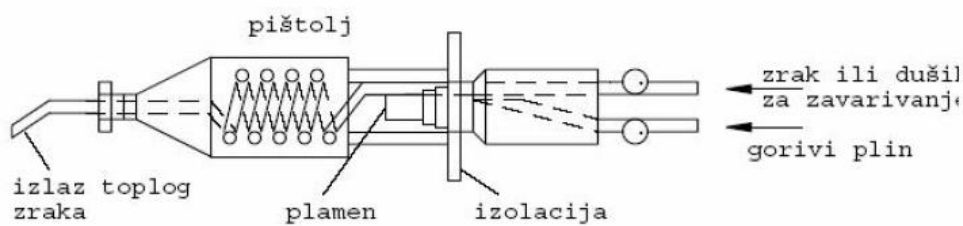
Prijelazom  $T_t$  se dolazi u termoplastično područje u kojem je moguće zavarivanje kao rezultat difuzije molekula dodirnih površina. Zavarivanje se mora oprezno izvoditi i treba paziti da se ne prekorače zadani parametri, zato što se blizu temperature tečenja nalazi temperatura raspada ( $T_r$ ).  $T_0$  je temperatura iznad koje dolazi do razaranja kemijskih veza, odnosno do raspada materijala.

Glavni načini zavarivanja plastomera su sljedeći:

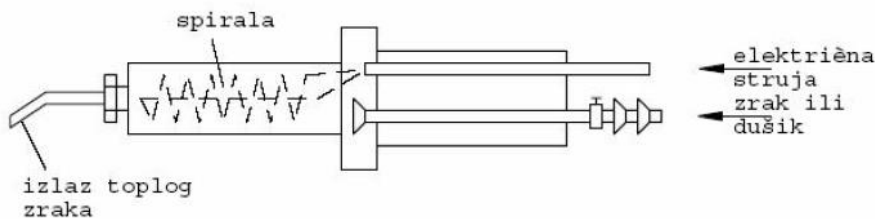
- zavarivanje toplim zrakom ili plinom
- zavarivanje zagrijanim elementom (kontaktno zavarivanje)
- zavarivanje strujama visoke frekvencije
- zavarivanje trenjem
- zavarivanje ultrazvukom
- polifuzijsko zavarivanje
- elektrofuzijsko zavarivanje

## 3.2. Zavarivanje toplim zrakom ili plinom

Zavarivanje toplim zrakom ili plinom je ručna tehnika zavarivanja prikazana na slikama 3.2 do 3.4. U vrućem plinskom pištolju struja zraka ili plina prolazi preko električno grijanog elementa i izlazi iz mlaznice. Zagrijan zrak je usmjeren na dijelove koje zavarujemo, te najčešće i na šipku dodatnog materijala koji je obično istog sastava kao i osnovni materijal. Pod djelovanjem topline navedeni dijelovi prelaze u termoplastično (tjestasto) stanje, gdje je moguća difuzija, te se pritiskom dijelovi spoje. Moguće je i zavarivanje bez dodatnog materijala. Zavarivanje toplim zrakom ili plinom se primjenjuje pri zavarivanju cijevi, rezervoara, ploča i ostalih profilnih konstrukcija. Glavna prednost ovog načina zavarivanja je ta što je oprema lako prenosiva. Međutim, to je spor proces i kvaliteta zavara ovisi o vještini zavarivača.



Slika 3.2. Pribor za zavarivanje (na zrak ili dušik)[5]



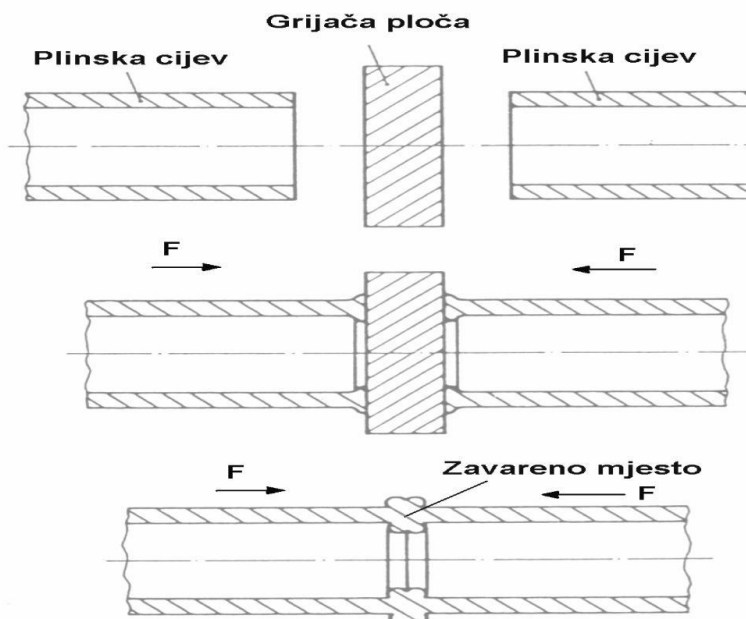
Slika 3.3. Pribor za zavarivanje (na električnu energiju)[5]



Slika 3.4. Prikaz zavarivanja polimernog materijala vrućim plinom [6]

### 3.3.Zavarivanje zagrijanim elementom

Zavarivanje vrućim elementom (slika 3.3.) je postupak zavarivanja gdje se površine koje se zavaruju zagriju pomoću vrućeg elementa, te se pritiskom međusobno zavare. Ovaj postupak je jedan od najjednostavnijih postupaka zavarivanja, funkcionalan je i lako se primjenjuje bez značajnije pripreme materijala. Također je i isplativ jer za zavarivanje nije potreban dodatni materijal.



