

Ultrazvučno zavarivanje termoplasta

Beloša, Enio

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:968654>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-03**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 344/PS/2020

Ultrazvučno zavarivanje termoplasta

Enio Beloša, 4204/601

Varaždin, listopad 2020. godine



Sveučilište Sjever

SVEUČILIŠTE SJEVER
PROIZVODNO STROJARSTVO

Završni rad br. 344/PS/2020

Ultrazvučno zavarivanje termoplasta

Student:

Enio Beloša, 4204/601

Mentor:

Marko Horvat, dipl. ing.

Varaždin, listopad 2020. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo		
PRISTUPNIK	Enlo Beloša	MATIČNI BROJ	4204/601
DATUM	30.09.2020.	KOLEGIJ	Tehnike spajanja
NASLOV RADA	Ultrazvučno zavarivanje termoplasta		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Ultrasonic welding of thermoplastics		
MENTOR	Marko Horvat, dipl.ing.	ZVANJE	viši predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Katarina Pisačić, dipl.ing., viši predavač		
	2. Marko Horvat, dipl.ing., viši predavač		
	3. dr. sc. Zlatko Botak, viši predavač		
	4. Damir Mađerčić, dipl.ing., viši predavač		
	5.		

Zadatak završnog rada

BROJ	344/PS/2020
OPIS	U Završnom radu je potrebno obraditi sljedeće točke: <ul style="list-style-type: none">• dati uvod u osnove polimernih materijala: osnovni pojmovi, terminologija, klasifikacija, mehanizmi nastanka, svojstva i primjena• obraditi osnovnu problematiku/mogućnosti zavarivanja polimera• ukratko opisati osnovne postupke zavarivanja polimera• temeljem dostupne literature detaljnije proučiti i opisati postupak zavarivanja polimera (termoplasta) ultrazvukom• u zaključku Završnog rada dati osvrt na zadanu temu

ZADATAK URUČEN

30.09.2020.



POTPIS MENTORA

Predgovor

Završni rad sam izradio samostalno uz stručnu pomoć mentora i koristeći se znanjem stečenim na Sveučilištu Sjever.

Zahvaljujem se svim profesorima na prenesenom znanju, kolegama i prijateljima koji su mi pomogli na bilo koji način, profesoru dipl. ing. Marku Horvatu na mentorstvu i pomoći oko izrade završnog rada.

Posebno zahvaljujem svojim roditeljima, Branku i Mirjani, djevojci Mariji, na strpljenju i bezuvjetnoj podršci.

Sažetak

Završni rad sadrži teorijski opis i klasifikaciju polimera, klasifikaciju i postupke zavarivanja plastičnih masa s detaljnom analizom ultrazvučnog zavarivanja plastičnih masa. Obrađene su osnovne značajke polimera i njihova podjela, deformacijska stanja i svojstva te njihovo ponašanje na povišenim temperaturama. Opisane su plastične mase, njihova podjela i primjena te su analizirani najvažniji postupci zavarivanja plastičnih masa. Posebno je izdvojeno i analizirano ultrazvučno zavarivanje. Opisan je postupak ultrazvučnog zavarivanja i najvažniji dijelovi uređaja s fokusom na projektiranje i proizvodnju sonotroda. Na kraju su objašnjena osnovna načela ultrazvučnog zavarivanja metala i termoplasta s analizom pozitivnih i negativnih čimbenika korištenja takvog postupka u strojarskoj proizvodnji.

Ključne riječi: polimeri, plastične mase, zavarivanje polimera i plastičnih masa, ultrazvučno zavarivanje

Summary

This paper contains a theoretical description and classification of polymers, classification and welding procedures of plastic masses with a detailed analysis of ultrasonic welding of plastic masses. The basic characteristics of polymers and their division, deformation states and properties, and their behavior at elevated temperatures are explained. Plastic masses, their division and application are described and the most important welding procedures of plastic masses are analyzed. Ultrasonic welding was singled out and analyzed. The process of ultrasonic welding and the most important parts of the device with a focus on the design and production of welding horns are described. Finally, the basic principles of ultrasonic welding of metals and thermoplastics are explained with the analysis of positive and negative factors of using such a process in mechanical engineering.

Keywords: polymers, plastic masses, welding of polymers and plastic masses, ultrasonic welding

Popis korištenih oznaka i kratica

DP – stupanj polimerizacije

M_0 - molekularna masa ponavljane jedinice

M_n - molekularna masa polimerne molekule

PE - polietilen

PP - polipropilen

PVC – poli(vinil-klorid)

PS - polistiren

PET – poli(etilen-tereftalat)

PVC/VAC - poli(vinil-klorid/vinil-acetat)

PC - polikarbonat

T_g – staklišta - prijelaz iz staklastog u gumasto (viskoelastično) stanje [°C]

T_m - tališta - prijelaz iz kristalnog u kapljevito (viskofluidno) stanje [°C]

T_f - tečišta - prijelaz iz gumastog (viskoelastičnog) u viskofluidno stanje (kapljevito) [°C]

T_d - temperatura razgradnje polimera – degradacija polimera [°C]

PEHD – polietilen visoke gustoće

PELD – polietilen niske gustoće

PB - poliizobutilen

PMMA - poli(metil-metakrilat)

ABS - (akrilonitril-butadien-stiren)

E – modul elastičnosti [N/mm²]

R_m – vlačna čvrstoća [N/mm²]

A – istežanje [l]

PTFE - poli(tetrafluoroetilen)

List of used tags and abbreviations

DP – degree of polymerization

M_0 - molecular weight of the repeating unit

M_n - molecular weight of the polymer molecule

PE - polyethylene

PP - polypropylene

PVC – poly (vinyl-chloride)

PS - polystyrene

PET – poly (ethylene-terephthalate)

PVC/VAC - poly (vinyl-chloride)/vinyl-acetate)

PC - polycarbonate

T_g – glass transition - transition from glassy to rubbery (viscoelastic) state [°C]

T_m - melting point - the transition from crystalline to liquid (viscous fluid) state [°C]

T_f - flow point - transition from rubber (viscoelastic) to viscous fluid state (liquid) [°C]

T_d - polymer degradation temperature - polymer degradation [°C]

PEHD – high density polyethylene

PELD – low density polyethylene

PB - polyisobutylene

PMMA - poly (methyl-methacrylate)

ABS - (acrylonitrile-butadiene-styrene)

E – modulus of elasticity [N/mm²]

R_m – tensile strength [N/mm²]

A – strain [/]

PTFE - poly (tetrafluoroethylene)

Sadržaj:

Uvod	1
1. Polimeri i polimerni materijali	3
1.1. Osnovni pojmovi i terminologija	3
1.2. Podjela polimera i polimernih materijala	6
1.2.1. Podjela polimera prema podrijetlu	6
1.2.2. Polimeri prema reakcijskom mehanizmu nastajanja	6
1.2.3. Vrste ponavljanih jedinica	7
1.2.4. Oblik makromolekule	8
1.2.5. Podjela polimera prema primjeni	9
1.2.6. Stupanj uređenosti makromolekula	11
1.2.7. Ponašanje polimera na povišenoj temperaturi	12
1.3. Fizička ili deformacijska stanja polimera	14
1.4. Svojstva polimera	18
2. Zavarivanje polimera i plastičnih masa	20
2.1. Općenito	20
2.2. Plastične mase	20
2.2.1. Podjela i primjena plastičnih masa	21
2.2.2. Zavarivanje plastičnih masa	23
2.2.3. Ponašanje plastičnih masa pri zavarivanju	24
3. Postupci zavarivanja plastičnih masa	26
3.1. Zavarivanje trenjem	27
3.2. Zavarivanje toplim zrakom ili plinom	30
3.3. Visokofrekventno zavarivanje	33
3.4. Zavarivanje zagrijanim elementom	35
4. Zavarivanje ultrazvukom	37
4.1. Tehnologija ultrazvuka	37
4.2. Postupak zavarivanja i primjena	38
4.3. Uređaj i oprema za ultrazvučno zavarivanje	41
4.4. Projektiranje i proizvodnja sonotroda za ultrazvučno zavarivanje	45
4.5. Osnovna načela ultrazvučnog zavarivanja metala i plastomera	48
5. Zaključak	50
LITERATURA	52

Uvod

Prirodni polimeri kao što su pamuk, vuna koža, svila, drvo, potječu iz biljaka i životinja, a koriste se već stoljećima. Ostali prirodni polimeri poput proteina, enzima, škroba i celuloze važni su u biološkim i fiziološkim procesima u biljkama i životinjama. Pomoću brojnih suvremenih alata za znanstveno istraživanje moguće je odrediti molekulsku strukturu polimera što utječe na razvoj brojnih novih polimera koji se sintetiziraju iz malih organskih molekula. Plastika, guma i razni vlaknasti materijali svrstavaju se u grupu sintetskih polimera. Sintetski polimeri mogu se proizvesti jeftino, a njihova svojstva su uglavnom puno bolja u odnosu na prirodne polimere. U brojnim primjenama metalni i drveni dijelovi danas su uspješno zamijenjeni plastikom koja ima zadovoljavajuća svojstva, a može se proizvesti po znatno nižoj cijeni.

Plastične mase su sastavljene od makromolekularnih organskih spojeva, a takvi spojevi nastaju sintetskim putem. Primjena plastičnih masa započela tek prije pedesetak godina, a danas se ovaj materijal koristi u raznim područjima ljudske djelatnosti. Najvažnije područje primjene plastičnih masa je u automobilske i zrakoplovne industriji, a također koriste u medicini, poljoprivredi, farmaciji, električnoj industriji, u proizvodnji namještaja, kućanskih uređaja, ambalaža za hranu. Na povišenim temperaturama i pod djelovanjem mehaničke sile ili pritiska, plastične mase se mogu oblikovati, a potom takav dobiveni oblik mogu zadržati. Za njihovu proizvodnju najčešće se koristi sirova nafta, ali u kombinaciji s raznim dodacima kao što su omekšivači, aditivi, punila, antioksidansi.

Imaju brojne atraktivne prednosti i osobine pred ostalim (prirodnim) materijalima: otpornost na koroziju, izvanredna električna izolacija, mali faktor trenja, lako oblikovanje, dobra otpornost na vibracije, većina je otporna na kiseline i lužine, dobar omjer čvrstoće i mase, dobra žilavost. Negativno svojstvo je njihova biološka nerazgradivost što je uzrok veliki ekoloških problema. Plastične mase se zbog toga uspješno koriste kao konstrukcijski materijal, a uskoro bi mogle zamijeniti prirodne materijale u potpunosti, tako da će predmeti izrađeni od kosti, stakla, drva, nekih metala biti rijetkost.

Postoji mnogo opcija za spajanje plastičnih materijala, ali svaka od tih opcija ima svojih prednosti i ograničenja. Plastične mase spajaju se lijepljenjem, vijcima i uglavnom zavarivanjem. Postupci zavarivanja metalnih materijala, vrlo su slični postupcima zavarivanja plastičnih masa. Najviše se zavaruju termoplasti čije se zagrijavanje i hlađenje može ponavljati. Zavarivanje termoplasta vrši se u tri faze: priprema površine, primjena topline i tlaka, hlađenje.

Najvažniji postupci zavarivanja plastičnih masa su: zavarivanje toplim zrakom ili plinom, zavarivanje strujama visoke frekvencije, zavarivanje trenjem, zavarivanje zagrijanim elementom i zavarivanje ultrazvukom.

Ultrazvučno zavarivanje jedan je od najpopularnijih postupaka zavarivanja plastičnih masa. Zavarivanje ultrazvukom najbrža je poznata tehnika zavarivanja, s vremenom zavarivanja obično između 0,1 i 1,0 sekunde. Ultrazvučno zavarivanje koristi ultrazvučnu energiju na visokim frekvencijama (20–40 kHz) za stvaranje mehaničkih vibracija male amplitude. Vibracije generiraju toplinu, dolazi do omekšanja plastične mase, a uz pomoć pritiska se vrši spajanje.

U ovom radu biti će objašnjeni postupci zavarivanja plastičnih masa s posebnim naglaskom na ultrazvučno zavarivanje.

1. Polimeri i polimerni materijali

1.1. Osnovni pojmovi i terminologija

Polimeri su visokomolekulni spojevi, a nastaju tako da se kovalentnim kemijskim vezama povezuje veliki broj niskomolekulnih spojeva koje nazivamo monomerima. *Kovalentnom vezom* se postiže neutralna elektronska konfiguracija, a veza se ostvaruje povezivanjem dva ili više atoma nemetala. Polimeri su dobili ime prema grčkim riječima *poli* (grč. πολυ) što znači mnogo i *meros* (grč. μέρος) što znači dio. Polimeri se ne mogu pojavljivati u plinovitom agregatnom stanju, mogu postojati samo u čvrstom i kapljevitom stanju.

Riječ *polimer* prvi put je spomenuta 1833. godine od strane švedskog kemičara Jöns Jakob Berzeliusa. On je smatrao da su polimeri kemijski spojevi koji se razlikuju veličinom molekulne mase, ali imaju jednaki sastav. Danas polimerima nazivamo prirodne i sintetske tvari te materijale koji su građeni od makromolekula. [1]

Makromolekule sadrže na desetke tisuće atoma koji se povezuju kovalentnim vezama. Takve duge molekule sastoje se od strukturnih jedinica koje se ponavljaju, a nazivamo ih *merima*. Iako mera u makromolekuli može biti nekoliko tisuća, tipova mera je malo. Najčešće se pojavljuje samo jedan tip mera (homopolimeri), ali mogu se pojaviti dva ili više (kopolimeri). [2]

Proces u kojem od malih i osnovnih molekula, monomera, kemijskom reakcijom nastaju visokomolekulni spojevi, polimeri, naziva se *polimerizacija*. Monomeri se spajaju kovalentnim vezama i na taj način tvore polimerni lanac. Adicijska i kondenzacijska polimerizacija često se spominju kao najvažniji procesi polimerizacije. Spomenutim reakcijama danas se sintetiziraju najvažniji tehnički polimeri kao što su poliesteri, poliamidi i poliuretani. [3]

Adicijska polimerizacija odvija se stupnjevito, a nakon reakcija polimerizacije ne dolazi do izdvajanja molekula drugih spojeva. Dobiveni polimer ima isti bazični sastav kao i polazni monomer. Kod ove reakcije nema nusprodukata, dolazi do lančane reakcije i veća je brzina kojom se tvore dugačke molekule u odnosu na kondenzacijsku polimerizaciju. [3]

U *kondenzacijsku polimerizaciju* spadaju one reakcije polimerizacije u kojima se izdvajaju male molekule drugih spojeva. Dolazi do stvaranja veza između dvije vrste reaktivnih monomera, a nusprodukti reakcije su najčešće molekule vode. U reakcijama kondenzacijske polimerizacije nastaju duromeri i plastomeri. [3]

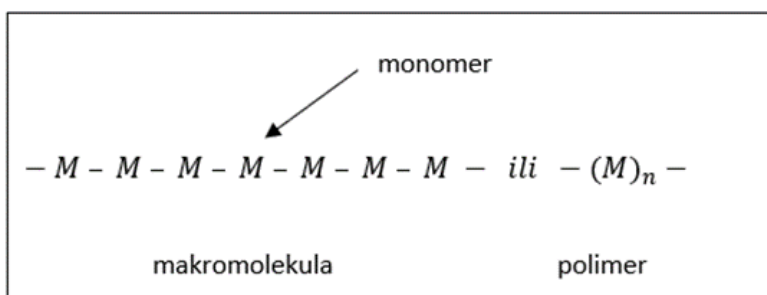
Stupanj polimerizacije je broj ponavljanih jedinica makromolekule, a prema formuli (1), umnožak stupnja polimerizacije (\overline{DP} – eng. degree of polymerization) i molekulne mase ponavljane jedinice (\overline{M}_0), jednak je molekulnoj masi polimerne molekule \overline{M}_n :

$$\overline{M}_n = \overline{DP} * \overline{M}_0, \text{ iz čega slijedi } \overline{DP} = \frac{\overline{M}_n}{\overline{M}_0} \quad (1)$$

Oligomerima nazivamo krutine koje su lako taljive i viskozne kapljevine koje imaju nizak stupanj polimerizacije (oko deset) i molekulnu masu za koju vrijedi $\overline{M}_n \leq 1500$. Ako je stupanj polimerizacije veći, gdje je molekulna masa $\overline{M}_n \geq 10000$, tada dolazi do otapanja molekula uz prethodno bubrenje i stvaranja filmova i vlakana. [2]

Porastom stupnja polimerizacije raste i viskoznost polimera. Visoka viskoznost negativno utječe na mogućnost oblikovanja i utječe na povećanje ukupne cijene obrade. Prednost je što visoki stupanj polimerizacije može rezultirati jačim polimerima. [2]

Niskomolekulna tvar koja polimerizacijom prelazi u polimer naziva se *monomerom*. Karakteristike buduće makromolekule ili umjetne mase ovisit će o monomeru. Masa molekule monomera usporediva je s masom mera. Mer ne može biti identičan molekuli polaznog monomera, ali strukturno može biti blizu kako bi u molekulama monomera došlo do preraspodjele elektronske gustoće i do stvaranja valencijskih veza. [2]



