

Pregled opreme i postupaka zavarivanja polietilenskih cijevi

Jagodić, Nika

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:066547>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nika Jagodić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Nika Jagodić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na pomoći pri izradi rada te dr. sc. Maji Jurica na savjetima i pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se tehničkom osoblju laboratorija na omogućavanju izvođenja eksperimentalnog dijela rada.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima na bezuvjetnoj podršci tijekom školovanja.

Nika Jagodić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nika Jagodić**

Mat. br.: 0035211502

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Pregled opreme i postupaka zavarivanja polietilenskih cijevi**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Overview of processes and equipment for polyethylene pipe welding**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je opisati proizvodnju polietilenskih cijevi, njihovu klasifikaciju, te područje primjene. Navesti i opisati postupke spajanja polietilenskih cjevovoda, parametre zavarivanja, načine oblikovanja spojeva i vrstu opreme. Analizirati primjenu polietilenskih cijevi u transportu vode i plina.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno za odgovarajući promjer cijevi definirati parametre zavarivanja i pripremu spoja. Zavareni spoj je potrebno ispitati, analizirati dobivene rezultate i na temelju istih donijeti zaključke o kvaliteti izvedenog zavarenog spoja.

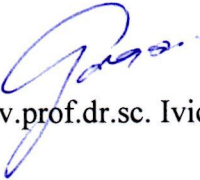
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

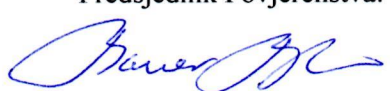
Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:


Izv.prof.dr.sc. Ilica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. POLIETILENSKE CIJEVI.....	3
2.1. Proizvodnja polietilenskih cijevi.....	3
2.2. Klasifikacija polietilenskih cijevi.....	7
2.2.1. Klasifikacija cijevi prema boji	7
2.2.2. Klasifikacija cijevi prema tlaku koji može podnijeti	8
2.2.3. Klasifikacija cijevi prema vrsti polietilena	8
2.3. Primjena polietilenskih cijevi.....	9
2.3.1. Primjena iznad zemlje	9
2.3.2. Primjena pod zemljom	10
2.3.3. Primjena u moru.....	11
2.3.4. Primjena u transportu vode i plina	12
3. SPAJANJE POLIETILENSKIH CJEVOVODA	14
3.1. Zavarivanje polimernih materijala	14
3.2. Postupci zavarivanja polietilenskih cijevi.....	17
3.2.1. Sučeljeno zavarivanje grijaćom pločom	18
3.2.1.1. Oprema za sučeljeno zavarivanje grijaćom pločom	18
3.2.1.2. Postupak sučeljenog zavarivanja grijaćom pločom	19
3.2.2. Zavarivanje pomoću spojnice	24
3.2.3. Zavarivanje elektrofuzijskim spojnica	26
3.2.3.1. Oprema za zavarivanje elektrofuzijom	26
3.2.3.2. Postupak zavarivanja elektrofuzijom.....	28
3.3. Koji postupak zavarivanja cijevi odabrati?	30
4. EKSPERIMENTALNI DIO	32
4.1. Ispitivane cijevi	32
4.1.1. Cijev 1	32
4.1.2. Cijev 2.....	34
4.2. Makroskopsko ispitivanje	35
4.2.1. Izrada uzoraka	35
4.2.2. Uzorak 1 lijevo.....	36
4.2.3. Uzorak 1 desno	37
4.2.4. Uzorak 2 lijevo.....	38
4.2.5. Uzorak 2 desno	39
4.3. Ispitivanje ljuštenja	40
4.3.1. Rezultati ispitivanja ljuštenja	41

4.3.1.1.	Rezultati ispitivanja ljuštenja Uzorka 1 lijevo	42
4.3.1.2.	Rezultati ispitivanja ljuštenja Uzorka 1 desno	43
4.3.1.3.	Rezultati ispitivanja ljuštenja Uzorka 2 lijevo	44
4.3.1.4.	Rezultati ispitivanja ljuštenja Uzorka 2 desno	46
4.4.	Ispitivanje penetrantima	47
4.4.1.	Rezultati ispitivanja penetrantima.....	48
5.	ZAKLJUČAK.....	49
	LITERATURA.....	50