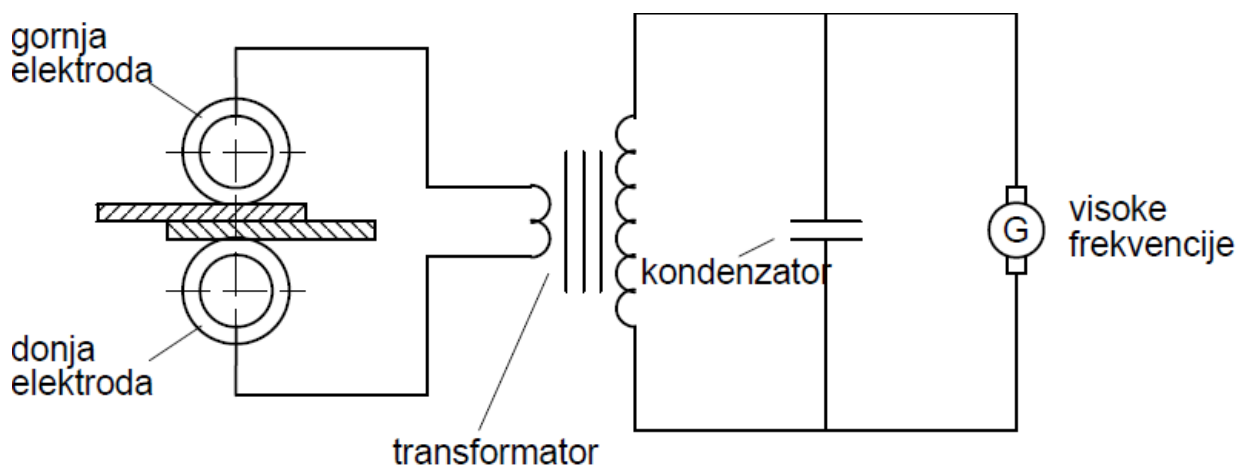
Slika 3.3. Shematski prikaz zavarivanja vrućim elementom[5]

Grijači su najčešće ravni, ali mogu biti i kompleksnih konstrukcija za trodimenzionalne profile dijelova za zavarivanje. Obično su izrađeni od dobro poliranog nehrđajućeg čelika. Najvažnija primjena zavarivanja vrućom pločom je spajanje termoplastičnih cijevi vodovoda i plinskih cjevovoda. Također se koristi u automobilskoj industriji u proizvodnji rezervoara i kod zavarivanja PVC okvira za vrata i prozore.

Glavni nedostatak ovakvog zavarivanja je taj što je vrijeme zavarivanja relativno dugo. Tipično traje oko 30 do 90 sekundi, a s većim dijelovima može trajati i do 30 minuta.

### 3.4. Zavarivanje strujama visoke frekvencije

Visokofrekventno zavarivanje, također poznato kao dielektrično zavarivanje, je metoda spajanja tankih dijelova od polarnog termoplastičnog materijala. Za spajanje se koristi elektromagnetska energija visoke frekvencije (13 do 100 MHz). Termoplast se stavlja između elektroda koje su u spoju s izmjeničnim potencijalom kao što je prikazano na slici 3.4. Električno polje uzrokuje osciliranje polarnih molekula u termoplastu, te se one orijentiraju s obzirom na polje. Energija generirana ovim postupkom uzrokuje porast temperature, što rezultira taljenjem materijala. U kombinaciji s pritiskom steznih šipki se dobije zavar.



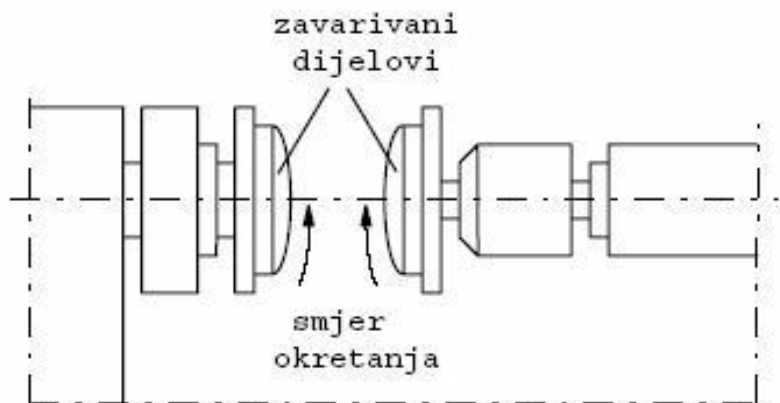
Slika 3.4. Prikaz zavarivanja strujama visoke frekvencije[5]

Pošto se ovakav način zavarivanja zasniva na vibraciji i orijentaciji nabijenih molekula radi generiranja topline, primjena je ograničena na plastike koje sadrže polarne molekule. Polivinilklorid (PVC) i poliuretan su najčešće termo plastike koje se zavaruju ovim postupkom.

### 3.5. Zavarivanje trenjem

Zavarivanje trenjem se postiže oslobađanjem topline uslijed međusobnog kontakta dva tijela koja se okreću u suprotnim smjerovima. Zagrijani dijelovi se uz pomoć pritiska čvrsto spoje.

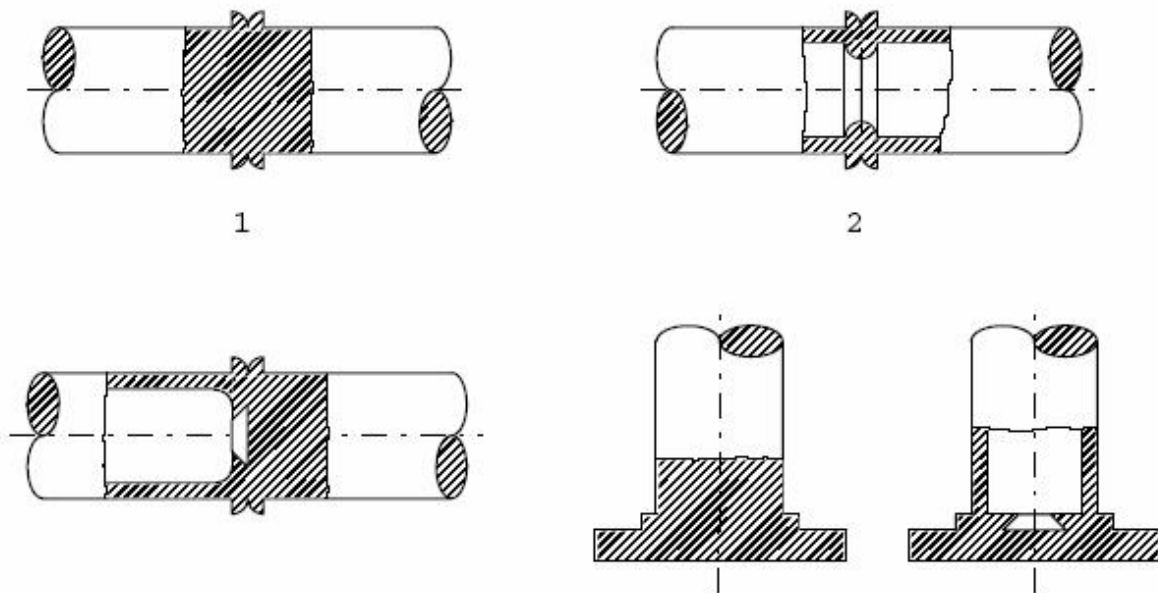
Da bi se izbjeglo pregrijavanje zone zavarivanja nužno je da se vremenskim trajanjem osigura puno taljenje dodirnih površina. Obično od pojave trenja do zaustavljanja stroja prođe 3-25 sekundi, pri čemu zavar potpuno otvrdne nakon 5-8 minuta nakon zaustavljanja stroja.