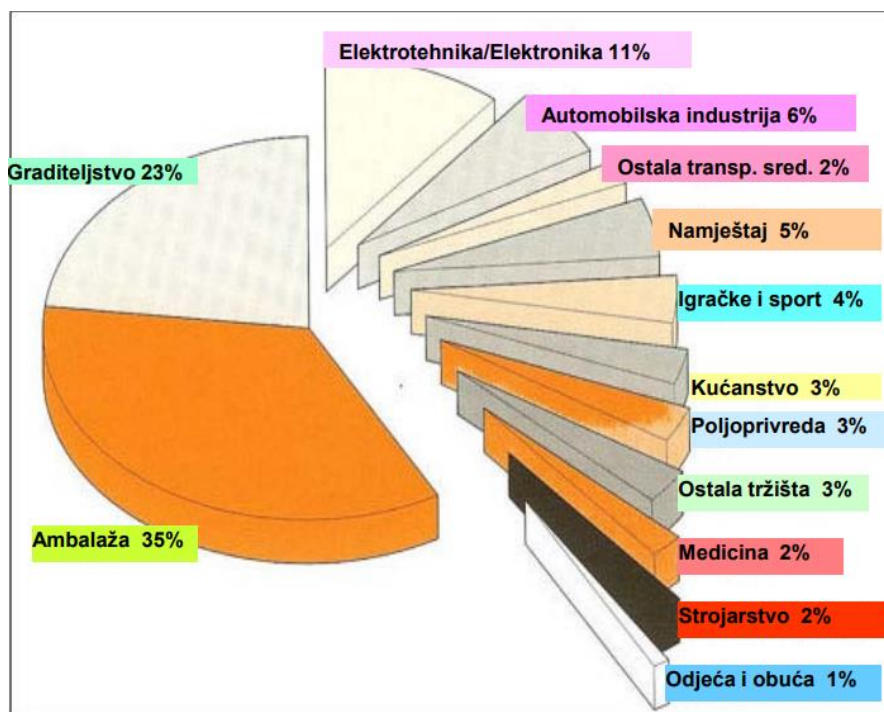
Slika 1.1.1. Struktura polimera [1]

Polimerni materijal se sastoji od čistog polimera (polimerizata) i raznih dodataka koja poboljšavaju preradbeni i uporabna svojstva polimera. Polimerni materijal se prerađuje, nakon čega se dobiva gotov proizvod. Stoga je pogrešno polimerne materijale nazivati polimerima. [2]

U polimerne materijale spadaju plastika (plastomeri i duromeri) i guma (elastomeri). Polimerni materijal u postupku prerade naziva se plastična masa. [2]

Aditivi (dodaci) se koriste kako bi se polimernim materijalima poboljšala određena svojstva. Čak i nakon male količine dodavanja aditiva, dobivaju se tehnički upotrebljivi materijali. Aditivi štite polimer od vanjskih utjecaja i snižavaju cijenu gotovog proizvoda. [4]

Za pravilan odabir aditiva važno je uzeti u obzir njihovo ukupno djelovanje jer aditivi mogu utjecati na druga nepoželjna svojstva polimera koja se žele izbjeći. Danas se za proizvodnju polimera najviše koristi sirova nafta i zemni plin, dok se ranije koristio ugljen. [4]



Slika 1.1.2. Glavna područja primjene polimernih materijala [1]

1.2. Podjela polimera i polimernih materijala

Polimeri se mogu podijeliti prema podrijetlu, prema reakcijskom mehanizmu nastajanja, prema vrsti ponavljanih čestica, prema oblicima makromolekula, primjeni, prema stupnju uređenosti makromolekula. Važno je i njihovo ponašanje na povišenoj temperaturi. [1]

1.2.1. Podjela polimera prema podrijetlu

Polimeri se prema podrijetlu dijele na *prirodne polimere* i na *sintetske* polimere.

Za razliku od sintetskih polimera, *prirodni polimeri* se ne mogu proizvoditi već za industrijske potrebe uzgajaju na plantažama. Celuloza je najvažniji prirodni polimer, a važni su i pamuk, svila, škrob, vuna, kaizen, prirodni kaučuk, masna ulja, prirodne smole, te različiti anorganski polimeri (najčešće silikati). Živa bića su građena od prirodnih polimera koje nazivamo *biopolimerima* (bjelančevine, posebni polisaharidi, nukleinske kiseline, hormoni, fermenti i sl.).

Sintetski polimerni materijali dobivaju se polimerizacijom, tj. kemijskim reakcijama od monomera koji se dobivaju uglavnom iz nafte i zemnom plina. Sintetski polimeri dijele se na *polusintetske polimere* (iz celuloze, bjelančevina), *organske sintetske polimere* (PE - polietilen, PS - polistiren, PVC – poli(vinil-klorid), PP - polipropilen) i *anorganske sintetske polimere* (silikoni, ulja za podmazivanja). [1]

1.2.2. Polimeri prema reakcijskom mehanizmu nastajanja

Polimeri se prema reakcijskom mehanizmu nastajanja dijele na *stupnjevite* i *lančane* polimere.

Stupnjeviti polimeri (postupni, kondenzacijski) dobivaju se iz reakcija stupnjevutih polimerizacija gdje dolazi do postupnog povećanja stupnja polimerizacije stupnja tijekom dugotrajnog procesa (poliesteri, poliamidi, poliuretani, epoksidni i formaldehidni polimeri). *Lančani polimeri* (adicijski) nastaju iz reakcija lančanih polimerizacija (radikalni, anionski, kationski, koordinativni). [1]

1.2.3. Vrste ponavljanih jedinica

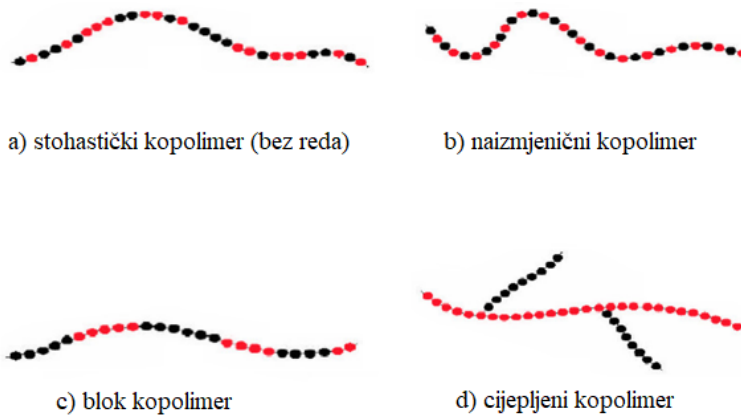
Polimeri se prema vrsti ponavljanih jedinica dijele na homopolimere i kopolimere.

U *homopolimerima* (PE - polietilen, PET – poli(etilen-tereftalat)) su sve monomernne jedinice jednake, njihova makromolekula je sastavljena iz samo jedne vrste monomera.



Slika 1.2.3.1. Homopolimer [5]

Kopolimeri se sastoje od dvije ili više vrsta ponavljanih monomernih jedinica (PVC/VAC - poli(vinil-klorid/vinil-acetat)). Prema načinu slaganja pojedinih monomera u makromolekulama, kopolimeri mogu biti: stohastički, naizmjenični, blok i cijepljeni kopolimeri. [1]



Slika 1.2.3.2. Vrste kopolimera [5]

Stohastički kopolimer (slika 1.2.3.2.) je najraširenija vrsta polimera gdje se ponavljajuće jedinice pojavljuju nasumično i bez reda. U reakciji mogu sudjelovati dva monomera, tri (terpolimer), ponekad i četiri.

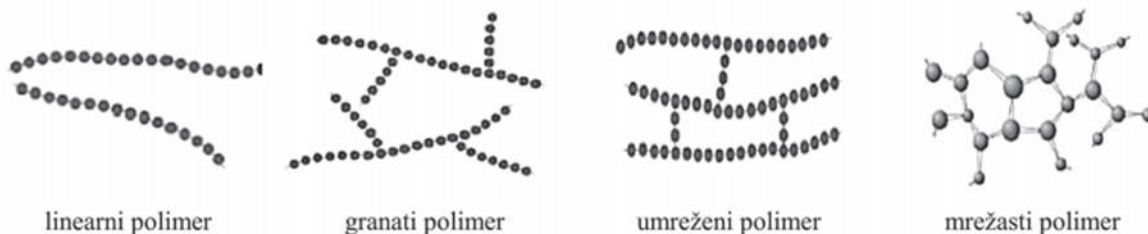
Za *naizmjenični kopolimer* (slika 1.2.3.2.) je karakteristično da su ponavljane jedinice u makromolekuli naizmjenice raspoređene u pravilnom redoslijedu.

Blok kopolimer (slika 1.2.3.2.) se sastoji od dva ili više monomera koji se zajedno skupljaju te ponavljaju u blokovima ponavljajućih jedinica.

Cijepljeni kopolimer (slika 1.2.3.2.) se sastoji od jednog tipa ponavljanih jedinica koje se nalaze na dugačkom glavnom lancu. Na glavni lanac veže se neki drugi tip ponavljanih jedinica. [2]

1.2.4. Oblik makromolekule

Polimeri se mogu podijeliti prema obliku makromolekule na *linearne*, *granate*, *umrežene* i *mrežaste*.



Slika 1.2.4.1. Podjela polimera prema oblicima makromolekula [1]

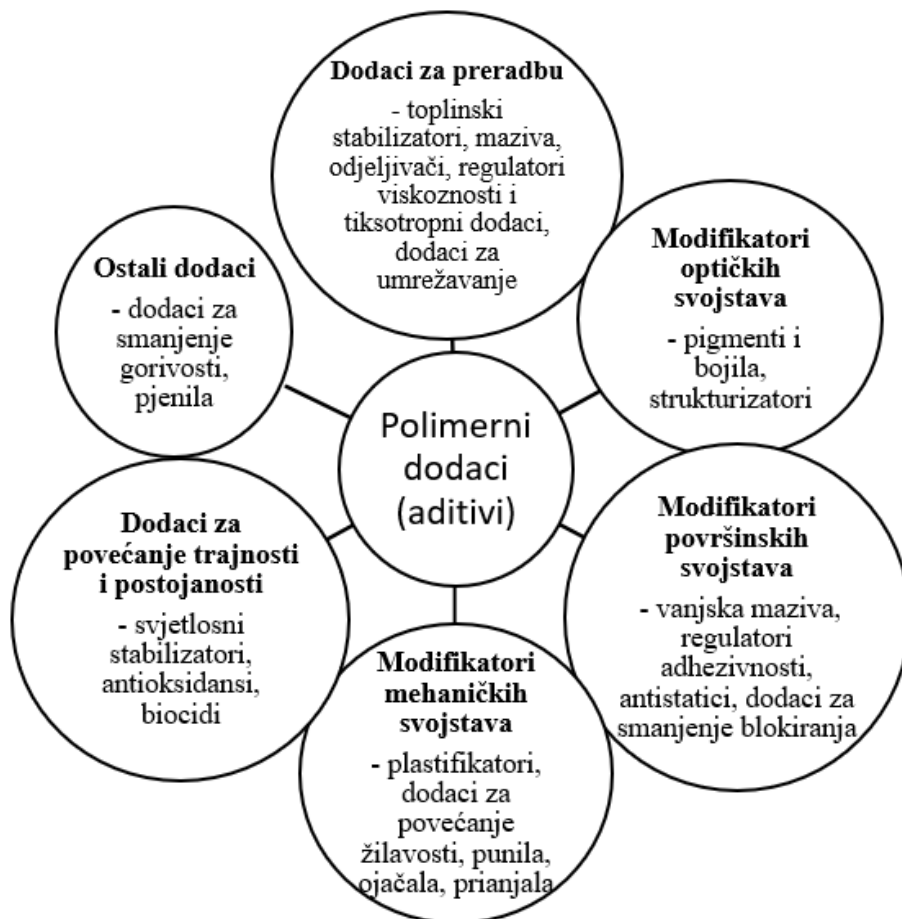
Linearni polimeri prepoznatljivi su po svojoj ponavljajućoj strukturi. Monomeri su povezani u jedan lanac gdje je svaki mer povezan samo s dva susjedna mera. Lanci ovih polimera su fleksibilni, a povezani su van der Waalsovima. Neki od uobičajenih polimera koji su linearne strukture su polietilen, poli(vinil-klorid), polistiren, poli(metil-metakrilat). *Granate makromolekule* sastoje se od jednog temeljnog lanca na koji se vezuju bočni lanci koji uglavnom imaju manji stupanj polimerizacije. Bočni ogranci određuju svojstva makromolekule, a ukoliko su ogranci kraći od temeljnog lanca onda će polimer imati veću gustoću i veći stupanj kristalnosti. *Umreženi polimeri* su sastavljeni od nekolicine dužih lanaca koji su međusobno povezani kraćim bočnim lancima. Nema osnovnog lanca, a poprečni lanci povezani su kovalentnim vezama tako da tvore trodimenzijsku mrežu. Svojstva ovih polimera bitno su drugačija od svojstava linearnih polimera. Umreženi polimeri su netopljivi i termostabilni, a mnogi su gumasti i elastični materijali umrežene strukture. *Mrežaste polimere* karakteriziraju prostorne (trodimenzionalne) mreže s aktivnim kovalentnim vezama.

Polimer koji je visoko umrežen također se može klasificirati kao mrežni polimer. Ovi materijali imaju karakteristična mehanička i toplinska svojstva, a epoksidi, poliuretan i fenol-formaldehid pripadaju ovoj skupini. [2]

1.2.5. Podjela polimera prema primjeni

Polimeri se prema primjeni dijele na *poliplaste, elastomere, vlakna, premaze, ljepila, veziva i funkcionalne polimere*.

Poliplasti (plastične mase) se prema ponašanju u uvjetima prerade i primjene, mogu kategorizirati u dvije osnovne skupine: *plastomere i duromere*. Svojstva poliplasta mogu se modificirati kemijskim reakcijama (kopolimerizacija) te različitim fizikalnim postupcima (toplinskim i drugim). Relativno malim količinama dodataka (aditiva) postižu se bolja svojstva preradbe i upotrebe poliplasta te niža cijena proizvoda. [4,6]



Slika 1.2.5.1. Polimerni dodaci (aditivi) [4]

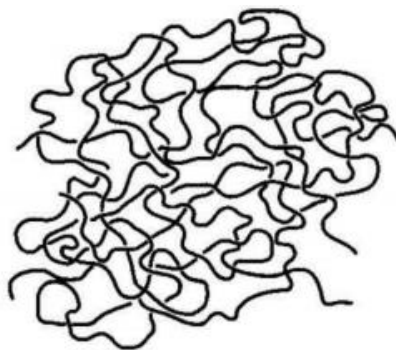
Čisti polimeri teško se mogu koristiti u tehničke svrhe, pogotovo kada dolazi do velikih mehaničkih opterećenja u konstrukcijskoj primjeni. Zato se takvim polimerima uvijek dodaju aditivi s ciljem poboljšavanja njihovih svojstava, a kratko objašnjenje svrhe dodavanja nekih važnijih dodataka navode se u sljedećoj tablici (*tablica 1.2.5.1.*). [7]

Naziv dodatka	Svrha dodavanja	Primjeri dodataka
PUNILO	Smanjenje cijene materijala, modificiranje preradbenih i toplinskih svojstava	Drveno i kameno brašno
OMEKŠAVALO	Postizanje savitljivosti	Teško hlapiva organska otapala
OJAČALO	Povišenje vlačne čvrstoće i vlačnog modula elastičnosti (krutosti)	Vlakna (staklena, ugljična, aramidna), metalne žice
STABILIZATOR	Smanjenje utjecaja UV – zraka i usporavanje starenja	
ANTISTATIK	Smanjenje elektrostatičkog nabijanja	
DODATAK ZA SAMOGASIVOST	Postizanje samogasivosti	
BOJILO, PIGMENT	Postizanje željenog obojenja	

Tablica 1.2.5.1. Primjeri nekih aditiva i svrha njihovih primjena [7]

1.2.6. Stupanj uredenosti makromolekula

Nadmolekulna struktura nastaje kao posljedica prostornog uređivanja molekula koje su različito raspoređene i povezane privlačnim silama. *Amorfne i kristalične strukture* su osnovne nadmolekulske strukture polimera. Amorfni polimeri imaju nesređenu strukturu koja se sastoji od nepravilno raspoređenih molekula. Obzirom da amorfni polimeri još uvijek nisu do kraja razjašnjeni, vjeruje se da u njihovoj strukturi ipak postoji barem neki stupanj uredenosti molekula. [2]



Slika 1.2.6.1. Amorfna struktura polimera [2]

Kristalna struktura je karakteristična za polimere s pravilnim rasporedom molekula gdje postoji određeni stupanj sredenosti njihovih molekulskih lanaca. Polimeri rijetko imaju potpuno kristaličnu strukturu. Uglavnom je to *semikristalična struktura* (djelomično kristalična struktura) u kojoj se pojavljuje amorfna struktura u kombinaciji s kristaličnom strukturom molekulskih lanaca. [2]



Slika 1.2.6.2. Polukristalni polimer (amorfna i kristalna struktura) [2]

1.2.7. Ponašanje polimera na povišenoj temperaturi

S aspekta industrijske i tehničke primjene, najvažnije svojstvo polimera je njihovo ponašanje pri zagrijavanju, odnosno hlađenju. Polimeri se prema njihovom ponašanju na povišenoj temperaturi mogu podijeliti na plastomere, duromere, elastomere i elastoplastomere.

Plastomeri (termoplasti) su najraširenija skupina polimernih materijala, građeni su od makromolekula međusobno povezanim sekundarnim vezama. Plastomeri imaju linearnu ili granatu građu, taljivi su, topljivi i bubre, a njihove makromolekule su povezane slabim van der Waalsovima vezama. Porastom temperature omekšavaju i lako ih se oblikuje u gotov proizvod. Nakon ohlađivanja plastomer zadržava svoj oblik, vraća mu se prvobitna tvrdoća i čvrstoća. Plastomeri imaju vrlo pogodna svojstva za zavarivanje, pri ponovnom zagrijavanju mogu opet omekšati i takav ciklus može se ponavljati. [2,4,7]

Teoretski se zagrijavanje i hlađenje plastomera može se ponavljati i njihova osnovna svojstva neće se promijeniti, ali u praksi dolazi do degradacije ili termalnog starenja termoplasta. Obzirom da se ciklus omekšavanja i očvršćivanja može se stalno ponavljati, plastomere je moguće mehanički oporabiti i reciklirati.