Slika 3.5. Zavarivanje trenjem[5]



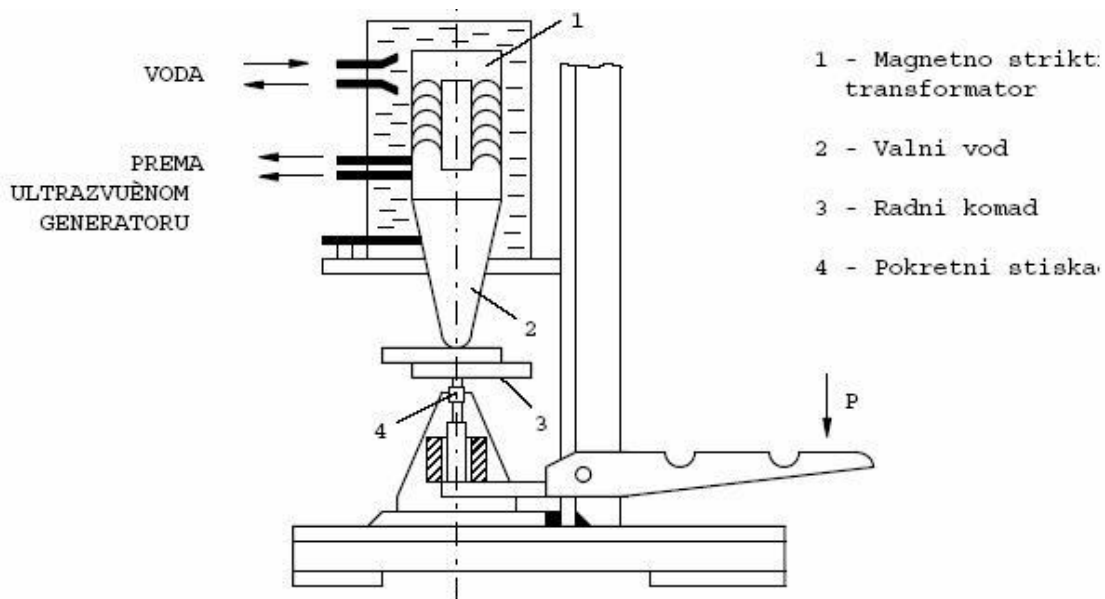
Jedan od glavnih nedostataka zavarivanja trenjem je ograničenje oblika zavarenih dijelova, te se trenjem mogu zavariti sljedeći oblici (slika 3.6.)[3]:



Slika 3.6. Oblici koji se mogu zavariti trenjem[5]

### 3.6. Zavarivanje ultrazvukom

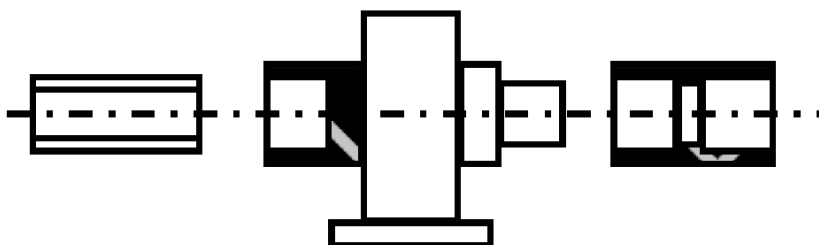
Kod ultrazvučnog zavarivanja (slika 3.7.) se koristi visokofrekventna mehanička energija zvuka kako bi se dobila toplinska energija potrebna za zavarivanje termoplasta. Obično se koriste frekvencije od 20 ili 40 kHz. Učinak zagrijavanja ultrazvukom varira s obzirom na stupanj kristalnosti zavarenog materijala. Ultrazvučno zavarivanje je brzi proces (vrijeme zavarivanja je obično manje od jedne sekunde) i može se lako automatizirati. Stoga je idealno za zavarivanje komponenti u masovnoj proizvodnji.



Slika 3.7. Zavarivanje ultrazvukom[5]

### 3.7. Polifuzijsko zavarivanje

Ovim postupkom mogu se spajati PEHD, PP i PVDF materijali cijevnih sustava i to na način da se dva kraja cijevi spajaju pomoću dodatnog elementa. Alat sa trnom i puškicom se zagrijava dok ne dostigne željenu temperaturu (250-270°C). Nakon postizanja odgovarajuće temperature na trn se navlači spojni element, a u puškicu se uvlači kraj cijevi. Po isteku vremena zagrijavanja cijev i spojni element se međusobno spajaju uguravanjem cijevi u spojni element. [7]



Slika 3.8. Postupak polifuzijskog zavarivanja[7]

## 4.ELEKTROFUZIJSKO ZAVARIVANJE KOMPONENATA POLIETILENA VISOKE GUSTOĆE (PE-HD)

### 4.1. Elektrofuzijsko zavarivanje

Elektrofuzijsko zavarivanje (slika 4.1.) je, uz sučeljeno zavarivanje, glavni način fuzijskog zavarivanja. To je postupak zavarivanja gdje se dva kraja polietilenske cijevi spajaju pomoću spojnog elementa, uz djelovanje toplinske energije. Toplinska se energija dobiva na navojima elektrootporne žice koja se nalazi u spojnom elementu i kroz koju protječe električna struja. Proces je potpuno automatiziran zbog čega se spojni element i cijev moraju nalaziti u točno određenim tolerancijama.



Slika 4.1. Elektrofuzijsko zavarivanje[8]

## 4.2. Prednosti polietilena

- dugi vijek trajanja - vijek trajanja armatura izrađenih od polietilena visoke gustoće se procjenjuje na minimalno 50 godina
- otpornost na kemikalije
- otpornost na koroziju - za razliku od tradicionalnih metalnih proizvoda, polietilen ne hrđa i ne korodira
- lagan je
- minimalan utjecaj na okoliš
- otpornost na udarce, čak i na niskim temperaturama
- glatka površina

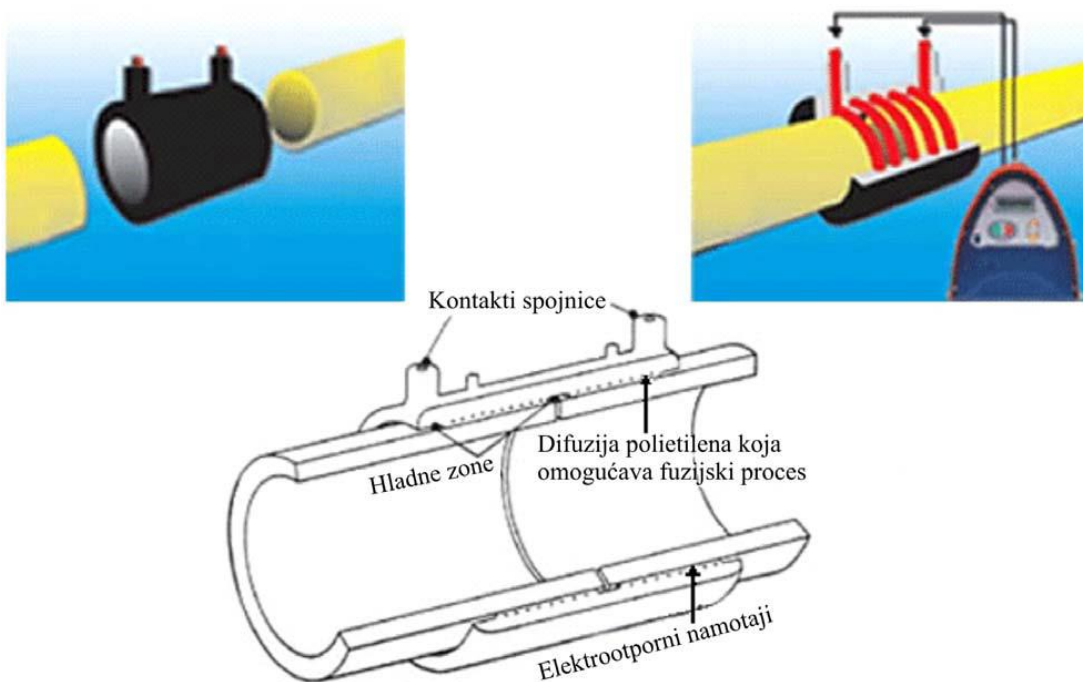
## 4.3. Priprema za zavarivanje

Cijev se rotacijskim nožem odreže pod kutom od  $90^\circ$ . Ako se cijev ne uspije orezati pod  $90^\circ$  može doći do toga da je žica za zagrijavanje otkrivena, što može rezultirati kratkim spojem, pregrijavanjem i nekontroliranim topljenjem.

Da bi se dobio dobar zavar treba se skinuti vanjski oksidni sloj u dubini od minimalno 0.2 mm. Oksidni sloj se skida na dužini nešto većoj od dužine spojnog elementa. Pripremljenu površinu je potrebno očistiti i odmastiti. Odmašćuju se sva mjesta spajanja, što uključuje i spojne elemente, osim ako se spojni elementi ne stavljaju direktno iz zaštitne vrećice. Cijevi se moraju potpuno osušiti prije procesa zavarivanja.

PE cijevi su izrađene od fleksibilnog materijala, pa zna doći do pojave ovalnosti, što je nepovoljno za elektrofuzijsko zavarivanje. Stoga treba paziti da je presjek cijevi što okrugliji.

Zatim se sastavlja spojni element i cijev. Očišćeni kraj cijevi se ugura u spojnicu sve do graničnika, te se pomoću obujmice i vijaka učvrsti sedlo na cijev. Nakon toga je potrebno stegnuti spojni element i cijev, što se vrši pomoću takozvanog stega. Stegama se centriraju krajevi cijevi i eliminiraju ovalnosti. Onda se spojni element priključuje na elektrofuzijsku kontrolnu jedinicu, te slijedi proces elektrofuzijskog zavarivanja čiji je shematski prikaz dan na slici 4.2.



Slika 4.2. Shematski prikaz elektrofuzijskog zavarivanja PE cijevi [9]

#### 4.4 Postupak zavarivanja

- priključiti stroj za zavarivanje na odgovarajući izvor struje.
- uključiti stroj za zavarivanje
- očitati podatke o spojnom elementu. Svaki elektrofuzijski spojni element opremljen je s odgovarajućim nosačem podataka za njegov fuzijski ciklus. Podaci o elementu prenose se s tog nosača u kontrolnu jedinicu pomoću čistača štapnog koda.
- kontrolna jedinica stroja za zavarivanje uspoređuje očitane vrijednosti za stvarno izmjerenim vrijednostima spojnog elementa na mjestu spajanja. Ukoliko se podaci podudaraju tj. nalaze u odgovarajućim tolerancijama kontrolna jedinica dozvoljava početak zavarivanja. Ukoliko se podaci ne podudaraju ne možemo započeti s procesom zavarivanja.