Plastomeri mogu biti *amorfni* ili *kristalasti*. Amorfni plastomeri građeni su od makromolekula nepravilne građe, a uglavnom su krhki, prozirni i slabije kemijske postojanosti. Imaju neumreženu strukturu koja je sastavljena od linearnih i granatih makromolekula i to ih razlikuje u odnosu na ostale amorfne polimerne materijale. Kristalasti plastomeri osim amorfne sadrže i kristalnu fazu. Svojstva materijala određena su građom makromolekula, omjerom amorfne faze u odnosu na kristalnu fazu. Ukoliko prevladava kristalna faza, doći će do povećanja tvrdoće, gustoće i čvrstoće plastomera te do veće postojanosti prema otapalima. Ako prevladava amorfna faza, doći će do povećanja fleksibilnosti i obradivosti plastomera. Najpoznatiji primjeri plastomera su PVC (poli(vinil-klorid)), PP (polipropilen), PS (polistiren), PC (polikarbonat). [2,4,7]

Duromeri (duroplasti) imaju gusto umreženu strukturu s primarnim vezama i unutar makromolekula i između makromolekula. Zagrijavanjem ne omekšavaju i nisu pogodni za zavarivanje. Oni su netaljivi, netopivi i praktički ne bubre. Tijekom prerade odvijaju se reakcije polimerizacije i/ili umrežavanja uz istovremeno nastajanje konačnog oblika gotovog proizvoda što

znači da se ne mogu ponovno preraditi i reciklirati. Duromeri tijekom zagrijavanja jako slabo mekšaju ili gotovo ne omekšaju već se umrežavaju, ne mogu se otapati u otapalima i plastično oblikovati. Kako bi se iz proizvod iz duromera mogao oblikovati potrebno im je dodati ubrzivače i katalizatore koji pospješuju umrežavanje makromolekula. Oblikovanje duromera mora biti dobro izvršeno jer se ne mogu ponovno preoblikovati. Duromeri zagrijavanjem više ne mogu postati viskozne tekućine jer se počinju umrežavati. Daljnjim povećanjem temperature dolazi do tzv. termodegradacije i do kidanja kovalentnih veza između makromolekula. Ova vrsta polimera uspješno se primjenjuje kao konstrukcijski materijal zbog svoje velike tvrdoće. [2,4,7]

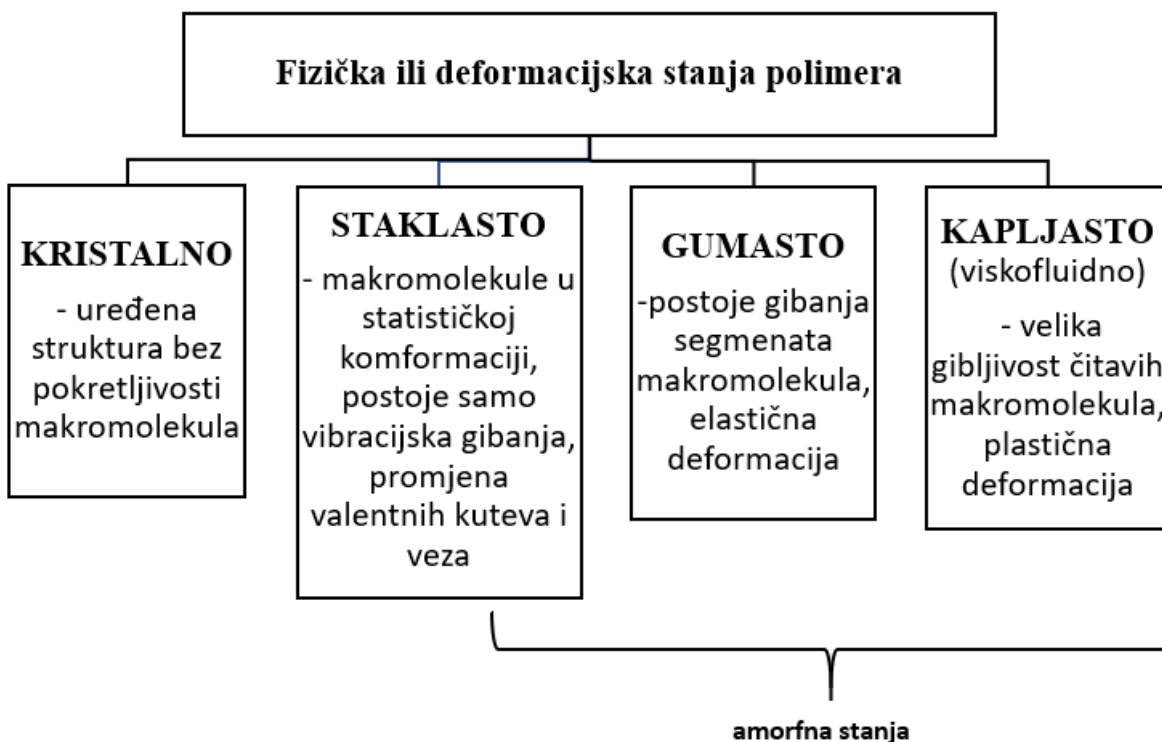
Elastomer je materijal koji se na sobnoj temperaturi može produljiti višestruko, a zatim se vraća na početnu duljinu nakon prestanka djelovanja naprezanja (vanjskih sila). Unutar makromolekula imaju primarne veze, a između makromolekula sekundarne veze što im omogućava vrlo visoku istezljivost. Elastomeri imaju rahlo umreženu strukturu, netopljivi su, netačljivi i bubre, imaju sposobnost vrlo velikih elastičnih deformacija. Mogu se oblikovati u omekšanom stanju, prije dovršenog umrežavanja, odnosno vulkanizacije. Vulkanizacija je postupak dodavanja sumpora s ciljem postizanja primarnih veza između makromolekula čime se postiže poboljšanje mehaničkih i uporabnih svojstava. Materijali koji ulaze u preradbene postupke su kaučukove smjese (kaučuk + dodaci). Često se gumeni materijali zbog svoje visoke istezljivosti nazivaju elastomerima. [4,7]

Elastoplastomeri se pri sobnoj temperaturi ponašaju poput elastomera. Pri povišenim temperaturama ponašaju se poput plastomera. Oni su taljivi, topljivi i bubre, imaju rahlo umreženu strukturu makromolekula. Njihova uporabna svojstva slična su svojstvima umreženih elastomera, a prerađuju se postupcima koji su tipični za plastomere. [2,4,7]

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

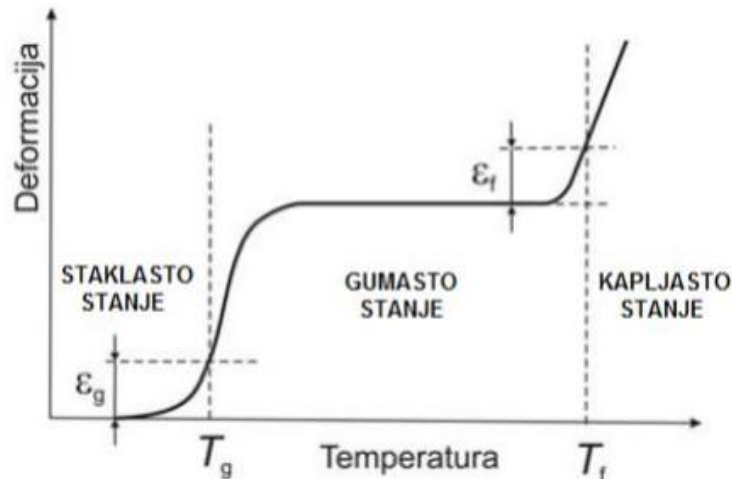
Slika 1.2.7.1. Osnovne karakteristike polimernih materijala [4]

1.3. Fizička ili deformacijska stanja polimera



Slika 1.3.1. Deformacijska stanja polimera [8]

Deformacija (ϵ) polimernog tijela ovisi o temperaturi (T), naprežanju (σ), vremenu (t) u kojem se deformacija promatra i brzini vanjske sile koja se mijenja ili primjenjuje. Termomehanička krivulja prikazuje ovisnost deformacije o temperaturi. Termomehanička krivulja dobiva se zagrijavanjem uzorka pri konstantnoj temperaturi zadanom brzinom uz konstantno naprežanje. Obzirom na veličinu i tip deformacije te odnosu prema temperaturi, postoje tri različite skupine fizičkih stanja u kojima se polimer može naći: staklasto, gumasto i kapljasto stanje. Osnovne značajke fizičkih stanja polimera pokazane su slikom (slika 1.3.1.). [2,9]



Slika 1.3.2. Termomehanička krivulja linearog amorfnog polimera [4]

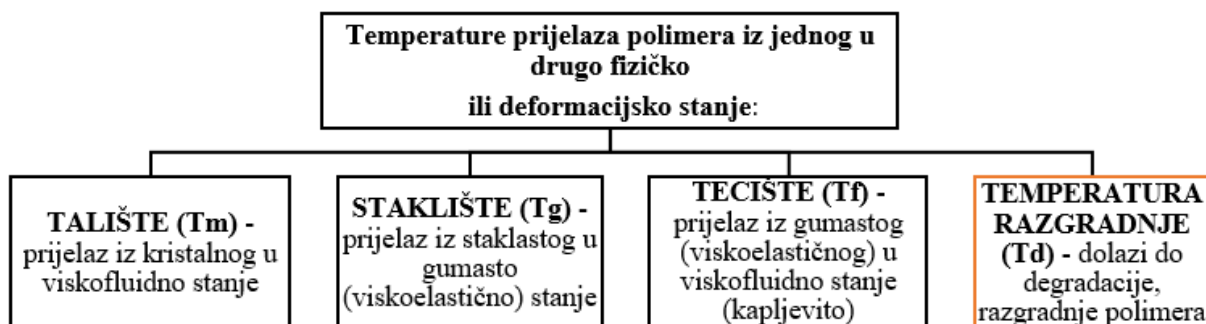
U *staklastom stanju* makromolekule su u statičkoj konformaciji, razmak između atoma u molekuli se povećava i dolazi do promjena dužine valentnih kuteva i veza. Atomi se vraćaju u prvobitni položaj nakon prestanka djelovanja vanjske sile. Deformacije koje se javljaju malog su iznosa i istog su tipa kao deformacije stakla ili keramike. Deformacije nastaju i nestaju trenutno i tako slijede Hookeov zakon elastičnosti. [2,9]

U *gumastom stanju* pod utjecajem vanjske sile dolazi do promjena dužine valentnih kuteva i veza. Ovdje se kao u staklastom stanju javlja elastična deformacija. Pojedini dijelovi makromolekula počinju se gibati te se mijenja njihov oblik. Dolazi do promjene konformacije makromolekula, a nakon djelovanja sila, molekula se opet vraća u prvobitnu konformaciju. U gumastom stanju dolazi do puzanja materijala i relaksacijskih naprezanja. U jednom dijelu krivulja je gotovo paralelna s osi apscise i taj dio krivulje se naziva viskoelastični plato. U tom području gotovo da ne postoji ovisnost deformacije o temperaturi. [2,9]

U *kapljastom stanju* dolazi do tečenja i moguće je gibanje čitavih makromolekula. Centar masa makromolekule se premješta u smjeru djelovanja vanjske sile. Makromolekule se ne premještaju u cjelini nego u dijelovima.

Svaki prijelaz je definiran nekom određenom temperaturom što znači da nema skokovitog prijelaza između deformacijskih stanja. T_g (staklište) označava temperaturu prijelaza iz staklastog u gumasto stanje, T_f (tecište) označava temperaturu prijelaza iz gumastog u kapljasto stanje. [2,9]

T_g i T_f su temperature kod kojih promatrani polimer ima dogovoreni iznos gumaste (ε_g), odnosno kapljaste (ε_f) deformacije.



Slika 1.3.3. Temperature prijelaza polimera iz jednog u drugo fizičko ili deformacijsko stanje [8]

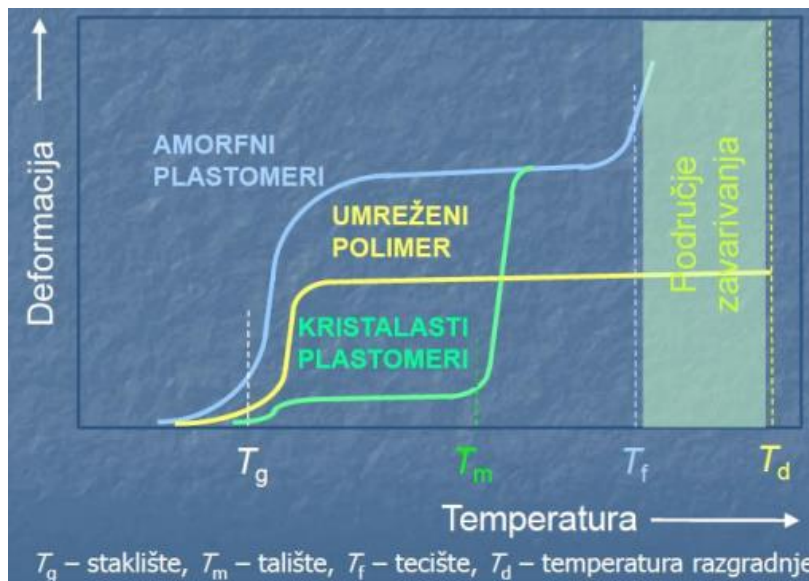
Staklište (T_g) je temperatura koja označava prijelaz iz staklastog u viskoelastično (gumasto) stanje. Ovaj prijelaz karakterističan je za amorfna područja plastomera i za elastomere. Iznad temperature staklišta materijal je fleksibilan, a ispod temperature staklišta, materijal je tvrd. Na temperaturama iznad T_g , elastomer je gumast (viskoelastičan) jer segmenti makromolekule mogu rotirati. Staklište najviše ovisi o strukturi ponavljane jedinice, ali i raznim ostalim čimbenicima.

Talište (T_m) je temperatura koja označava prijelaz iz kristalnog u viskofluidno (kapljasto) stanje. Talište ovisi o stupnju kristalnosti i povisuje se porastom stupnja kristalnosti. Za staklište i talište plastomera vrijede iste zakonitosti pa je moguće predvidjeti talište i određena svojstva sintetiziranih polimera. [2,9]

Tecište (T_f) je temperatura kod koje polimer prelazi gumastog u kapljevito stanje. Na ovoj temperaturi polimer doživljava nepovratnu deformaciju.

Temperatura razgradnje (T_d) je temperatura pri kojoj dolazi do razgradnje polimera pri čemu se umanjuju njihova uporabna svojstva. Pod utjecajem topline dolazi do promjene konfiguracije makromolekula. Javlja se povećana koncentracija energije toplinskog gibanja makromolekule te dolazi do kidanja kovalentnih veza pri temperaturama od 200-300°C za većinu polimera. Pri temperaturama gdje se razgradnja javlja već na 200°C, mogu se koristiti stabilizatori koji mogu spriječiti proces razgradnje. [2,9]

PVC je jedan od toplinski najnestabilnijih polimera. Stupanj razgradnje ovisi o temperaturi i vremenu zagrijavanja materijala. Kod zavarivanja, temperatura zagrijavanja ne smije dosegnuti vrijednost temperature razgradnje. Zavarivanje mora biti kratkotrajno nakon čega se zavar mora hladiti na sobnoj temperaturi. [2,9]



Slika 1.3.4. Ovisnost termomehaničke krivulje o stupnju uređenosti strukture [8]

Slikom (slika 1.3.4.) je prikazano kako stupanj uređenosti polimerne strukture utječe na deformacijska stanja polimera. U jednakim uvjetima zagrijavanja, umreženi polimer postiže manju gumastu deformaciju u odnosu na linearni amorfni polimer. Umreženi polimer nema tecišta i ne može teći već se razgrađuje na nekoj temperaturi razgradnje. Kod amornog polimera su prisutna sva tri deformacijska stanja. [2,9]

Kristalasti polimer već na malo višoj temperaturi većoj od temperature staklišta (T_g) ostvaruje manju gumastu deformaciju dok na temperaturi tališta (T_m) nestaje kristalnog poretka. Ako je $T_m = T_f$, kristalasti polimer će postati talina. Ako je $T_m < T_f$, kristalasti polimer ostvaruje novu i veću gumastu deformaciju. [2,9]

1.4. Svojstva polimera

Funkcijska (uporabna) svojstva	Naziv svojstva (primjeri)
MEHANIČKA	čvrstoća, istezljivost, modul elastičnosti, žilavost, tvrdoća
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, udjeli dodataka

Tablica 1.4.1. Pojedina svojstva polimernih materijala [7]

Mehanička svojstva polimera važna su za njihovu konstrukcijsku primjenu. Pažnja se posvećuje utjecaju trajanja opterećenja, načinu i brzini djelovanja opterećenja. Mehanička svojstva mogu biti kratkotrajna i dugotrajna. Karatkotrajno opterećenje je opterećenje pri kojemu u vremenskom intervalu od jedne minute dolazi do loma. Može biti udarno (žilavost) i statičko (čvrstoća, modul elastičnosti, tvrdoća). Dugotrajno opterećenje može biti statičko i dinamičko. Puzanje se javlja pri dugotrajnom statičkom opterećenju, a pri dugotrajnom dinamičkom opterećenju javlja se umor materijala. Mehanička svojstva polimernih materijala pored ostalog su ovisna o temperaturi. Polimerni materijali dobro prigušuju vibracije pa se zbog toga generira toplina, a uslijed slabe toplinske vodljivosti dolazi do povišenja temperature. Dinamičko opterećenje je zato posebno važno jer dolazi do preklapanja mehaničkog i drugih (toplinskih) utjecaja. [2,7]

Tribološka svojstva polimera su njihova poželjna svojstva. Iako otpornost na trošenje i faktor trenja ovise o tipu tribološkog djelovanja i materijalu, polimerni materijali imaju dobru otpornost na trošenje i manji faktor trenja. Polimerni materijali nisu osjetljivi prema stranim česticama. Trošenjem polimernih materijala popunjavaju se udubine i neravnine na proizvodima. Kod polimernih materijala nema mirkozavarenih spojeva. [2,7]

Toplinska svojstva opisuju ponašanje polimera pri njihovom zagrijavanju. Temperatura pri kojoj plastomeri mekšaju naziva se temperatura omekšavanja. Polimeri loše provode toplinu i dobri su izolatori, a njihovov koeficijent rastezanja je znatno veći u odnosu na druge materijale.