Kontrolna jedinica samostalno vodi i regulira proces zavarivanja. Mjereći vanjsku temperaturu i vrijednost struje napajanja određuje vrijeme zavarivanja kao i potrebno vrijeme hlađenja zavarenog spoja. Ukoliko dođe do bilo kakvog poremećaja - prekida kontakta sa spojnim elementom, pada ili porasta napona odnosno frekvencije struje te vanjske

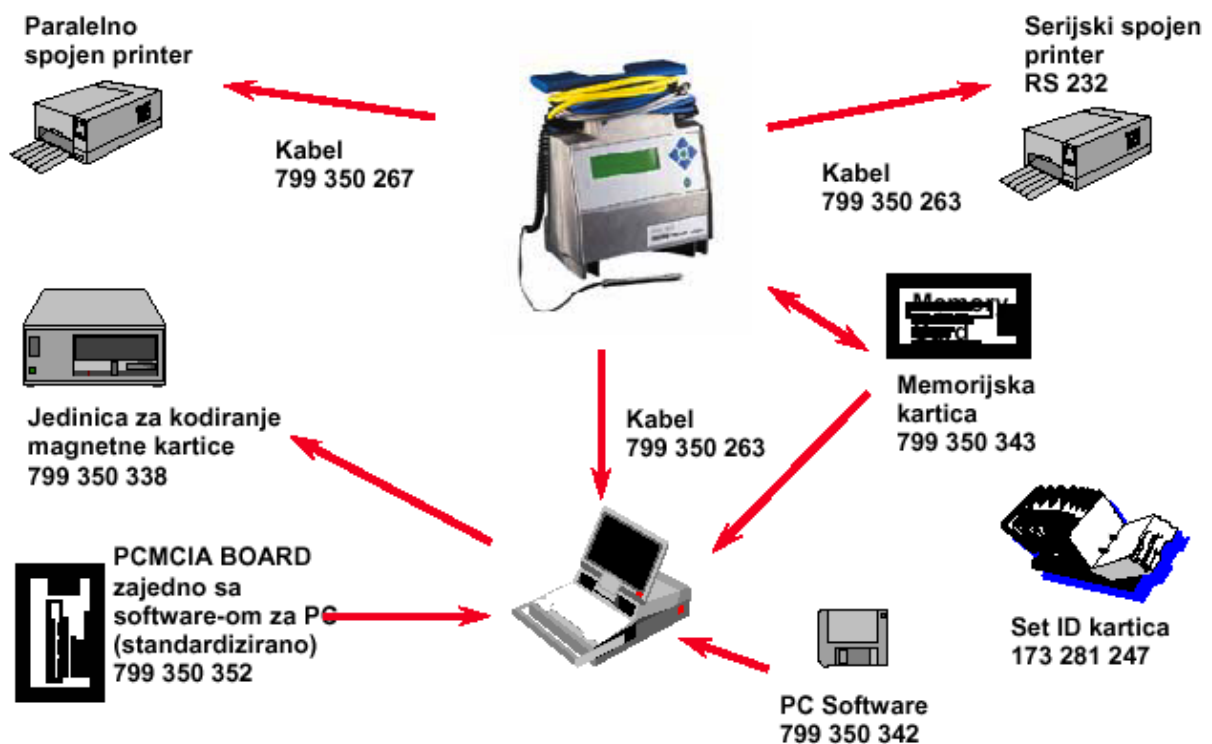
temperature izvan dozvoljenog područja - kontrolna jedinica automatski prekida proces zavarivanja i ispisuje odgovarajući broj greške.

Sva događanja u procesu zavarivanja pohranjuju se na dva mjesta - na unutarnju i tzv. vanjsku memoriju. Ispis pohranjenih podataka vrši se jednostavnim priključenjem kontrolne jedinice na štampač ili računalo.

## 4.5 Ispis podataka

Ispis podataka može biti pojedinačni ili grupni. Ispis mora sadržavati slijedeće:

- redni broj zavara
- broj stroja za zavarivanje
- datum i vrijeme zavarivanja
- tip, dimenziju, serijski broj i oznaku proizvođača spojnog elementa
- izmjereni otpor i napon u toku zavarivanja
- temperaturu okoline u trenutku zavarivanja
- vrijeme zavarivanja
- rezultat zavarivanja i oznaku eventualne pogreške
- datum zadnjeg servisa stroja za zavarivanje



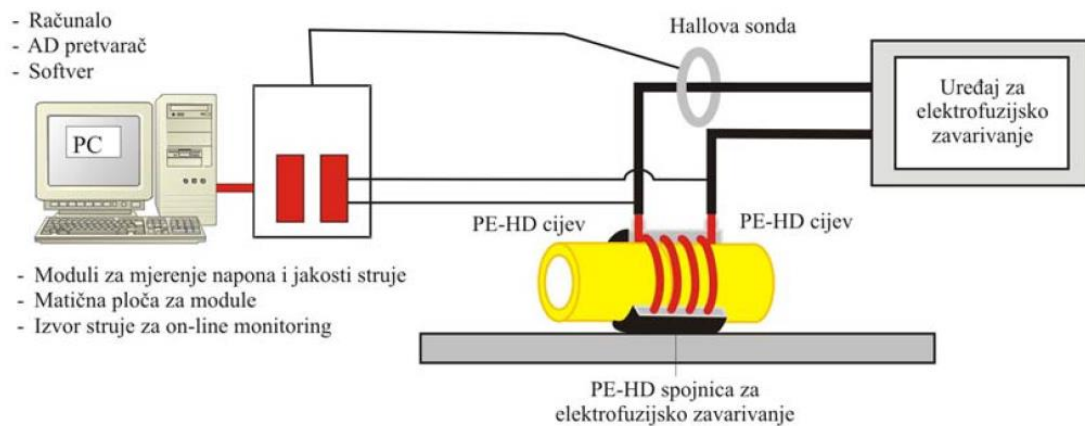
Slika 4.3 Ispis podatka kod elektrofuzijskog zavarivanja[9]

Preporučuje se da ispis sadrži:

- osobni broj operatera
- oznaku mjesta zavarivanja

#### 4.6. Eksperimentalno snimanje parametara zavarivanja

„On-line monitoring“ sustav je sustav preciznog mjerenja elektrofuzijskog zavarivanja. On vrši kontrolu nad zavarivanjem uz praćenje i očitavanje promjena napona i struje tijekom trajanja zavarivanja. „On-line monitoring“ sustav pruža i različite dodatne mogućnosti naknadne statističke obrade parametara zavarivanja. Shematski prikaz principa mjerenja promjene vrijednosti napona i struje je prikazan na slici 4.4. Indirektno (off-line) se iz mjerenih parametara izračunavaju trenutne vrijednosti otpora, snage i energije utrošene na zavarivanje. Provedeno ispitivanje se vršilo na tri vrste spojnica promjera 32 mm, 160 mm i 225 mm.

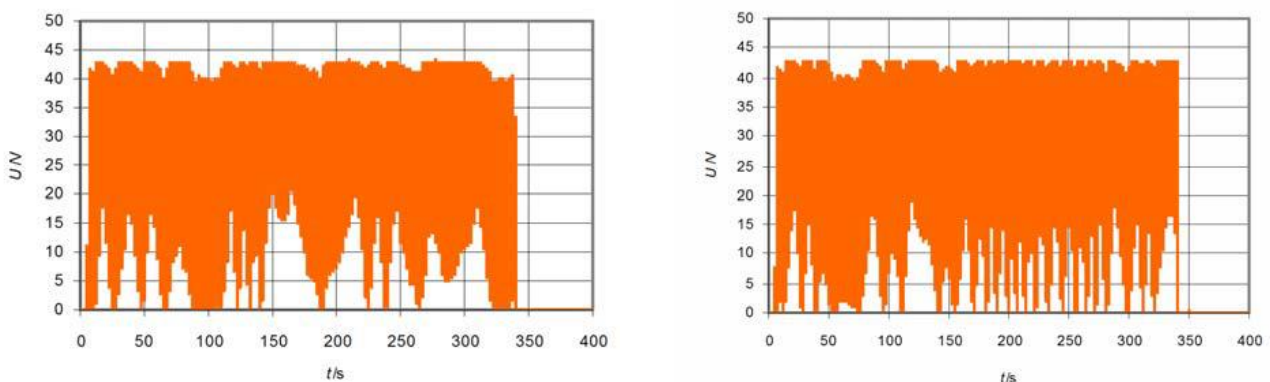


Slika 4.4. Shematski prikaz „On-line monitoring sustava“ [9]

Vrši se snimanje bar-koda pojedine spojnice ili sedla kako bi se upisali predefinirani parametri proizvođača spojnice u memoriju glavnog uređaja za zavarivanje. Nakon toga se pokreće sustav ispitivanja dinamičkih parametara kao i sam proces zavarivanja.

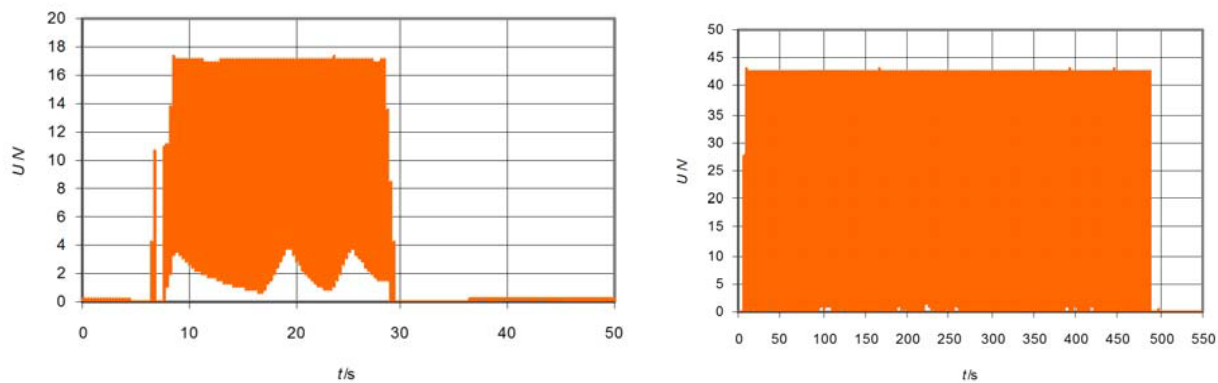
## 4.7. Rezultati mjerenja

Rezultati mjerenja su prikazani u nastavku. Tako je na slici 4.5. a) i b) prikazan napon tijekom zavarivanja na spojnici od 160 mm. Naime, na istom promjeru amplitudna modulacija je nastupila u oba slučaja. U a) dijagramu vidi se da je u većem pojasu nastupila blaga simetrija što upućuje na simetrično grijanje i hlađenje. Primjer dijagrama b) je nešto asimetričniji dok se na slici 4.10. očituje ista količina disipirane energije. Iz dijagrama 4.8. vidljivo je da uz djelatni otpor postoji i induktivna komponenta otpora ( $X_L$ ) zbog grijača (zavojnice). Navedena induktivna komponenta dijagramski se prikazuje kao amplitudna modulacija (skok ili pad) koja se ponavlja u nejednakim intervalima za vrijeme procesa zavarivanja. Također se može zaključiti (usporedbom dva mjerenja na istom promjeru - 160 mm) da bez obzira na isti profil elementa za zavarivanje postoje očite razlike koje su vidljive i u grafičkom prikazu otpora pojedinog elementa. Tako je ovdje prikazan dijagram za različite promjere kako bi se vjerno uočila kompenzacija i impedancija na različitim spojnicama. Isto tako na slici 4.10. a) prikazana je disipirana količina energije na grijaču spojnice što je identičnog nagiba tangente i finalnog „y“ odsječka za isti presjek, dok na primjeru 4.10. b) u usporedbi sa 4.10. a) vidi se da je potrošena veća količina energije upravo zbog većeg promjera i dužeg izlaganja strujnog kruga trošila narinutom naponu i struji. [10]

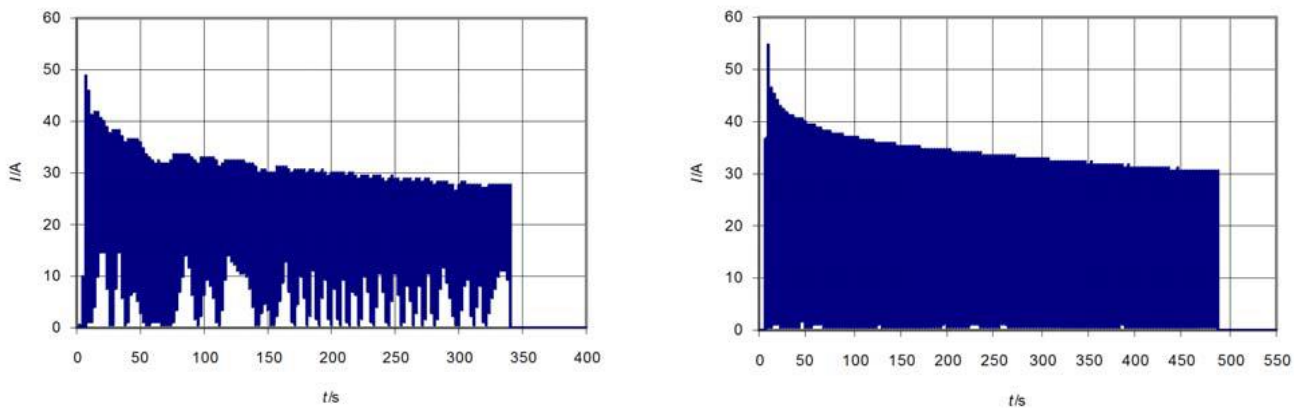


Slika 4.5. Izmjereni napon na promjeru cijevi 160 mm [10]