Polimeri imaju malu toplinsku postojanost i stabilnost, teško zadržavaju svoja fizikalna svojstva ako ih se kroz neko vrijeme podvrgne određenoj temperaturi. Mala toplinska stabilnost dovodi do veće zapaljivosti polimera. [2,7]

Električna svojstva polimera ovise o stupnju kristaličnosti strukture i temperaturi. Polimeri su dobri izolatori i često se koriste kod električnih uređaja za izolaciju kablova. Dodavanjem staklenih vlakana ili molibdenova sulfida mogu se još dodatno poboljšati njihova izolacijska svojstva. Nekim polimerima se dopiranjem mogu povećati njihova električna vodljivost. Vodljivi polimeri se koriste za kompjuterske zaslone kao zaštita od nepoželjnog elektromagnetskog zračenja, za zaštitu od sunčevog svjetla i UV-zraka, za proizvodnju optičkih vlakana, izradu umjetnih živaca i drugo. Osnovna električna svojstva polimera koja se ispituju su dielektrična (permitivnost, faktor gubitaka, probojna čvrstoća) i električna provodnost (specifična električna otpornost, otpornost površine, provodnost, temperaturni koeficijent otpora). Električni naboj se akumulira zbog dobrih izolacijskih svojstva polimera, velike električne otpornosti površine i otpornosti na protok struje.

Kemijska postojanost polimera također ovisi o postotku kristaličnosti strukture. U odnosu na ostale konstrukcijske materijale, polimerni materijali imaju bolju kemijsku postojanost, stoga su postojaniji prema djelovanju kiselina, vode, lužina i otopina soli. Kemijska postojanost se ispituje uranjanjem polimernih uzoraka u odabrana kemijska sredstva. [2,7]

Prednost	Nedostatak
dobra kemijska postojanost	veća toplinska rastezljivost
dobra otpornost na trošenje	nizak modul elastičnosti
mala gustoća	ovisnost svojstava o raznim utjecajnim faktorima
mali faktor trenja	mala površinska tvrdoća
dobro prigušivanje vibracija	podložnost starenju
dobra toplinska i elektroizolacijska svojstva	mala toplinska vodljivost
ekonomična serijska izrada dijelova	neekonomična proizvodnja malih količina proizvoda
preradljivost deformiranjem pri relativno malo povišenim temperaturama	utjecaj prerade na svojstva

Tablica 1.4.2. Pregled osnovnih prednosti i nedostataka polimernih materijala [7]

2. Zavarivanje polimera i plastičnih masa

2.1. Općenito

Zavarivanje je jedna od najčešće korištenih i najsigurnijih metoda koja se koristi za spajanje plastičnih materijala. Zavarivanje plastike je postupak spajanja omekšanih površina polimernih materijala uz pomoć topline i pritiska. Plastične mase se prema toplinskim svojstvima dijele se na termoplaste i duroplaste. Samo termoplasti se mogu uspješno zavarivati. Termoplasti su tvari koje zagrijavanjem omekšaju i postanu plastične nakon čega se mogu oblikovati. Nakon hlađenja, termoplasti ponovno postaju čvrsti. Takav postupak može se više puta ponoviti, a da se masa kemijski ne promijeni. Za zavarivanje plastičnih masa potrebne su mnogo niže temperature u odnosu na zavarivanje metala. Razvijene su brojne metode zavarivanja za spajanje plastičnih materijala. Postupci zavarivanja plastičnih masa uglavnom se temelje na zagrijavanju zavarivanih dijelova vrućim plinom ili pomoću grijaćeg elementa, plamena ili infracrvenim zračenjem. Zagrijavanje dijelova koji se zavaraju može se ostvariti pomoću trenja, zavarivati se može strujama visokih frekvencija i postavljanjem sloja rastaljenog polimernog materijala između zavarenih dijelova. Ultrazvučno zavarivanje se koristi kod zavarivanja plastičnih masa i metala. [10]

2.2. Plastične mase

Plastične mase su umjetni materijali građeni od makromolekularnih organskih veza, a nastaju sintetski ili modifikacijom prirodnih materijala i proizvoda. Plastične mase se na povišenim temperaturama uz djelovanje mehaničke sile ili pritiska, mogu oblikovati, a potom dobiveni oblik zadržati. Proizvodnja i potrošnja plastičnih masa u svijetu vrtoglavo raste, a stručnjaci smatraju da smo zakoračili u doba plastike. Plastične mase se najčešće proizvode iz sirove nafte koja služi kao polimerna baza, a koriste se razni dodaci kao što su antioksidansi, punila, omekšivači, aditivi protiv starenja, pigmenti za bojanje. Modifikacijom prirodnih polimera (celuloze) dobivaju se polusintetičke plastične mase. Za povezivanje i spajanje plastičnih masa najčešće se koriste vijci, metode lijepljenja i zavarivanja. Danas se primjena plastičnih masa proširila na strojogradnju gdje kao strojni elementi na pojedinim mjestima uspješno zamjenjuju metale, a imaju znatno nižu cijenu koštanja. [11,12]

Plastične mase dobivaju se kemijskim postupcima koje omogućavaju sintezu makromolekula. Najpoznatiji takvi postupci su polimerizacija, polikondenzacija i poliadicija. Kod plastičnih masa osnovna jedinica strukturalnog oblika je molekula, a kod metala je to atom. [11]

Načini dobivanja plastičnih masa:

- *polimerizacija* - reakcija u kojoj iz mnogo malih nezasićenih molekula, monomera, nastaje jedna velika molekula, polimer. Ovaj proces izvodi se pod djelovanjem topline, pritiska i nekih katalizatora (ubrzivači kemijskih procesa).
- *polikondenzacija* – kemijska reakcija u kojoj dolazi do sakupljanja više malih molekula. To su uglavnom molekule vode, amonijaka, vodika, alokohola. Proizvodi ove kemijske reakcije se nazivaju polikondenzati.
- *poliadicija* – kemijska reakcija u kojoj dolazi do sakupljanja jednakih i manjih molekula u veliku molekulu bez izlučivanja nekih tvari. Proizvodi ove kemijske reakcije nazivaju se poliadukti. [11]

2.2.1. Podjela i primjena plastičnih masa

Plastične mase mogu se podijeliti prema različitim kriterijima. Prema porijeklu se dijele na prirodne plastične mase, modificirane prirodne plastične mase i sintetičke plastične mase. Za postupke spajanja zavarivanjem, najčešća je podjela je prema mehaničko-termičkom ponašanju: termoplasti, duroplasti, elastomeri. U takvoj podjeli termoplasti i duroplasti imaju najvažniju ulogu zato jer se pod pojedinim uvjetima pritiska i temperature mogu lijevati i oblikovati. Za tehnologiju zavarivanja najbitnija podjela plastičnih masa je s obzirom na zagrijavanje :

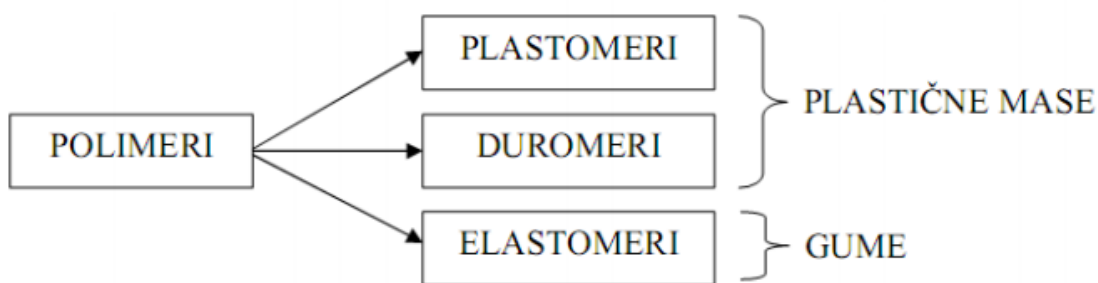
- *termoplastične tvari (termoplasti)*
- *termostabilne tvari (duroplasti)*

Termoplasti su tvari koje zagrijavanjem mekšaju i postaju plastične nakon čega se mogu oblikovati. Termoplasti nakon hlađenja ponovno postaju čvrsti. Ovakav postupak može se više puta ponoviti, a da ne dođe do kemijske promjene mase. Važno je da se ne prekorači dozvoljena temperatura jer se usred nepoželjnih kemijskih reakcija mogu promijeniti osobine polimera.

Termoplasti imaju nisku tvrdoću i temperaturnu postojanost, kao i nisku otpornost na kemijske utjecaje. Najpoznatiji termoplasti su polietilen, poli(vinil-klorid), polistiren i polipropilen. Molekulna struktura termoplasta je linearna. [12]

Za zavarivanje su najinteresantniji upravo termoplasti zato jer se njihov ciklus zagrijavanja i hlađenja, za razliku od duroplasta, može stalno ponavljati.

Duroplasti su tvari koje omekšaju na visokim temperaturama i na taj način postaju plastične. Nakon hlađenja duroplasti se ponovnim zagrijavanjem više ne mogu omekšati, što znači da zadržavaju svoj oblik i veličinu. Imaju bolju toplinsku i kemijsku postojanost od termoplasta, kao i dobre mehaničke osobine. Najpoznatiji duroplasti su fenolformaldehidi, poliesteri, epoksidi. Umrežena struktura makromolekula objašnjava njihove osobine. [12]



Slika 2.2.1. Osnovna podjela polimera [11]

Plastične mase imaju masovnu i raznovrsnu primjenu. Uspješno zamjenjuju mnoge prirodne materijale. Već danas zamjenjuju papir, staklo, drvo, kost, kožu, tekstilna vlakna, i mnoge druge materijale. Plastične mase danas se primjenjuju u mnogim granama moderne industrije, a mogućnost prerade i reciklaže velika je njihova prednost gledajući s ekonomskog i ekološkog aspekta. [11]

2.2.2. Zavarivanje plastičnih masa

Kako bi došlo do temperature taljenja, zavarivane površine zagrijavaju se na određenu temperaturu, a ukoliko se poveća temperatura, materijal će prijeći u termoplastično stanje. Pod djelovanjem pritiska doći će do stvaranja zavarenog spoja na zagrijanoj površini. Temperatura zavarivanja, brzina zavarivanja i pritisak se određuju s obzirom na materijal koji se zavaruje. Dovođenjem topline temperatura raste, dolazi do slabljenja međumolekularnih sila pri čemu materijal postaje sve mekši, a molekularni lanci počinju se gibati (Brownovo kretanje). Povećana temperatura kod svih materijala izaziva opadanje čvrstoće, a to je posebno izraženo kod plastičnih masa. Promjene uzrokovane temperaturom se kod metalnih materijala počinju događati na 500 °C, a kod plastičnih masa se iste promjene događaju na znatno nižim temperaturama, već na 50 °C.

Porastom temperature istezanje raste, dok smanjenjem temperature naglo opada. U tablici (*tablica 2.2.2.1.*) su prikazani neki polimerni materijali koje je moguće spajati zavarivanjem (istorodni i raznorodni). Pokazana je ocjena njihove međusobne zavarljivosti . [12]

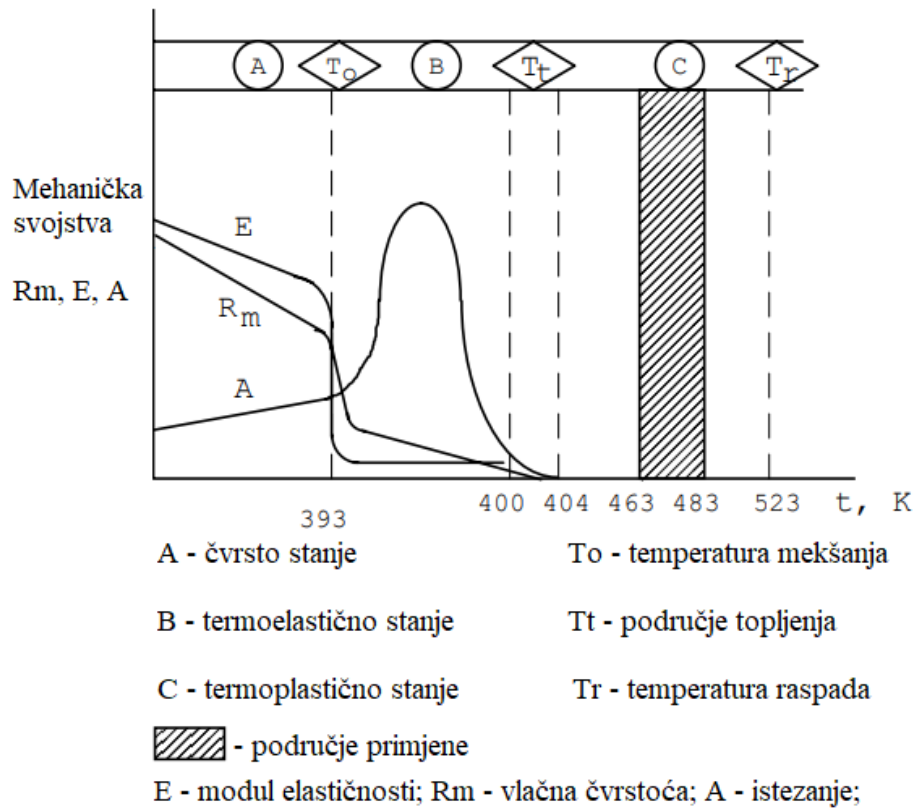
	PMMA	PVC	PS	ABS	PEHD	PP
PMMA	++	++	++	++	--	--
PVC	++	++	--	+	--	--
PS	++	--	++	++	-	--
ABS	++	+	++	++	--	--
PEHD	--	--	-	--	++	+
PP	--	--	--	--	+	++

Tablica 2.2.2.1. Ocjena zavarljivosti za neke polimerne materijale [12]

Najčešće se zavaruju PMMA (poli(metil-metakrilat)), PVC (poli(vinil-klorid)), PS (polistiren), ABS (akrilonitril-butadien-stiren), PEHD (polietilen visoke gustoće) i PP (polipropilen). Ocjena zavarljivosti označena je sa ++ kao najbolja zavarljivost, + kao dobra zavarljivost, - kao slaba zavarljivost, a -- je ocjena za materijale koji se ne mogu zavarivati zajedno. PMMA ima dobru zavarljivost u kombinaciji s većinom ostalih polimernih materijala iz tablice. PVC se odlično zavaruje s PMMA i PVC, ali se ne može zavarivati s PS, PEHD i PP. [12]

2.2.3. Ponašanje plastičnih masa pri zavarivanju

Dijagram stanja (slika 2.2.3.1.) objašnjava ponašanje plastičnih masa tijekom zagrijavanja te pokazuje pojedine promjene koje se događaju tijekom zavarivanja.



Slika 2.2.3.1. Dijagram stanja plastični masa tijekom zavarivanja [13]

Dijagram pokazuje tri karakteristična stanja tokom zavarivanja i četiri karakteristične temperature. Plastična masa je pri sobnoj temperaturi (A) u čvrstom ili kutom stanju. Temperatura raste dovođenjem topline, a materijal mekša. Sekundarne sile postaju slabije, ali ne popuštaju odmah pa se lanci mogu gibati iako su ti pomaci pri sobnoj temperaturi vrlo mali. Takvo toplinsko gibanje naziva se Brownovo gibanje. Povišenjem temperature opada čvrstoća plastičnih masa, a promjene svojstava javljaju se već na 50 °C. [13]

Povećanjem temperature istezanje raste, a naglo pada pri niskim temperaturama. Točka mekšanja (T_o) je granična temperatura koja označava nagli pad čvrstoće pri rastućoj temperaturi. Sekundarne veze su već poprilično popustile i gibaju se samo segmenti lanaca („mikro“ Brownovo gibanje).

Prijelazom temperature T_o materijal prelazi u termoelastično stanje. Sekundarne veze iako su slabe, još uvijek nisu pokidane. Zavarivanjem u ovom području ne dobiva se visoka čvrstoća spoja. Dolazi do naglog porasta istezanja koje ovdje dolazi do maksimuma. Nakon toga vlačna čvrstoća opet naglo pada, a elastičnost se smanjuje u manjoj mjeri. [13]

Povećanjem temperature materijal dolazi do *temperature tečenja* (T_t). Pri tako visokim temperaturama dolazi do popuštanja sekundarnih veza, gibaju se cijeli lanci neometano („makro“ Brownovo gibanje). Istezanja i vlačne čvrstoće u ovom području gotovo da nema. [13]

Prijelazom temperature tečenja (T_t) javlja se termoplastično područje i ostvaruje se zavarivanje zagrijavanjem zavarivanih površina. Zavaruju se termoplasti koji su sposobni pri zagrijavanju prelaziti u termoplastično stanje. Blizu temperature tečenja (T_t) nalazi *temperatura raspada* (T_r) i zato se zavarivanje mora izvesti pod striktno zadanim parametrima. Kod temperature raspada (T_r) dolazi do raspada materijala i razaranja kemijskih veza. U toku zavarivanja ne smije doći do lokalnih pregrijavanja jer dolazi do stvaranja mjehura, požutjelosti i smanjuje se čvrstoća. Stupanj raspada ovisi o temperaturi, ali i o vremenu zagrijavanja materijala. Mora se omogućiti kratkotrajno zagrijavanje kako temperatura zagrijavanja ne bi bila veća od temperature raspada.

Nakon zagrijavanja važno je zavar ohladiti na sobnoj temperaturi. Sada materijal prolazi kroz sva prethodno navedena stanja, ali obratnim putem, sve do čvrstog ili krutog stanja. Postupno se uspostavljaju sekundarne veze, a nakon završnog hlađenja lanci molekula se više ne mijenjaju. [13]

3. Postupci zavarivanja plastičnih masa

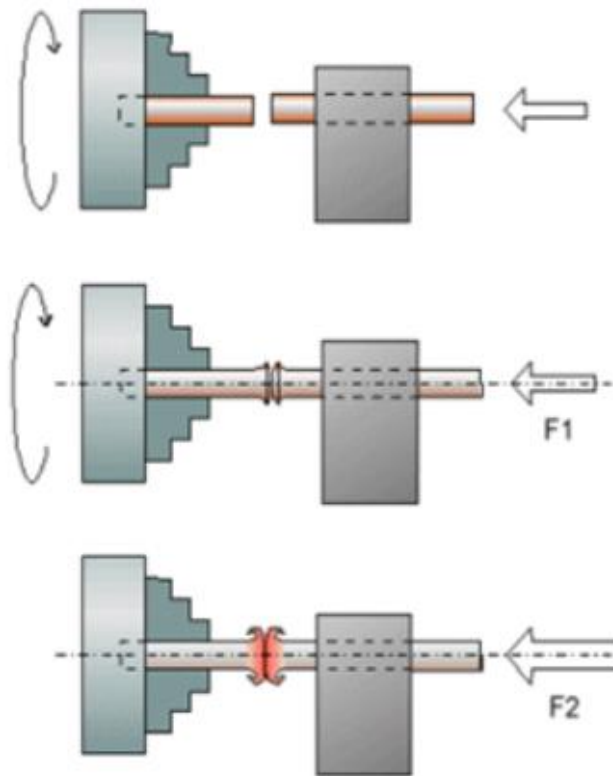
Postupci zavarivanja plastičnih masa dijele se na *konvencionalne* i *nekonvencionalne*. Konvencionalni postupci zavarivanja su: zavarivanje vrućim plinom, zavarivanje zagrijanim elementom, zavarivanje trenjem i vibracijama, zavarivanje strujama visoke frekvencije, zavarivanje ultrazvukom. Neki nekonvencionalni postupci zavarivanja su zavarivanje zračenjem i lasersko zavarivanje. Postoje još mnoge druge podjele, npr. zavarivanje kontaktnim načinom koje se može vršiti sa direktnim i indirektnim unosom topline i zavarivanje kretanjem koje se može odnositi na ultrazvučno zavarivanje i zavarivanje trenjem. Postupci zavarivanja plastičnih masa razlikuju se prema načinu zagrijavanja, a u praksi se najčešće primjenjuju postupci prikazani slikom (slika 3.1). [12]



Slika 3.1. Najvažniji postupci zavarivanja plastičnih masa [13]

3.1. Zavarivanje trenjem

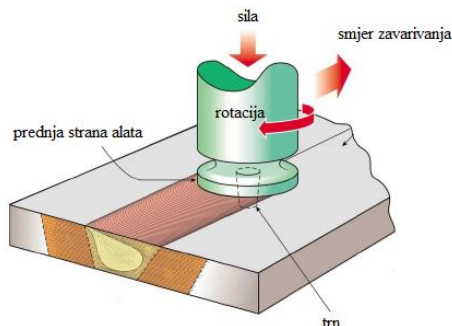
Zavarivanje trenjem vrši se u čvrstom stanju pod utjecajem topline koja se stvara pri trenju površina koje se zavaruju. Uz pomoć pritiska dijelovi se čvrsto spoje i nastaje zavareni spoj. Zavarivanje trenjem jedan je od najstarijih postupaka zavarivanja polimera za potrebe serijske proizvodnje. Zavarivanje trenjem nekad se izvodilo na običnim tokarilicama. Danas postoje rotacijski strojevi za zavarivanje koji ovaj postupak sve više dovode do izražaja. [14,15]



Slika 3.1.1. Princip zavarivanja rotacijskim trenjem [16]

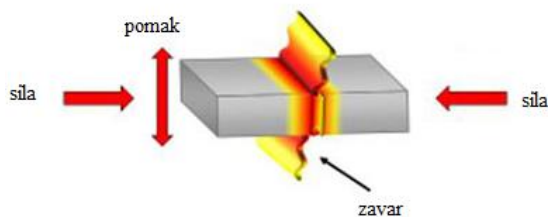
Gornjom slikom (slika 3.1.1) je detaljnije opisan postupak zavarivanja trenjem. Zavarivani dio je učvršćen u nosač koji se rotira i okreće. Mirujući dio se određenom silom tlači (F_1) na rotirajući dio te se uslijed trenja oba dijela zagrijevaju do plastičnog stanja. Kada je postignuta temperatura zavarivanja, rotirajući dio se zaustavlja pomoću kočnice. Primjenjuje se još veća aksijalna sila (F_2) i ostvaruje se zavareni spoj. Broj okretaja uređaja za zavarivanje kreće se od 500 do 3000 min^{-1} . Pritisak, kod ostvarivanja trenja, na dodirnim plohama iznosi od 40 do 60 N/mm^2 . Spajanje i sabijanje se vrši uz pritisak od 100 do 200 N/mm^2 . [15]

Bilo koji postupak zavarivanja koji koristi trenje kao način stvaranja veze može se smatrati zavarivanje trenjem. Međutim, u osnovi postoje tri primarna postupka zavarivanja trenjem. [17]



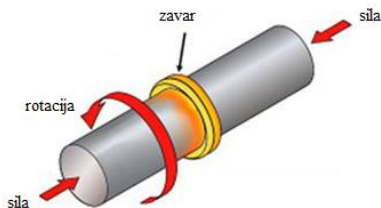
Slika 3.1.2. Pomično zavarivanje trenjem [17]

Pomično zavarivanje trenjem (slika 3.1.2.) se ostvaruje rotacijom alata pri čemu se materijal zagrijava, a pomoću pritiska se ostvaruje zavar. Alat se može gibati pravocrtno ili se može rotirati na jednom mjestu bez pomicanja. [17]



Slika 3.1.3. Linearno ili dužinsko zavarivanje trenjem [17]

Linearno zavarivanje trenjem (slika 3.1.3.) omogućuje zavarivanje površina koje se mogu pomicati u jednom smjeru. Jedan od materijala oscilira u odnosu na drugi pri velikim brzinama s velikim tlačnim silama pri čemu se uslijed zagrijavanja ostvaruje zavar. [17]



Slika 3.1.4. Rotacijsko zavarivanje trenjem [17]

Rotacijsko (okretno) zavarivanje trenjem (slika 3.1.4.) je postupak zavarivanja trenjem koji se najviše koristi. Od dva materijala, jedan se rotira preko površine drugog tamo gdje je potreban zavar. Proces koristi tlačnu aksijalnu silu i velike brzine vrtnje. Ovakav postupak uzrokuje plastificiranje dvaju materijala, što na kraju dovodi do stvaranja zavara. [17]

Proizvodnost zavarivanja trenjem je vrlo visoka što je poželjno u masovnoj ili serijskoj proizvodnji za izradu relativno velikih serija. Jedan od najpoznatijih proizvoda koji se sastavljaju zavarivanjem trenjem su termoplastični usisni razvodnici za automobilsku industriju (slika 3.1.5.). [18]



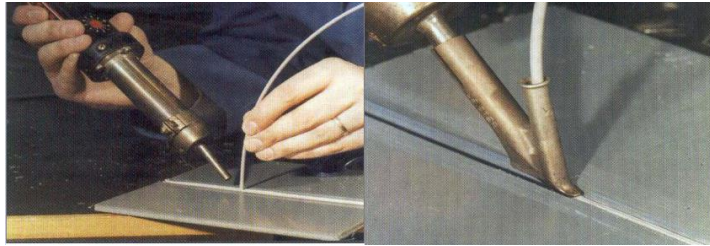
Slika 3.1.5. Tipični usisni razvodnik sastavljen postupkom zavarivanja trenjem [18]

Ovim postupkom mogu se zavarivati relativno velike dijelovi i komponentne, ostvaruje se visokokvalitetan zavar, vrijeme zavarivanja je kratko i nije potreban dodatan materijal, jednostavno je upravljanje parametrima zavarivanja i velika je brzina stvaranja spoja. [15,18]

Ipak, neki materijali mogu stvoriti čestice nalik prašini što u nekim primjenama može predstavljati probleme. Radi lakšeg zavarivanja barem jedan od dijelova koji se zavaruju bi trebao imati kružnu simetriju, veliki nedostatak je ograničenje oblika zavarenih dijelova, a poželjna je minimalna krutost. Zavarivanje trenjem najviše se primjenjuje u automobilskoj industriji, brodogradnji, elektrotehnici, a sam postupak se još uvijek razvija i radi se na njegovom usavršavanju. [18]

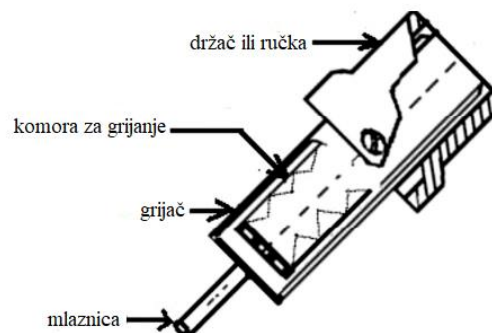
3.2. Zavarivanje toplim zrakom ili plinom

Zavarivanje *toplom zrakom ili plinom* spada u ručne postupke zavarivanja. Plin (obično zrak) se zagrijava električnim grijačem smještenim unutar pištolja za zavarivanje. Mogu se koristiti zapaljivi plinovi (kisik, vodik) i nezapaljivi plinovi (ugljičkov dioksid, dušik). Pomoću mlaznice pištolja, osnovni i dodatni materijal („šipka“) se istovremeno zagrijavaju vrućom strujom plina sve dok ne omekšaju, a zavar se ostvaruje uz pomoć pritiska. Dodatni materijal bi trebao biti jednakog sastava kao i osnovni materijal. Zavarivanje se može vršiti i bez dodatnog materijala. Temperatura vrućeg zraka kreće se u rasponu od 200 do 600 °C, ovisno o materijalu. Previsoka temperatura može dovesti do termičkog razlaganja materijala i pojave ogorina. Zavarivanje vrućim plinom može se koristiti kod većine termoplasta, ali najčešće se za zavarivanje koristi PVC. Osim PVC-a postoje još neki polimeri koji se mogu zavariti ovom tehnikom kao što su polietilen, polipropilen, polistiren i polikarbonat. [19,20]



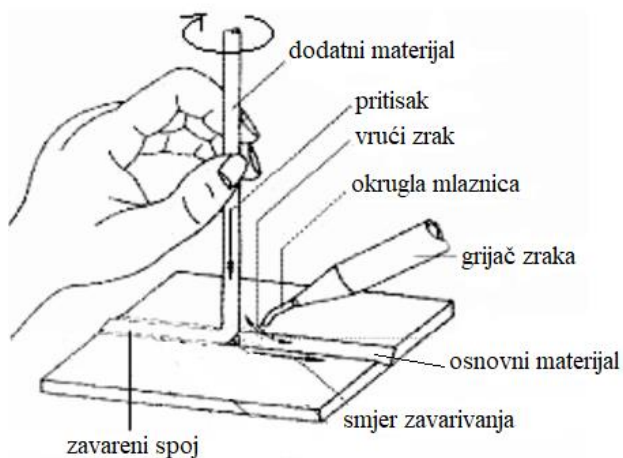
Slika 3.2.1. Postupak zavarivanja vrućim zrakom ili plinom [19]

Pištolj za zavarivanje sastoji se od čvrste ručke ili držača, komore za grijanje s regulacijom temperature za proizvodnju vrućeg plina i mlaznice pomoću koje zagrijani plin napušta pištolj kako bi zagrijao plastičnu šipku i podlogu. [20]



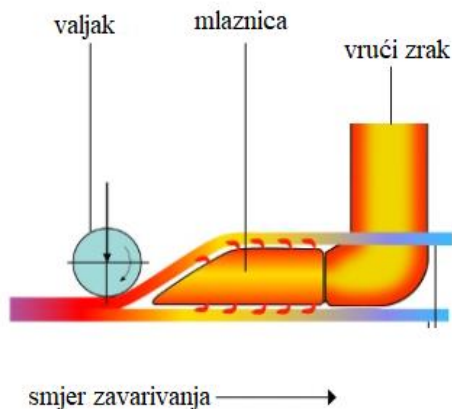
Slika 3.2.2. Osnovni elementi pištolja za zavarivanje [20]

Slika (slika 3.2.3.) prikazuje postupak zavarivanja vrućim zrakom. Zagrijani zrak dolazi iz mlaznice pištolja i na taj način zagrijava osnovni i dodatni materijal. Stvara se termoplastično stanje, a pritiskom se ostvaruje zavareni spoj. Dodatni materijal je uobičajeno ima promjer od dva, tri ili četiri milimetara, a dužina je manja od jednog metra. Pritisak se određuje s obzirom na promjer žice dodatnog materijala. [20]



Slika 3.2.3. Postupak zavarivanja vrućim zrakom [20]

Zavarivanje je moguće ostvariti i bez dodatnog materijala što je prikazano slikom (slika 3.2.4.). Vrući zrak se doprema između dva dijela materijala ili ploča koje se ravnomjerno zagrijavaju. Pritisak se ostvaruje valjcima koji stvaraju zavareni spoj. Obično se pritisak ostvaruje pomoću dva valjka kako bi se osiguralo snažno zavarivanje.



Slika 3.2.4. Zavarivanje vrućim zrakom bez dodatnog materijala [21]

U procesu zavarivanja vrućim plinom postoje četiri glavna parametra zavarivanja: temperatura plina, pritisak, brzina zavarivanja i položaj pištolja. Temperatura je najvažniji parametar jer se kontrolira samo postavkom na pištolju, već i brzinom kretanja pištolja i položajem pištolja u odnosu na podlogu. Temperatura vrućeg zraka je između 200-600 °C, a brzina hoda pištolja je obično između 0,1 i 0,3 m/min, što ovisi o materijalu koji se zavaruje. Budući da je postupak ručni, važno je da zavarivač poštuje sve parametre i da posjeduje nužne vještine kako bi se postigao kvalitetan zavar. [19,20]

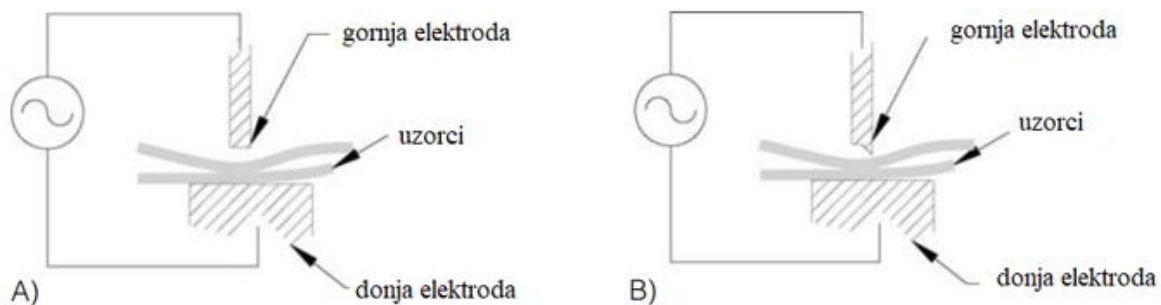
Plastika	Temperatura zavarivanja
Akrilonitril butadien stiren (ABS)	350 °C
Akril	350 °C
Tvrđi PVC	220 - 300 °C
Hypalon	600 °C
Polietilen (tvrđi)	250 - 280 °C
Polietilen (meki)	270 - 300 °C
Poliisobutilen	600 °C

Tablica 3.2.1. Različite vrste plastike s temperaturom zavarivanja [20]

Postupak zavarivanja vrućim zrakom ili plinom je jednostavan i ne zahtijeva skupu opremu. Može se koristiti u visokoserijskoj proizvodnji za zavarivanje jednostavnijih dijelova u automatiziranoj verziji. Za ručnu metodu zavarivanja ključno je znanje i sposobnost zavarivača koji kontrolira parametre zavarivanja. Zavarivanje vrućim zrakom relativno je spor postupak. Najviše se zavaruju ploče, cijevi, spremnici za skladištenje kemikalija ili vode te razni drugi rezervoari, ventilacijski kanali, vodovodni elementi. [19,20]

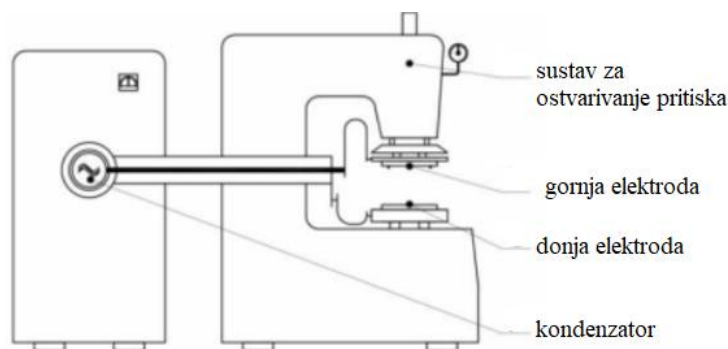
3.3. Visokofrekventno zavarivanje

Visokofrekventno zavarivanje (*radiofrekvencijsko zavarivanje ili dielektrično zavarivanje*) koristi visokofrekventnu (13 MHz do 100 MHz) elektromagnetsku energiju za stvaranje topline u polarnim materijalima pri čemu dolazi do taljenja materijala i stvaranja zavora nakon hlađenja. Termoplast se stavlja između elektroda, a visokofrekventni signal uzrokuje porast temperature materijala i povećanu pokretljivost polimernog lanca. Polimerni lanci, dvaju materijala koji se zavaruju, se međusobno zapliću i pod pritiskom steznih šipki stvara se zavar. Visokofrekventno zavarivanje se isključivo koristi za zavarivanje tankih folija i filmova. Debljina se obično kreće od 0,03 mm – 1,27 mm ovisno o materijalu i primjeni. Ograničenje folija za zavarivanje je u tome što se mora stvoriti jako električno polje, a to se može postići samo kad se elektrode za zavarivanje nalaze u neposrednoj blizini. Ako su elektrode previše udaljene, gustoća električnog polja biti će premala kako bi se plastična masa zagrijala. Materijali koji se spajaju moraju imati odgovarajuća električna svojstva, a jedno takvo svojstvo je visoka dielektrična konstanta (>2). To omogućuje propuštanje više struje kroz materijal, što pospješuje zagrijavanje pri nižem naponu elektrode. Poželjno je da materijal ima veliki dielektrički gubitak. Osnovna ideja je uspostavljanje visokog električnog polja na filmove koji se spajaju. Električno polje ostvaruje se pomoću elektroda koje moraju materijalu osigurati visokofrekventnu električnu energiju kako bi pod pritiskom došlo do spajanja rastaljenog materijala (*slika A*) 3.3.1.). Elektrode su spojene na visokonaponski, visokofrekventni (27,12 MHz) izvor napajanja koji je podešen tako da odgovara električnoj impedanciji zavora. Ponekad elektroda reže filmove i foliju do konačnog oblika (*slika B*) 3.3.1.). Kako elektrode pod utjecajem električnog polja ne smiju doći u kontakt, povremeno ostane malo materijala što operater mora odstraniti. [18]