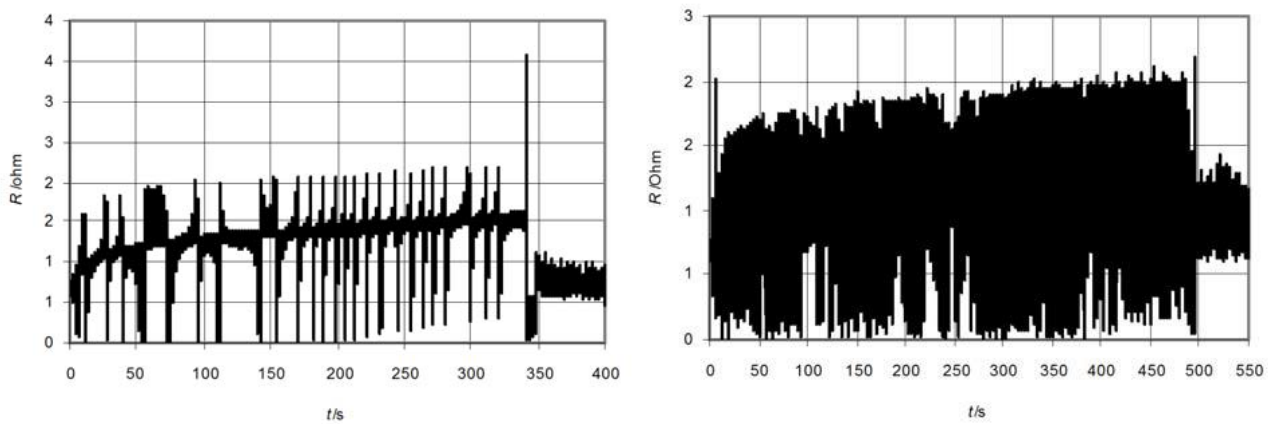




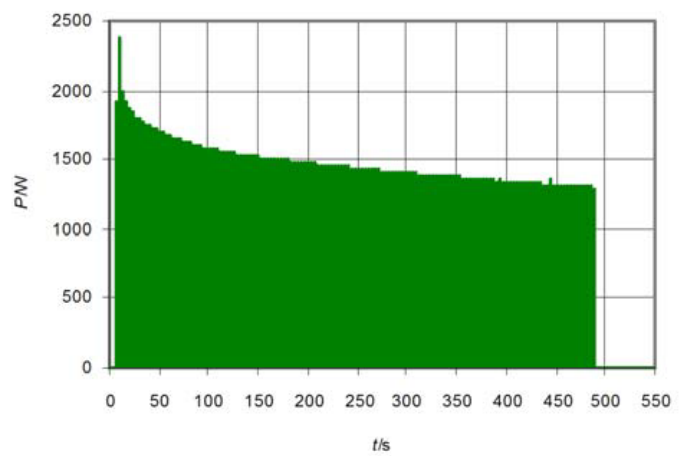
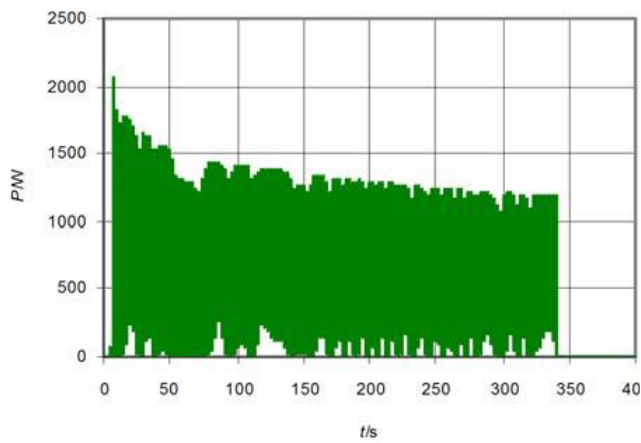
Slika 4.6. Izmjereni naponi za promjer cijevi a) 32 mm i b) 225 mm [10]



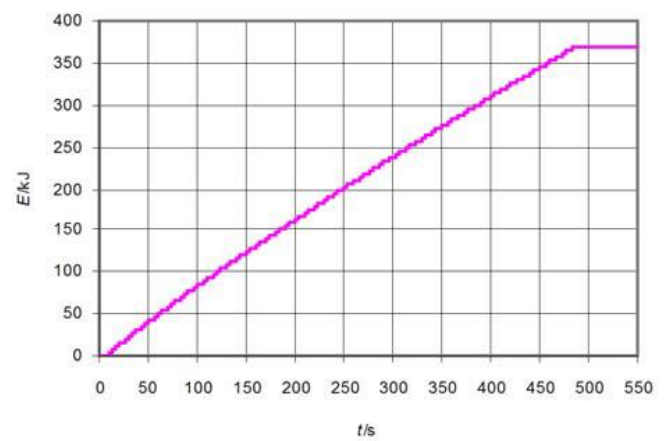
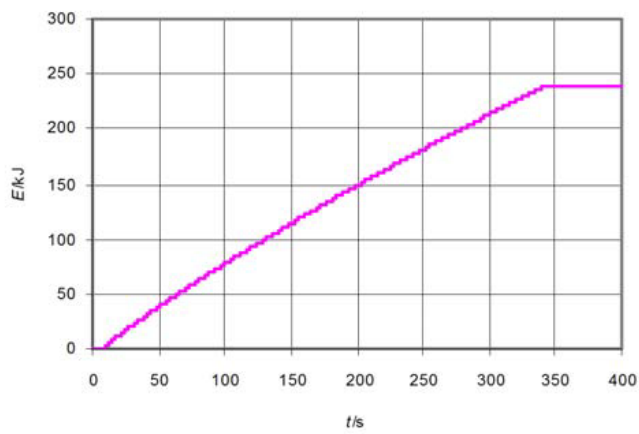
Slika 4.7. Izmjerene jakosti struje za promjer cijevi a) 32mm i b) 225 mm [10]



Slika 4.8. „Off-line“ izračunat otpor za promjer cijevi a) 32mm i b) 225mm [10]



Slika 4.9. „Off-line“ izračunata snaga za promjer cijevi a) 32mm i b) 225mm [10]



Slika 4.10. „Off-line“ izračunata količina energije za promjer cijevi a) 32mm i b) 225mm [10]

## 5. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog završnog rada je bio obraditi elektrofuzijsko zavarivanje polimera. Prva tri poglavlja obuhvaćaju teorijsku obradu, dok je u četvrtom poglavlju opisan eksperimentalni postupak elektrofuzijskog zavarivanja komponenata od polietilena visoke gustoće (PE-HD).

U uvodu završnog rada je navedena primjena polimera i njihove glavne karakteristike. Zbog svoje jednostavne proizvodnje i niske cijene polimeri spadaju među najčešće korištene materijale.

Zatim je objašnjena osnovna struktura polimera. Oni su sačinjeni od makromolekula - dugačkih molekula nastalim spajanjem manjih molekula, takozvanih monomera. Monomeri se povezuju u polimere postupkom koji se naziva polimerizacija. S obzirom na građu makromolekula i na stupanj polimerizacije polimeri se dijele u više kategorija. Nas najviše zanimaju plastomeri (ili termoplasti) zbog svog svojstva mekšanja na povišenim temperaturama i mogućnošću zavarivanja.

U trećem poglavlju je objašnjeno ponašanje plastomera na povišenim temperaturama, te su opisane pojedine promjene koje se događaju tokom zavarivanja. Zatim su navedeni i ukratko opisani osnovni postupci zavarivanja.

Posebna važnost je stavljena na elektrofuzijsko zavarivanje, čijom razradom započinje eksperimentalni dio završnog rada. Prikazani su rezultati mjerenja glavnih parametara zavarivanja (napon i jakost struje) za tri vrste spojnica različitih presjeka. Također su prikazani iznosi otpora, snage i količine energije koji su dobiveni pomoću izmjerenih iznosa napona i struje. Iz eksperimentalnog dijela se može zaključiti da je proces stabilan, ponovljivost parametara je osigurana i moguća je detekcija greške u slučaju neispravnosti nekog elementa sustava.

## LITERATURA

- [1] Kladarić I. Presentacija Materijali 1: Polimeri, dostupno na <http://www.sfsb.unios.hr/~ikladar/Materijali%20I/Podjela%20polimeria.pdf>, pregledano 14.lipnja 2016.
- [2] Dostupno na [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1464849561-0-polimeri.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1464849561-0-polimeri.pdf), pregledano 14.lipnja 2016.
- [3] Perović M. Zavarivanje polimera, diplomski rad, Filozofski fakultet u Rijeci, 2010.
- [4] Kladarić I. Presentacija Materijali 1: Polimeri, dostupno na <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Svojstva%20polimeria.pdf>, pregledano 15.lipnja 2016.
- [5] Dunder M. Predavanja Presentacija Polimeri dostupno na <https://www.ffri.hr/~mdundjer/>, pregledano 15.lipnja 2016.
- [6] Dostupno na <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/welding-technologies-for-polymers-and-composites/>, pregledano 03.kolovoza 2016.
- [7] Dostupno na <http://www.ptmg.hr/media/radovi/zavarivanje-polifuzijsko.pdf>, pregledano 06.kolovoza 2016.
- [8] Dostupno na <http://www.ptmg.hr/media/radovi/zavarivanje-elektrofuzijsko.pdf>, pregledano 06.kolovoza 2016.
- [9] Samardžić I., Raos P., Štefanija K., Blažević M. Monitoring parametara elektrofuzijskog zavarivanja PE-HD cijevi, dostupno na [https://bib.irb.hr/datoteka/261701.2\\_2\\_Samardzic.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/261701.2_2_Samardzic.pdf), pregledano 09.kolovoza 2016.
- [10] Samardžić, I., Dunder, M., Starčević, V., Marić, D., Horvat, M., Kondić, V. Primjena On-line monitoring sustava za mjerenje napona i jakosti struje kod zavarivanja // *Zavarivanje-Welding 2016* / Bauer., B ; Garašić, Ivica (ur.). Opatija : Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, 2016. 171-180.
- [11] Kalpakjian, S., Schmid Steven R. Manufacturing Engineering and Technology, Sixth Edition in SI Units

- [12] Predavanja: Strojarska tehnologija 2, <https://www.ffri.hr/~mdundjer/>, pregledano 01.srpnja 2016.
- [13] Matić A. Lasersko zavarivanje plastike, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, dostupno na [http://repositorij.fsb.hr/989/1/05\\_07\\_2010\\_Ante\\_Matic\\_Zavrzni\\_rad.pdf](http://repositorij.fsb.hr/989/1/05_07_2010_Ante_Matic_Zavrzni_rad.pdf), pregledano 06.srpnja 2016.
- [14] Dostupno na [http://www.twi-global.com/\\_resources/assets/inline/full/0/9666.jpg](http://www.twi-global.com/_resources/assets/inline/full/0/9666.jpg), pregledano 03.kolovoza 2016.
- [15] Grewell D., Benatal A. Welding of Plastics: Fundamentals and New Developments, dostupno na <http://www.abe.iastate.edu/files/2011/11/David-Grewells-Welding-Review.pdf>, pregledano 05.kolovoza 2016.
- [16] Plassion: Electrofusion Installation Manual, dostupno na [http://www.plasson.com/downloads/action/show\\_file/f/43](http://www.plasson.com/downloads/action/show_file/f/43), pregledano 09.kolovoza 2016
- [17] Fistončić M. Elektrofuzijsko zavarivanje, dostupno na <http://www.ptmg.hr/media/radovi/zavarivanje-elektrofuzijsko.pdf>, pregledano 09.kolovoza 2016.