Slika 3.3.1. Položaj elektroda visokofrekventnog zavarivanja [18]

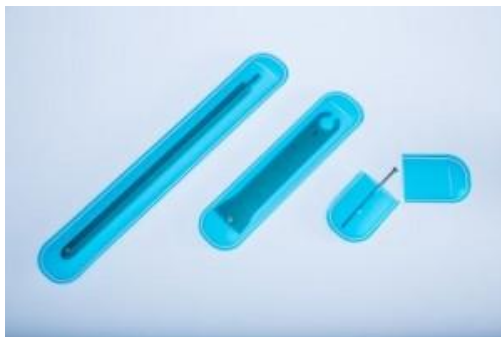
Glavni dijelovi uređaja za visokofrekventno zavarivanje su generator i presa. Visokofrekventni generator pretvara mrežnu frekvenciju od 50 Hz na potrebnu frekvenciju za zavarivanje. Kondenzator regulira prijenos električne energije, a energija se iz generatora prenosi na presu na kojoj se nalaze elektrode. Elektrode su napravljene od bakra ili mesinga. [22]



Slika 3.3.2. Uređaj za visokofrekventno zavarivanje [22]

Nedavno su razvijeni aditivi i dodaci koji omogućuju zavarivanje čak i nepolarnih materijala. Druga poboljšanja uključuju novi dizajn strojeva s automatskim napajanjem koji prate promjene električne impedancije tijekom zavarivanja. [18]

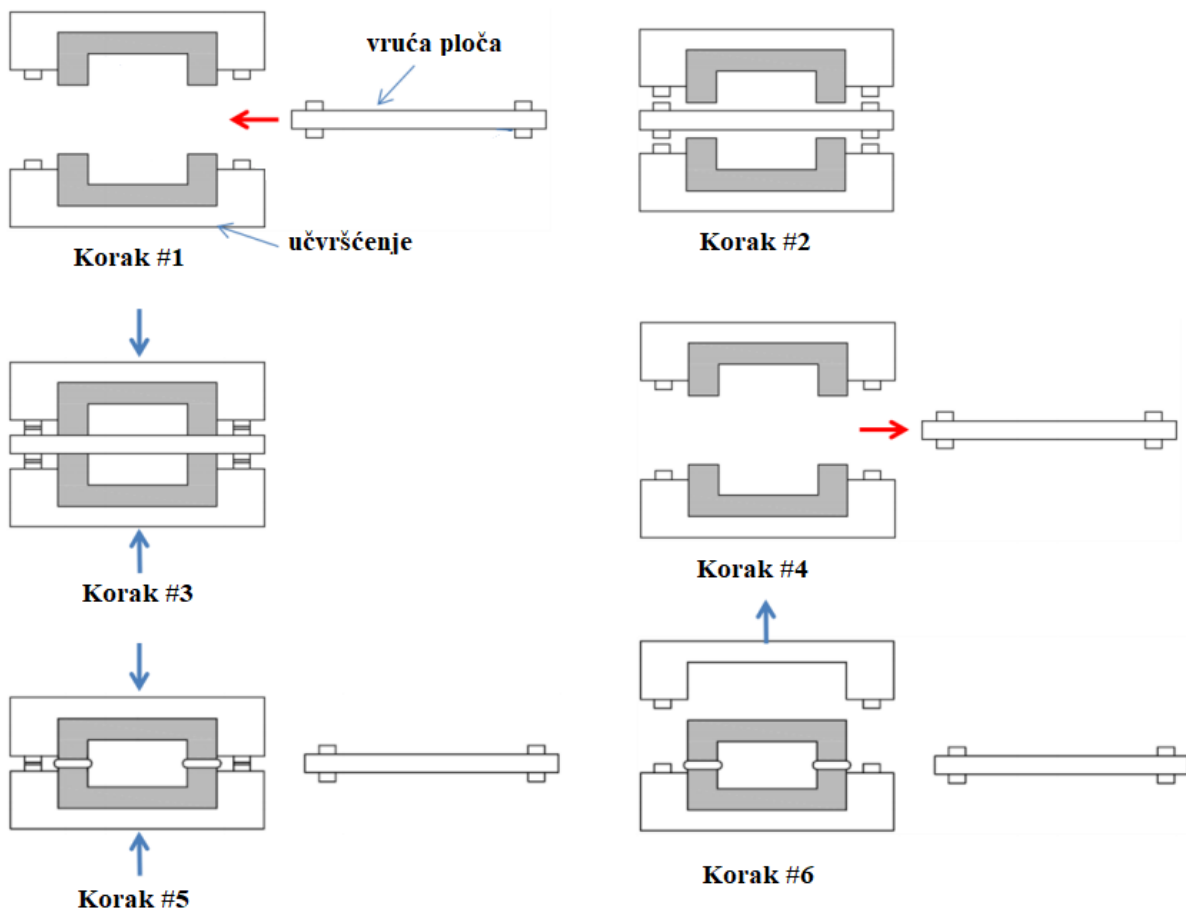
Ovaj postupak zavarivanja je relativno brz s uobičajenim vremenom zavarivanja između 1 - 5 sekundi. Najčešći termoplasti koji se zavaruju ovim postupkom su PVC (poli(vinil-klorid)) i poliuretani. Zagrijavanje strujama visoke frekvencije je koncept koji koristi mikrovalna pećnica. Hrana se pomoću visokofrekventne energije zagrijava u zatvorenom prostoru (bez kompresije). Visokofrekventno zavarivanje najčešće se koristi u pakiranju, a posebno je pogodno za potrebe medicinske industrije u pakiranju raznih uređaja za njegu rana i za proizvodnju raznih vrećica jer se ne koriste ljepila ili otapala. [18]



Slika 3.3.3. Navlake za medicinska pomagala od termoplastičnog poliuretanskog filma [23]

3.4. Zavarivanje zagrijanim elementom

Zavarivanje zagrijanim elementom jedna je od najjednostavnijih tehnika zavarivanja što ovaj postupak čini vrlo pouzdanim i uobičajenim u industriji. Plastične mase zagrijavaju se do temperature zavarivanja tako da se između zavarenih područja postavi planparalelna zagrijana vruća ploča konstantne temperature koja direktno grije krajeve plastičnih masa. Vruća ploča zagrijava se pomoću električne energije, a ponekad se ploče prevlače neljepljivim materijalom, teflonom, radi lakšeg oslobađanja. Same ploče proizvode se od materijala koji imaju dobru toplinsku provodnost i antikorozivnu osobinu, a najčešće su to legure aluminija. Nakon što plastična masa omekša, zagrijana ploča brzo se odstranjuje pri čemu se zavarivane površine pod određenim pritiskom spoje. Čistoća površine utječe na kvalitetu zavara, a vrijeme zavarivanja ovisi o toplinskoj vodljivosti i geometriji dijelova koji se zavaruju. Vruća ploča je obično ravna, ali se može oblikovati tako da odgovara profilu komponenta koje se zavaruju. [18]



Slika 3.4.1. Postupak zavarivanja zagrijanim elementom [24]

Postupak zavarivanja zagrijanim elementom se sastoji od šest koraka. U prvom koraku dijelovi koji se zavaruju su smješteni među čvrsto stegnute držače koji pružaju odgovarajuću potporu i omogućuju precizno poravnanje tijekom cijelog procesa zavarivanja. Zagrijana ploča postavlja se između dva termoplastična materijala koji se zavaruju. U trećem koraku zavarivani dijelovi su pritisnuti uz zagrijanu ploču kako bi došlo do omekšanja mase. Ploča se nakon toga odstranjuje, a zagrijana plastična masa učvršćuje se držačima. Pod djelovanjem pritiska dolazi do spajanja vrućih površina, a držači se potom mogu ukloniti. [24]



Slika 3.4.2. Zavarivanje cijevi vrućim alatom [19]

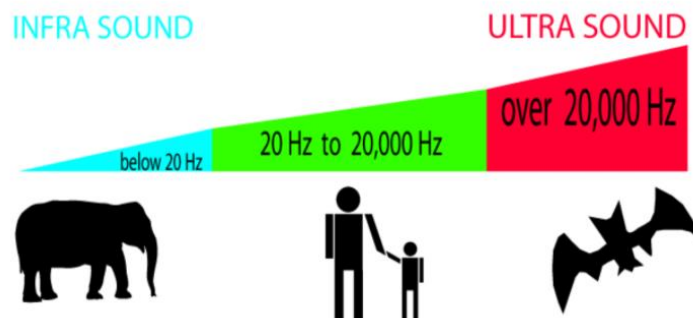
Slikom (slika 3.4.2.) je prikazano zavarivanje cijevi vrućim alatom. Paralelnost površina se ostvaruje pomoću planparalelnog rotirajućeg držača. Provodi se odmaščivanje rubova cijevi kako bi zavar bio što kvalitetniji. Za poravnanje površina općenito se još koriste mehanički uređaji ili spojnice. Između površina se postavlja grijač zagrijan do temperature zavarivanja. Primjenjuje se određena sila, a zatim se cijevi razmaknu pri čemu se brzo uklanja grijač. Važno je da se omekšane i zagrijane površine cijevi ne oštete. Cijevi se nakon toga brzo dovode u kontakt i pod pritiskom (silom stezanja) se ostvaruje zavareni spoj. Cijevi se održavaju u stegnutom stanju sve dok se temperatura ne spusti na željenu razinu (35-40°C) i tada se stezni alat može otpustiti. [19]

Postupci zavarivanja zagrijanim elementom su ekonomični i mogu biti automatizirani, a najviše se koriste u autoindustriji, za spajanje cijevi vodovoda i plinskih vodovoda iz termoplastičnih materijala. Za zavarivanje nije potreban dodatan materijal pa se zbog toga zavareni polimeri kasnije lakše recikliraju. Nedostatak zavarivanja zagrijanim elementom je relativno dugo vrijeme zavarivanja. Vrijeme zavarivanja za manje dijelove traje od 30 do 90 sekundi, a za veće dijelove može trajati do 30 minuta. [18]

4. Zavarivanje ultrazvukom

4.1. Tehnologija ultrazvuka

Ultrazvučno zavarivanje jedna je od najpoznatijih tehnika zavarivanja koja se koristi u industriji zavarivanja, a tehnologije koje koriste ultrazvuk zastupljene su gotovo svugdje. Ultrazvuk predstavlja zvučne valove koji nastaju titranjem materijalnih čestica frekvencija viših od 20 000 Hz. Ljudsko uho nije sposobno opažati tako visoku frekvenciju zvučnih valova. Životinje poput dupina ili šišmiša vješto koriste ultrazvučne valove za kretanje u divljini i pronalazak plijena. Tehnologija ultrazvuka najviše se koristi u medicini, u vojnoj industriji, svemiru, za navigaciju brodova (sonari), u ribarstvu za pronalazak jata riba i za mnoge druge primjene. Ultrazvuk se širi pomoću različitih medija kao što su tekućine, plinovi ili krute tvari. [25]



Slika 4.1.1. Infrazvuk i ultrazvuk [26]

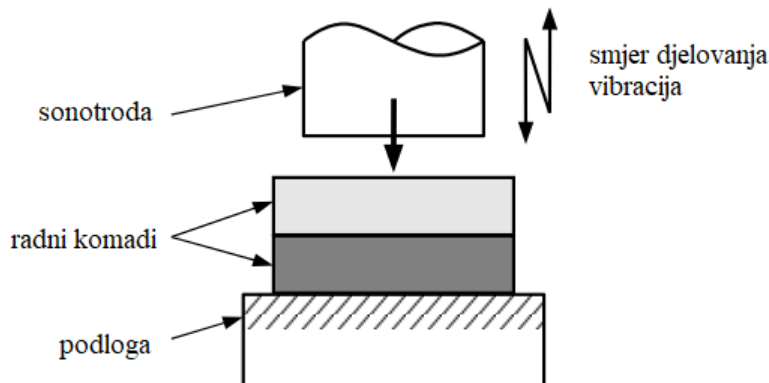
Infrazvukom se nazivaju zvučni valovi koji imaju prenisku frekvenciju (niže od 20 Hz) da bi ih ljudsko uho moglo čuti. Životinje poput slonova i kitova koriste se infrazvukom kako bi mogle komunicirati. Čovjek može čuti zvukove u rasponu frekvencija od 20 Hz do 20 000 Hz. Ultrazvuk koristi frekvencije (iznad 20 000 Hz) koje su previsoke da bi ih ljudsko uho moglo čuti. Šišmiši i ostale noćne životinje koriste se ultrazvukom čime kompenziraju slabo razvijen noćni vid. [25,26]

Ultrazvučno zavarivanje naročito je postalo popularno u jeku pandemije COVID-19 nakon što je došlo do manjka zaštitnih maska u cijelome svijetu. Upravo se ovaj postupak zavarivanja koristi za proizvodnju medicinskih maski i ostale zaštitne opreme iz polipropilena (PP). Renault je, kao i mnoge druge tvrtke, pokrenuo vlastitu proizvodnju zaštitnih maski kako bi zaštitili svoje zaposlenike. Proizvodna liniju su opremili uređajem za automatsko ultrazvučno zavarivanje. [27]

4.2. Postupak zavarivanja i primjena

Ultrazvučno zavarivanje relativno je nova tehnika zavarivanja. Koristi se lakoćom pri zavarivanju polimernih materijala amorfne strukture, poput polistirena, koji imaju nisku temperaturu omekšavanja. Potrebne su veće mehaničke vibracije i više planiranja kod zavarivanja polimernih materijala s kristalnom strukturom i amorfne plastike s višim temperaturama omekšavanja. [28]

Zavarivanje se postiže primjenom mehaničkih vibracija male amplitude (1 do 250 μm) i visoke frekvencije (10 do 70 kHz). Radni komadi, koji se zavaruju, postavljaju se između tzv. *sonotrode* i nepomičnog nakovnja. Sonotroda je pomični dio uređaja, ona vibrira ultrazvučnom frekvencijom i silom tlači zavarivane dijelove. Kao rezultat istodobnog djelovanja sile i mehaničkih vibracija dolazi do stvaranja topline. Kada temperatura dosegne točku taljenja termoplasta, materijal počinje teći te se uz prisutnost pritiska ostvaruje zavareni spoj. [15]

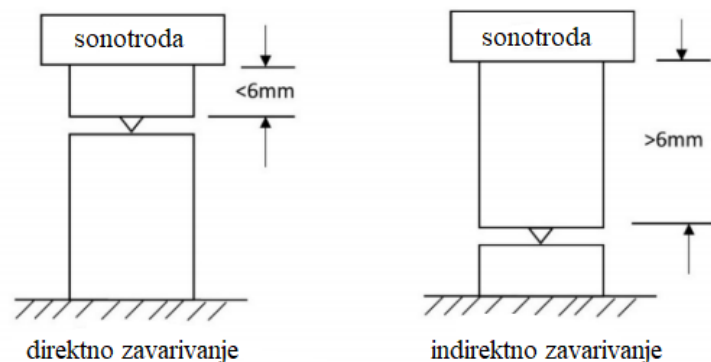


Slika 4.2.1. Postupak zavarivanja ultrazvukom [29]

Ultrazvučno zavarivanje termoplasta može se podijeliti u dvije kategorije ovisno o položaju sonotrode:

- direktno zavarivanje – udaljenost između sonotrode i točke zavarivanja je manja od 6 mm
- indirektno zavarivanje – udaljenost između sonotrode i točke zavarivanja je veća od 6 mm

Za direktno zavarivanje koriste se meki i porozni termoplasti, dok se za zavarivanje na daljinu koriste kruti termoplasti. Direktno i indirektno zavarivanje termoplasta prikazano je slikom (slika 4.2.2.). [29]



Slika 4.2.2. Direktno i indirektno zavarivanje termoplasta [30]

Glavni parametri ultrazvučnog zavarivanja su vrijeme zavarivanja, vrijeme zadržavanja, pritisak i amplituda vibracija. Ovi parametri ovise o vrsti termoplasta koji se zavaruju i načinu njihovog spajanja. [30]

Postupak ultrazvučnog zavarivanja je brz, ekonomičan, lako automatiziran i vrlo pogodan za masovnu proizvodnju s mogućnošću brzine proizvodnje do 60 dijelova u minuti. Vrijeme potrebno za zavarivanje je obično vrlo kratko, između 0,1 - 1 sekunde. Zavarivanje ultrazvukom je vrlo popularna metoda spajanja plastike i postaje važna metoda za zavarivanje polimernih kompozita. Iako se postupak najčešće koristi za zavarivanje plastičnih dijelova, postoje primjene i kod spajanja metala. Ultrazvučno zavarivanje moguće je na teško dostupnim mjestima, a izostanak štetnih emisija čini ovaj proces sigurnim za zdravlje. Najviše se zavaruju preklopni, sučeoni i T spojevi. Pojavom titraja poprečnih valova uklanjanju se sve nečistoće iz zone zavara (masti, prašina, ulje). Troškovi opreme su relativno niski, a mogu se ostvariti jaki zavareni spojevi koji su vizualno privlačni. [18,29]



Slika 4.2.3. Strojevi za ultrazvučno zavarivanje [31]

Ograničenje ovog postupka je da se uz postojeću tehnologiju veliki spojevi ne mogu zavariti u jednom postupku, a ultrazvučne vibracije mogu oštetiti električne komponente, iako upotreba opreme veće frekvencije može smanjiti tu štetu. Sonotroda je dizajnirana tako da funkcioniра na određenoj frekvenciji. Za svaki novi proizvod često je potrebno dizajnirati novu sonotrodu koja se mora prilagoditi materijalu koji se zavaruje. [18,29]

Ultrazvučno zavarivanje najviše se koristi u medicinskoj industriji, automobilskoj i elektroničkoj industriji, tekstilnoj industriji, industriji ambalaže, kod proizvodnje igračaka. Dubine zavara su manje od milimetra, tako da proces najbolje funkcioniра na tankim materijalima poput plastike, žica ili tankih limova od metala. [18,29]



Slika 4.2.4. Primjena ultrazvučnog zavarivanja kod izrade upaljača [18]

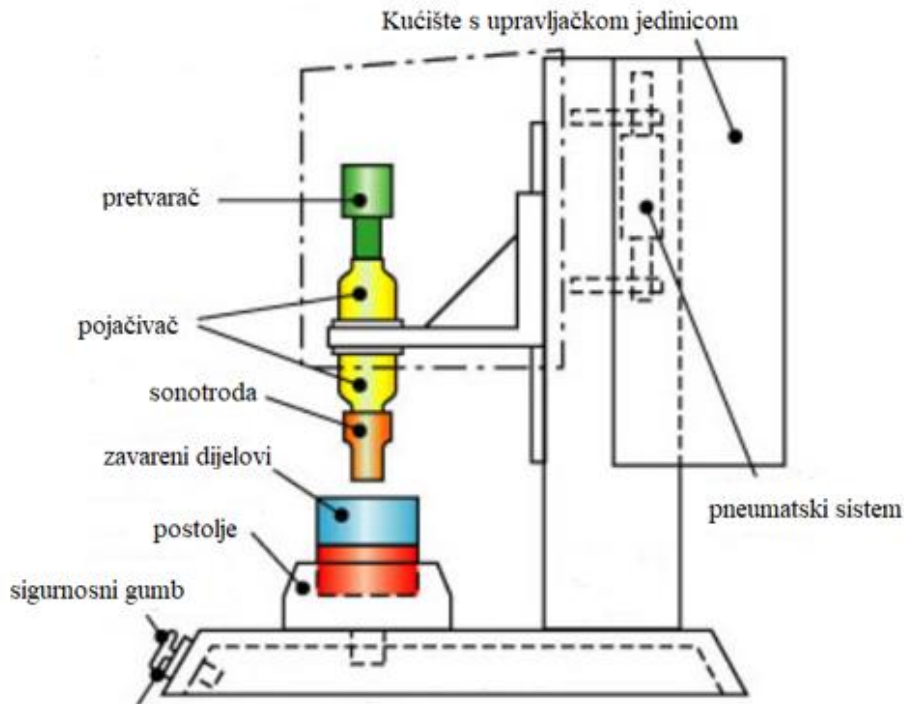
Jedna od najizazovnijih primjena ultrazvučnog zavarivanja je izrada standardnog jednokratnog upaljača. Takav proizvod je oblikovan iz polukristaličnog materijala (acetal). Acetal je termoplastični polimer koji pruža dobru čvrstoću i krutost, ali nije baš prikladan za ultrazvučno zavarivanje. Zavaruje se dno spremnika za gorivo, a spoj mora biti hermetički zatvoren i čvrst. Još neke uobičajene primjene ultrazvučnog zavarivanja prikazuje su slikom (slika 4.2.5.). [18]



Slika 4.2.5. Primjena ultrazvučnog zavarivanja (zaštitne maske, vatromet, ambalaža za mlijeko) [18]

4.3. Uređaj i oprema za ultrazvučno zavarivanje

Oprema za ultrazvučno zavarivanje je relativno složena i sofisticirana u usporedbi s opremom koja je potrebna za druge postupke zavarivanja. Glavni dijelovi uređaja za ultrazvučno zavarivanje su generator, pretvarač, pojačivač, sonotroda i postolje na koje se polažu uzorci prije i nakon zavarivanja. [28,30]



Slika 4.3.1. Uređaj za ultrazvučno zavarivanje [32]

Generator pretvara mrežnu električnu energiju, na frekvenciji od 50 - 60 Hz, u visokofrekventnu električnu energiju koja radi na 20 - 40 kHz. Visokofrekventna električna energija se isporučuje pretvaraču. Debljina zavarenih dijelova ograničena je snagom ultrazvučnog generatora.

Pretvarač je elektromehanički uređaj koji visokofrekventne električne oscilacije pretvara u visokofrekventne mehaničke vibracije. Kako bi se to olakšalo koristi se piezokeramički element koji ima stupanj iskorištenja od 95%. Ultrazvučni pretvarači opremljeni su sa četiri ili šest keramičkih diskova putem kojih se oscilacije najbolje prenose na izradak, čime se smanjuje vrijeme procesa i osigurava visoka pouzdanost procesa. [28,30]



Slika 4.3.2. Pretvarači za ultrazvučno zavarivanje [33]

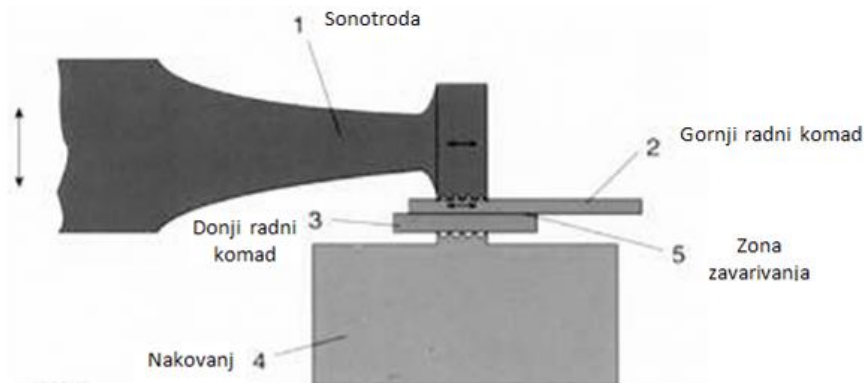
Pojačivač preuzima mehaničke vibracije koje je dobio od pretvarača. Pojačivač povećava, smanjuje ili samo prenosi vibracijsku amplitudu od pretvarača do sonotrode. Za veći ultrazvučni pojačivač biti će potrebno više snage za njegovo pokretanje. Za promjenu određene frekvencije potrebno je zamijeniti i sam pojačivač. Kako bi postupak dobro funkcionirao, pojačivač, sonotroda i pretvarač moraju biti dobro sinkronizirani. Pojačivač koji zadovoljava potrebnu amplitudu i frekvenciju, bitno će produžiti radni vijek ostalih dijelova, a ponajviše sonotrode. Pojačivači su uglavnom napravljeni od titana ili aluminijska. [28,30]



Slika 4.3.3. Pojačivači za ultrazvučno zavarivanje [34]

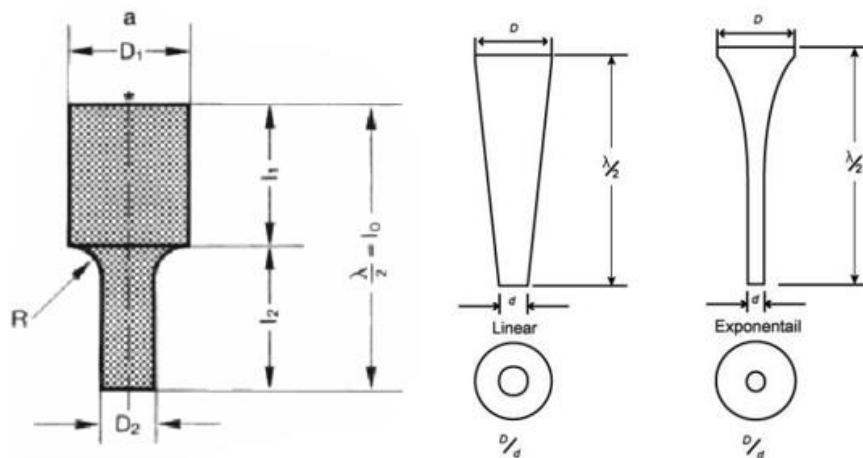
Sonotroda ima funkciju prijenosa mehaničkih oscilacija na dijelove koji se zavaruju. Osim što vibrira ultrazvučnom frekvencijom, sonotroda primjenjuje pritisak na zavarivane dijelove kako bi se ostvario zavar. Kvaliteta sonotrode je presudna za uspješno zavarivanje i obično se proizvode iz aluminijska i titana. Dolaze u različitim veličinama i oblicima, a potrebno je puno napora uložiti u dizajniranje kako bi ispravno prenosile vibracije na radni komad. Aluminijske sonotrode obično se koriste za zavarivanje manjih količina komada s obzirom da je trošenje problem kod ovog materijala. Pojedine sonotrode imaju posebno očvrstnute i otvrdnute vrhove kako bi se smanjilo trošenje prilikom zavarivanja. Vrh sonotrode treba biti posebno dizajniran kako bi odgovarao komponenti koja se zavaruje.

Na taj način se osigurava postizanje maksimalnog prijenosa energije između sonotrode i komada. Obično je vrh sonotrode napravljen tako da odgovara konturama komada. Potrebna je konstantna kontrola sonotrode jer ako je neispravna, može dovesti do velikih oštećenja i kvara samog stroja. Za gotovo svaki slučaj novog proizvoda, potrebno je načiniti i primijeniti novi alat (sonotrodu). [28,30]



Slika 4.3.4. Princip neprekinutog ili točkastog ultrazvučnog zavarivanja [10]

Kod dizajniranja sonotrode najvažniji kriterij je njezina duljina, a na temelju frekvencijskih analiza dolazi se do ostalih dimenzija. Sonotroda treba biti u rezonanciji s radnom frekvencijom pretvarača kako bi se minimalizirali gubici i kako bi se prenijela maksimalna energija s pretvarača na zavarivani dio. Njezina duljina trebala bi odgovarati poluvalnoj duljini ($\lambda/2$) iniciranih valova sustava. Slika (slika 4.3.5.) prikazuje oblike sonotrode koje se najviše koriste u praksi. [35]



Slika 4.3.5. Stepenasti, stožasti i eksponencijalni oblik sonotrode [35]

Postolje se koristi za poravnavanje dijelova koji se moraju držati u stanju mirovanja tijekom zavarivanja. Često se *postolje* izrađuje tako da odgovara konturama komponente koja se zavaruje. Ponekad se uspješno zavarivanje može izvršiti kada dijelovi nisu učvršćeni i slobodni su vibrirati. [28,30]

Uspješno zavarivanje ovisi o pravilnoj amplitudi vibracija koje se javljaju na vrhu sonotrode. Odgovarajuća amplituda vibracija određuje se na temelju termoplasta koji se zavaruju i njihove temperature taljenja. Polimerni materijali polukristalne strukture zahtijevaju više energije, veću amplitudu vibracija u odnosu na polimerne materijale amorfne strukture. [28,30]

Kako u zavarivanju i oblikovanju plastike prevladavaju vrlo visoke amplitude, sonotroda je podvrgnuta velikim opterećenjima. To znači da se mogu koristiti materijali s velikom čvrstoćom na udar i malom apsorpcijom. Zbog toga se sonotrode najviše izrađuju iz aluminijske i titanske legure koje pokazuju veliku stabilnost, a mogu izdržati potrebne vrijednosti amplituda. [36]

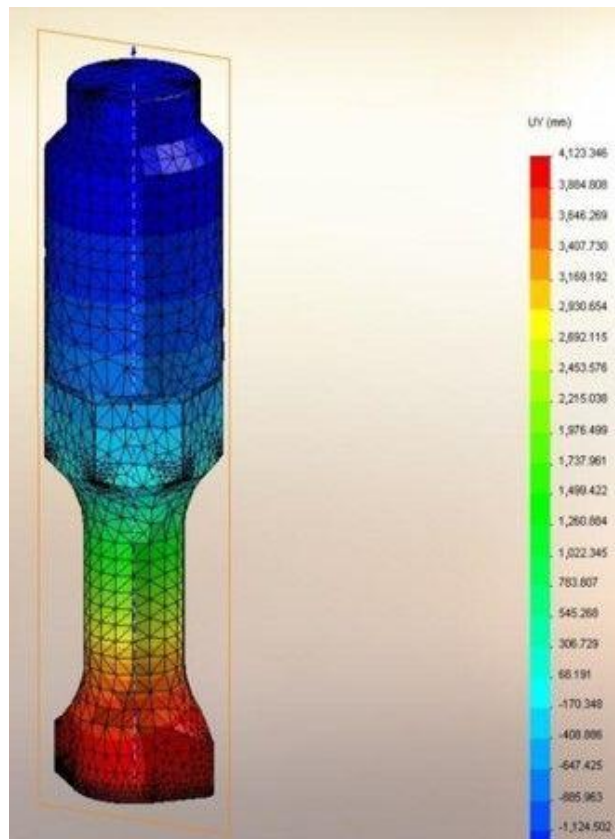
Amplitude su tipično između 30 i 120 μm . Oblik sonotrode važan je jer naprezanje, uzrokovano aksijalnim širenjem i stezanjem sonotrode, može dovesti do pucanja u primjenama velike amplitude. U nekim se primjenama sonotrode proizvode s prorezima u aksijalnom smjeru. To osigurava da maksimalna amplituda vibracija bude u uzdužnom smjeru. [36]

Materijal	Amplituda (μm) Vrijednosti primjenjive u praksi
Polistiren (PS)	15 - 30
Stiren/butadien (SB)	20 - 35
Akrilonitril/butadien/stiren (ABS)	20 - 30
Stiren/akrilonitril (SAN)	15 - 30
Poli(metil-metakrilat) (PMMA)	20 - 35
Poli(fenilen-oksidi) (PPO)	25 - 40
Polikarbonat (PC)	25 - 40
Poli(oksimetilen) (POM)	40 - 50
Poliamid (PA)	35 - 55
Poli(etilen-tereftalat) (PET)	45 - 55
Poli(vinil-klorid) (PVC)	20 - 40
Polietilen (PE)	25 - 60
Polipropilen (PP)	30 - 60

Tablica 4.3.1. Vrijednosti amplituda u ultrazvučnom zavarivanju [37]

4.4. Projektiranje i proizvodnja sonotroda za ultrazvučno zavarivanje

Tvrtka Telsonic AG iz Švicarske jedna je od svjetskih lidera u primjeni energije ultrazvuka. Za projektiranje i analizu sonotrode, te svih ostalih komponenata sistema, inženjeri Telsonica koriste Solidworks softver. Pomoću Solidworks softvera može se ispitati veliki broj geometrijskih kombinacija sonotroda s ciljem dobivanja optimalnog oblika. Konačni oblik će se u 95% slučajeva ponašati onako kako je to predvidio SolidWorks u svojoj simulaciji. [38,39]



Slika 4.4.1. Sonotroda u SolidWorks softveru [39]

Analiza frekvencije u softveru SolidWorks prikazuje prirodne frekvencije sonotrode na temelju kojih se pokušava predvidjeti ponašanje sonotrode na drugim točno određenim frekvencijama.

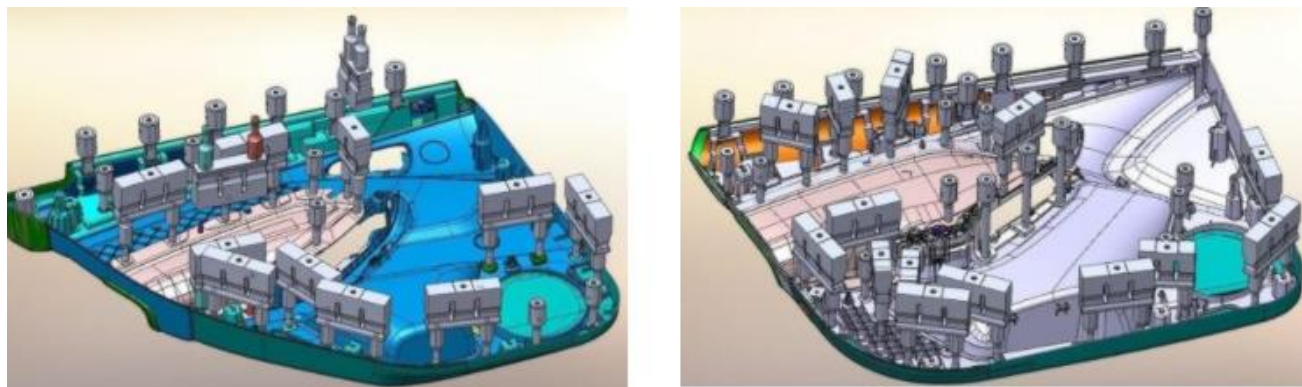
Nakon što se definira geometrija, pokreće se simulacija rada sonotrode u Solidworks softveru te se rade korekcije ukoliko je to potrebno. Ispravne sonotrode spremne su za obradu na CNC strojevima. Tehnologija obrade najprije se provjerava u SolidCAM softveru iz kojega se program šalje na glodalice u tokarilice.

Nakon strojne obrade, frekvencijske karakteristike svake sonotrode provjeravaju se uz pomoć specijalizirane mjerne opreme, a ovisno o rezultatima mjerenja vrše se korekcije. Zbog poklapanja prirodne frekvencije sonotrode s frekvencijom pobude dolazi do rezonancije, koja je presudna za sam postupak zavarivanja. Sonotroda prenosi vibracije na zavarivane dijelove, a na točkama spajanja, stvara se toplina pri čemu dolazi do povezivanja. Sonotroda se konstruira na način da slijedi oblik dijelova koji se spajaju, a istovremeno mora ući u rezonanciju točno poznatom frekvencijom koja dolazi iz pretvarača. Većina inženjera iz drugih industrija želi izbjeći pojavu rezonancije u svojim konstrukcijama. [39]



Slika 4.4.2. Sonotrode (alati za zavarivanje) [39]

Primjeri na slikama (slika 4.4.3.) pokazuju veliki broj sonotroda koje su potrebne za zavarivanje svih plastičnih elemenata interijera na vratima automobila Ford Focusa.



Slika 4.4.3. Sonotrode i vrata za Ford Focus [39]

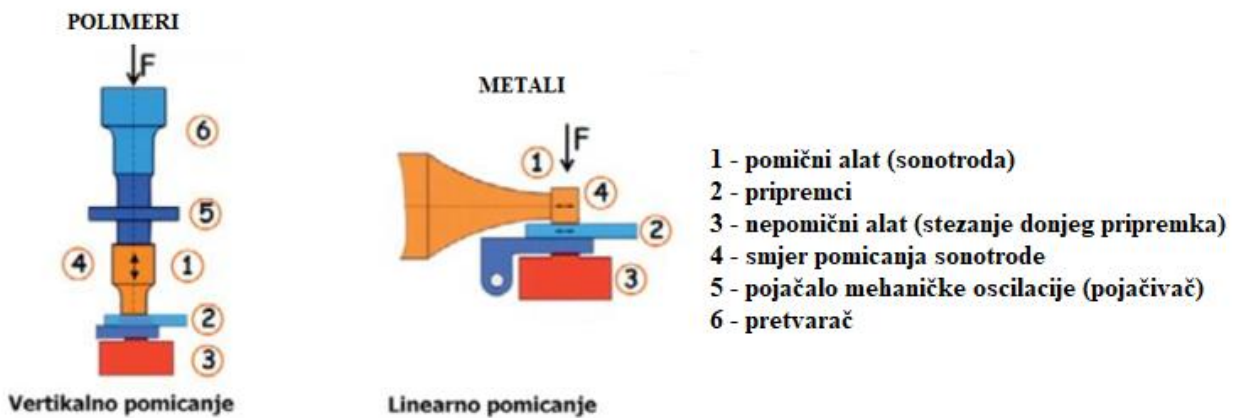
Složene igračke također se zavaruju ultrazvukom, a mjesto spajanja dijelova je gotovo nevidljivo. Inženjeri tvrtke Telsonic dizajnirali su geometriju sonotrode u softveru SolidWorks na temelju složene geometrije polovica igračkaka koje su spojene. Ponašanje sonotroda simulirali su pomoću softvera Solidworks Simulation s ciljem dobivanja idealnog nepropusnog spoja na igračkama. Na temelju optimizirane geometrije, razvili su tehnologiju u softveru SolidCAM, koristeći tehnologiju iMachining.

Ultrazvučnim zavarivanjem spajaju se igračke jer se time izbjegavaju potencijalno opasna ljepila, lemovi i vijci. [39]



Slika 4.4.4. Igračke zavarene pomoću ultrazvuka [39]

4.5. Osnovna načela ultrazvučnog zavarivanja metala i plastomera



Slika 4.5.1. Ultrazvučno zavarivanje metala i plastike [40]

Kod ultrazvučnog zavarivanja plastomera, smjer vibracije sonotrode je okomit na položaj zavarivanja. Pri ultrazvučnom zavarivanju metala, smjer vibracije sonotrode je paralelan s položajem zavarivanja. Postoje posebni slučajevi gdje se tanki plastični dijelovi mogu zavarivati u paralelnom smjeru. Osim zavarivanja plastike moguće je ultrazvučno zavariti i metalne dijelove u plastici. [40]

Metalni dijelovi koji se zavaruju, posebno se ne zagrijavaju do točke taljenja. Temperatura koja se razvija pri ultrazvučnom zavarivanju metala je daleko ispod temperature taljenja spajanog materijala. Na taj način se mogu spriječiti neželjena svojstva koja mogu nastati uslijed izloženosti materijala prema visokim temperaturama.

Kod zavarivanja metala, pri dovoljno velikom pritisku i amplitudi gibanja dolazi do tečenja materijala. Toplina koja je nastala pod utjecajem trenja dovodi materijal u području zavarivanja u kvazi-rastaljeno stanje. Zbog prisnog kontakta počinju djelovati međuatomarne sile te se ostvaruje zavareni spoj. [15]

Ultrazvučno zavarivanje metala zahtjeva veći kapacitet snage i veću gustoću snage, bolju stabilnost i kontrolu automatizacije. Za ultrazvučno zavarivanje metala potreban je stabilni ultrazvučni generator velike snage. Generator mora omogućiti automatsko praćenje frekvencija. Automatsko praćenje frekvencija je važno da bi pretvarač mogao raditi u rezonantnom stanju i kako bi amplituda sonotrode za zavarivanje bila maksimalna. [41]

Kod zavarivanja metala važan je rad bez frekvencijske modulacije. Generator zahtijeva stalnu amplitudu koja osigurava ujednačeno zavarivanje što je ključno za stabilnu proizvodnju. Isto tako generator zahtijeva i podesivu amplitudu. Pomoću podesive amplitude može se na istoj opremi zavariti i bakar i aluminij. [41]

Za ultrazvučno zavarivanje metala potrebna je veća snaga i visoka gustoća energije. Zbog toga je nužno osigurati veliki kapacitet snage. Zavarivačka glava (sonotroda) mora biti dugotrajna i visokokvalitetna, što znači da i pretvarač mora biti otporniji na opterećenja. Potreban je kvalitetan sustav upravljanja kako bi se moglo upravljati energijom zavarivanja i vremenom zavarivanja. [41]

Ultrazvučno zavarivanje metala koristi se za zavarivanje tankih žica, ploča i limova te pojaseva od obojenih metala poput aluminija, bakra, nikla, kositra, molibdena, srebra, zlata i nehrđajućeg čelika. [42]



Slika 4.5.2. Primjena ultrazvučnog zavarivanja metala kod električnih kabela [42]

5. Zaključak

Posljednja polovica stoljeća obilježena je neprestanim porastom upotrebe i važnosti plastičnih masa u strojarскоj industriji, stoga je upotrebu ultrazvučnog zavarivanja moguće je vidjeti u najširem spektru industrija, medicinskoj, automobilskoj, elektroničkoj, industriji ambalaže, igračaka, kućanskih aparata, odnosno svim onim za koju je adekvatnu izvedbu potreban čvrst, uzak i vizualno besprijekoran zavar. Učestalija upotreba plastičnih masa vuče za sobom problematiku poboljšavanja i usavršavanja postupaka spajanja plastičnih masa, posebice postupaka zavarivanja koji su ujedno i najzastupljeniji.

Ultrazvučno zavarivanje jedan je od najpopularnijih postupaka zavarivanja polimera. Postupak zavarivanja ultrazvukom obavlja se pomoću uređaja koji se sastoji od pomičnog dijela –sonotrode koji funkcionira na bazi ultrazvučne frekvencije te nepomičnog dijela- nakovnja. Postavljanjem radnih komada za spajanje između sonotrode i nakovnja započinje aktivacija sonotrode koja malenom silom tlači dijelove koje je potrebno zavariti, no opet s dovoljnom razinom tlaka i amplitude vibracije, pri čemu se materijal na dodirnim plohama tali, odnosno zavaruje.

Ovaj postupak zavarivanja je brz i ekonomičan, pogodan za masovnu proizvodnju. Vrijeme zavarivanja je manje od jedne sekunde, a moguće je zavarivanje na teško dostupnim mjestima. Još jedan od benefita ovog postupka jest izostanak čišćenja ploha prije zavarivanja zbog učinka titraja poprečnih valova koji uklanjaju sve nečistoće iz zavara. Kvaliteta zavara ovisi o kvaliteti i debljini materijala, kao i kvaliteti sonotrode koja prenosi vibracijsku energiju direktno na dijelove koji se zavaruju. Najčešće je za svaki novi proizvod, potrebno načiniti i primijeniti novu sonotrodu. Veliki spojevi se ne mogu zavariti u jednom postupku, ultrazvučne vibracije mogu oštetiti električne komponente, a oprema veće frekvencije može smanjiti tu štetu. Uspješno se zavaruju plastomeri jer se njihov ciklus omekšavanja i taljenja, tj. hlađenja i skrućivanja može stalno ponavljati.

Neosporivi problem štetnosti zavarivačkih plinova nastalih prilikom zavarivanja metala izbjegnut je pri zavarivanju plastičnih masa čiji zavarivački plinovi jednostavnog kemijskog sastava nastali na niskim temperaturama imaju znatno manji štetan učinak na zdravlje zavarivača.

Varaždin, 23. listopada 2020., Enio Beloša

LIBRARIUM
ALISTRAINO

Sveučilište
Sjever



SVEUČILIŠTE
SJEVER

**IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski 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, ENIO BELOŠA (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ULTRAZVUČNO ZAVARIVANJE TERMOPLASTA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Enio Beloš

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, ENIO BELOŠA (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ULTRAZVUČNO ZAVARIVANJE TERMOPLASTA (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Enio Beloš

(vlastoručni potpis)

LITERATURA

- [1] S. Šolić; Tehnologija II, predavanja i vježbe, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2020.
- [2] Kovačić T.; Struktura i svojstva polimera, Sveučilišni udžbenik, Split, 2010.
- [3] <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/polimerizacija.pdf>, rujan, 2020.
- [4] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/polimerni_materijali_sve.pdf, rujan, 2020.
- [5] <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Podjela%20polimeria.pdf>, rujan, 2020.
- [6] A. Šestan; Tehnologija materijala i obrade, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1998.
- [7] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof; Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [8] https://e-ucenje.unipu.hr/pluginfile.php/76968/mod_resource/content/1/10%20Polimeri.pdf, rujan, 2020.
- [9] <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/polimeri.pdf>, rujan, 2020.
- [10] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/zavarivanje_i_srodni_postupci.pdf, rujan, 2020.
- [11] F. Toufar; Tehnički materijali 1, Školska knjiga, Zagreb, 2007.
- [12] R. Begić; Postupci spajanja plastičnih masa, Tehnički fakultet Bihać. Bihać, 2019.
- [13] M. Horvat; Tehnike spajanja, predavanja i vježbe, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2020.
- [14] O. Pašić; Zavarivanje, Svjetlost, Sarajevo, 1998.
- [15] S. Kralj, Š. Andrić; Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [16] <https://weldingproductivity.com/article/added-friction/>, rujan, 2020.
- [17] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-friction-welding>, rujan, 2020.
- [18] D. Grewell, A. Benatar; Review article, Welding od plastics: Fundamentals and New Developments, Iowa State University, Ames (USA), 2007.
- [19] V. Ilić i M. Antić; Zavarivanje plastičnih masa I deo, stručni članak, Beograd, 2009.

- [20] M. Haque; Article, Plastic Welding: Important Facts and Developments, Integral University, Lucknow (India), 2016.
- [21] <https://www.stanmech.com/articles/wedge-versus-hot-air-welding-of-industrial-fabrics>, rujan, 2020.
- [22] Čebular A., Stepanova A., Šorli. I., Podržaj P.; Weld quality evaluation in radiofrequency PVC welding process, University of Ljubljana, Ljubljana, 2011.
- [23] <https://www.ufpt.com/resource-center/rf-high-frequency-welding/>, rujan, 2020.
- [24] <http://www.kepital.com/en/>, rujan, 2020.
- [25] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Ultrazvuk> , rujan, 2020.
- [26] <https://sofiasounds.weebly.com/ultrasonic-sound-and-infrasonic-sound.htmlk> , rujan, 2020.
- [27] <http://autostil.com.hr/renault-pokrece-proizvodnju-zastitnih-maski/> , rujan, 2020.
- [28] <http://academic.sun.ac.za/mad/catalogs/DFMGuidelines/DuPontGeneralDesignPrinciples.pdf> rujan, 2020.
- [29] J. Qiu, G. Zhang, E. Sakai, W. Liu, L. Zang; Thermal Welding by the Third Phase Between Polymers: A Review for Ultrasonic Weld Technology Developments, Faculty of Systems Science and Technology, Akita (Japan), 2020.
- [30] S. Bhudolia, G. Gohel, K. Leong, A. Islam; Advances in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites: A Review, Nanyang Technological University, Nanyang (Singapore), 2020.
- [31] <https://bs.atomiyme.com/ultrazvucno-zavarivanje-plastike-plastike-metal-plastike-aluminijskih-profila-ultrazvucnog-zavarivanja-tehnologija-opasnosti/>, rujan, 2020.
- [32] http://www.ultrasonicsolutions.in/technical_welding.htm, rujan, 2020.
- [33] <http://www.bekultrasonics.com/about-converters-and-transducers/>, rujan, 2020.
- [34] <https://www.sonicitalia.com/en/ultrasonic-components/ultrasonic-sonotrodes-and-boosters/ultrasonic-booster>, rujan, 2020.
- [35] A. Parshad, K. Dave, S. Shah; Design and Analysis of Sonotrode for Ultrasonic Consolidation; L.D College of Engineering, Ahmedabad (India), 2018.
- [36] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/ultrasonic-welding-of-injection-moulded-components-part-1-process-and-equipment-061>, rujan, 2020.
- [37] <https://www.powerultrasonics.com/content/sonotrode-design-and-manufacturing-instructions-zvei-handbook>, rujan, 2020.
- [38] <https://www.telsonic.com/en/about-us/telsonic-ag-switzerland/>, rujan, 2020.
- [39] <https://solfins.com/blog/reference-1/post/telsonic-kac-196>, rujan, 2020.

[40] D. Klobčar; Ultrazvučno zavarivanje: osnove i primjena; časopis IRT3000; 2016., 114-115.

[41]<http://hr.cgultrasonic.com/news/ultrasonic-metal-welding-machine-30682977.html>, rujan, 2020.

[42]<http://ba.ultrasonicmachiningtool.com/news/principle-and-application-of-ultrasonic-metal-26216434.html>, rujan, 2020.

Popis slika

Slika 1.1.1. Struktura polimera [1]

Slika 1.1.2. Glavna područja primjene polimernih materijala [1]

Slika 1.2.3.1. Homopolimer [5]

Slika 1.2.3.2. Vrste kopolimera [5]

Slika 1.2.4.1. Podjela polimera prema oblicima makromolekula [1]

Slika 1.2.5.1. Polimerni dodaci (aditivi) [4]

Slika 1.2.6.1. Amorfna struktura polimera [2]

Slika 1.2.6.2. Polukristalni polimer (amorfna i kristalna struktura) [2]

Slika 1.2.7.1. Osnovne karakteristike polimernih materijala [4]

Slika 1.3.1. Deformacijska stanja polimera [8]

Slika 1.3.2. Termomehanička krivulja linearnog amorfnog polimera [4]

Slika 1.3.3. Temperature prijelaza polimera iz jednog u drugo fizičko ili deformacijsko stanje [8]

Slika 1.3.4. Ovisnost termomehaničke krivulje o stupnju uređenosti strukture [8]

Slika 2.2.1. Osnovna podjela polimera [11]

Slika 2.2.3.1. Dijagram stanja plastični masa tijekom zavarivanja [13]

Slika 3.1. Najvažniji postupci zavarivanja plastičnih masa [13]

Slika 3.1.1. Princip zavarivanja rotacijskim trenjem [16]

Slika 3.1.2. Pomično zavarivanje trenjem [17]

Slika 3.1.3. Linearno ili dužinsko zavarivanje trenjem [17]

Slika 3.1.4. Rotacijsko zavarivanje trenjem [17]

Slika 3.1.5. Tipični usisni razvodnik sastavljen postupkom zavarivanja trenjem [18]

Slika 3.2.1. Postupak zavarivanja vrućim zrakom ili plinom [19]

Slika 3.2.2. Osnovni elementi pištolja za zavarivanje [20]

Slika 3.2.3. Postupak zavarivanja vrućim zrakom [20]

Slika 3.2.4. Zavarivanje vrućim zrakom bez dodatnog materijala [21]

Slika 3.3.1. Položaj elektroda visokofrekventnog zavarivanja [18]

Slika 3.3.2. Uređaj za visokofrekventno zavarivanje [22]

Slika 3.3.3. Navlake za medicinska pomagala od termoplastičnog poliuretanskog filma [23]

Slika 3.4.1. Postupak zavarivanja zagrijanim elementom [24]

Slika 3.4.2. Zavarivanje cijevi vrućim alatom [19]

Slika 4.1.1. Infrazvuk i ultrazvuk [26]

Slika 4.2.1. Postupak zavarivanja ultrazvukom [29]

Slika 4.2.2. Direktno i indirektno zavarivanje termoplasta [30]

Slika 4.2.3. Strojevi za ultrazvučno zavarivanje [31]

Slika 4.2.4. Primjena ultrazvučnog zavarivanja kod izrade upaljača [18]

Slika 4.2.5. Primjena ultrazvučnog zavarivanja (zaštitne maske, vatromet, ambalaža za mlijeko) [18]

Slika 4.3.1. Uređaj za ultrazvučno zavarivanje [32]

Slika 4.3.2. Pretvarači za ultrazvučno zavarivanje [33]

Slika 4.3.3. Pojačivači za ultrazvučno zavarivanje [34]

Slika 4.3.4. Princip neprekinutog ili točkastog ultrazvučnog zavarivanja [10]

Slika 4.3.5. Stepnasti, stožasti i eksponencijalni oblik sonotrode [35]

Slika 4.4.1. Sonotroda u SolidWorks softveru [39]

Slika 4.4.2. Sonotrode (alati za zavarivanje) [39]

Slika 4.4.3. Sonotrode i vrata za Ford Focus [39]

Slika 4.4.4. Igračke zavarene pomoću ultrazvuka [39]

Slika 4.5.1. Ultrazvučno zavarivanje metala i plastike [40]

Slika 4.5.2. Primjena ultrazvučnog zavarivanja metala kod električnih kabela [42]

Popis tablica

Tablica 1.2.5.1. Primjeri nekih aditiva i svrha njihovih primjena [7]

Tablica 1.4.1. Pojedina svojstva polimernih materijala [7]

Tablica 1.4.2. Pregled osnovnih prednosti i nedostataka polimernih materijala [7]

Tablica 2.2.2.1. Ocjena zavarljivosti za neke polimerne materijale [12]

Tablica 3.2.1. Različite vrste plastike s temperaturom zavarivanja [20]

Tablica 4.3.1. Vrijednosti amplituda u ultrazvučnom zavarivanju [37]