POPIS SLIKA

Slika 1.	Presjek standardnog jednupužnog ekstrudera [4].....	4
Slika 2.	Spider konstrukcija kalupa [3]	5
Slika 3.	Basket konstrukcija kalupa [3].....	5
Slika 4.	Dimenzioniranje vakuumom [3]	6
Slika 5.	Dimenzioniranje tlakom [3]	7
Slika 6.	Presjek kanala za cijev [7].....	10
Slika 7.	Postupak postavljanja balasta na cijev [3].....	12
Slika 8.	Zavarivanje polimernih materijala vrući zrakom [12].....	15
Slika 9.	Zavarivanje polimera trenjem [12].....	15
Slika 10.	Shematski prikaz indukcijskog zavarivanja plastičnih materijala [12].....	16
Slika 11.	Shematski prikaz ekstruzijskog zavarivanja plastičnih materijala [12]	17
Slika 12.	Delta 355 All Terrain proizvođača RITMO S.p.A. [15]	19
Slika 13.	Pričvršćivanje i poravnavanje cijevi [13].....	20
Slika 14.	Priprema krajeva cijevi za zavarivanje [13]	20
Slika 15.	Postavljanje grijaće ploče [13]	21
Slika 16.	Stvaranje nadvišenja [13]	21
Slika 17.	Hlađenje cijevi u uređaju za zavarivanje [13]	22
Slika 18.	Prikaz ciklusa zavarivanja za PE 80 cijevi i spojne komade [12].....	23
Slika 19.	Spoj napravljen zavarivanjem sedlaste spojnice [3].....	24
Slika 20.	Sidweinder® Compact Jaw Clamp proizvođača McElroy Manufacturing [16]	25
Slika 21.	Spoj napravljen korištenjem spojnice u obliku grla [3]	25
Slika 22.	Prisma 125 Light proizvođača Ritmo S.p.A. [17].....	26
Slika 23.	Elektra 315 proizvođača RITMO S.p.A. [19]	27
Slika 24.	Elektrofuzijska spojnica	27
Slika 25.	Etiketa i bar kod na elektrofuzijskoj spojnici	28
Slika 26.	Struganje površine cijevi [20]	29
Slika 27.	Označavanje mjesta na koje dolazi spojnica [20]	29
Slika 28.	Presjek spoja napravljenog elektrofuzijom [3].....	30
Slika 29.	Izdignuti pipci na spojnici [20]	30
Slika 30.	Cijev 1	32
Slika 31.	Elektrofuzijska spojnica na Cijevi 1	33
Slika 32.	Elektrofuzijska spojnica na Cijevi 2.....	34
Slika 33.	Pila u Laboratoriju za zavarivanje, FSB.....	35
Slika 34.	Uzorak 1 lijevo	36
Slika 35.	Uzorak 1 desno	37
Slika 36.	Uzorak 2 lijevo	38
Slika 37.	Uzorak 2 desno	39
Slika 38.	Kidalica u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, FSB.....	40
Slika 39.	Uzorak postavljen u kidalicu	41
Slika 40.	Uzorak 1 lijevo nakon ljuštenja	42
Slika 41.	Dijagram opterećenja Uzorka 1 lijevo.....	42
Slika 42.	Uzorak 1 desno nakon ljuštenja.....	43
Slika 43.	Dijagram opterećenja Uzorka 1 desno	44
Slika 44.	Uzorak 2 lijevo nakon kidanja.....	45
Slika 45.	Dijagram opterećenja Uzorka 2 lijevo.....	45

Slika 46.	Uzorak 2 desno nakon kidanja	46
Slika 47.	Dijagram opterećenja Uzorka 2 desno	46
Slika 48.	Sredstvo za čišćenje proizvođača Magnaflux, penetrant proizvođača NDT Italiana i razvijatelj proizvođača Magnaflux	47
Slika 49.	Uzorak ispitivan penetrantima.....	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri ciklusa zavarivanja polietilena [12]	23
Tablica 2. Parametri zavarivanja Cijevi 1	33
Tablica 3. Parametri zavarivanja Cijevi 2	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d_u	mm	unutarnji promjer cijevi
d_v	mm	vanjski promjer cijevi
F	N	vlačna sila
LDPE	-	polietilen niske gustoće
LLDPE	-	linearni polietilen niske gustoće
HDPE	-	polietilen visoke gustoće
p	MPa	pritisak
PE	-	polietilen
PN	bar	nazivni tlak
t_{Ag}	s	vrijeme izravnavanja
t_{Ak}	s	vrijeme hlađenja
T_{Aw}	s	vrijeme zagrijavanja
t_F	s	vrijeme spajanja
t_U	s	vrijeme premještanja grijaćeg elementa
UHMWPE	-	polietilen ultra visoke molekularne mase
α	°	kut između mlaznice grijača i zavara
Δ	mm	pomak križne glave

SAŽETAK

Polietilen kao jedan od najčešće korištenih materijala u svijetu služi i za proizvodnju cijevi. U teorijskom dijelu ovog završnog rada opisana je proizvodnja polietilenskih cijevi ekstruzijom koje zbog svojih prednosti imaju široku primjenu. Objašnjena je njihova podjela i područja primjene. Opisano je zavarivanje cijevi s naglaskom na najčešće korištene postupke sučeljeno zavarivanje grijaćom pločom i zavarivanje pomoću elektrofuzijske spojnice.

U eksperimentalnom dijelu opisana su ispitivanja provedena na dvije polietilenske cijevi zavarene pomoću elektrofuzijske spojnice te je na temelju rezultata donešen zaključak o kvaliteti zavara.

Ključne riječi: ekstrudiranje, polietilenske cijevi, sučeljeno zavarivanje, elektrofuzija

SUMMARY

Polyethylene is one of the most used materials in the world and it is used as a piping material. In the theoretical part of this thesis, extrusion of pipes, which are widely used due to their advantages, is described. Also, their classification and uses are described. Welding of pipes is described with emphasis on butt fusion and electrofusion which are the most used joining procedures.

In the experimental part, tests on two polyethylene pipes welded using electrofusion are described and the conclusion is given based on the results.

Key words: extrusion, polyethylene pipe, butt fusion, electrofusion

1. UVOD

Polimeri, koji se još nazivaju makromolekularnim spojevima, nalaze se svugdje u svijetu koji nas okružuje. U njih spadaju organski spojevi iz prirode poput kaučuka i celuloze, oksidi silicija i aluminijska iz neorganskog svijeta kao i sintetski polimeri. Jedan od polimera koji se mogu dobiti umjetnim putem je upravo polietilen. On je ujedno i najjednostavniji polimer i najpoznatiji i najrašireniji polimer u današnjem svijetu. Tome svjedoči činjenica da svakodnevno koristimo proizvode napravljene od polietilena. Primjerice, vrećice, koje su vjerojatno i najpoznatiji proizvod, folije i razne kutije za pakiranje su napravljene od polietilena niske gustoće. Folije služe za zaštitu, za izradu plastenika te u mnogim djelatnostima kao u građevini za zaštitu materijala i elektrotehnici za izolaciju kabela, a proizvodi od polietilena visoke gustoće nalaze svoju primjenu u kućanstvu. Primjena polietilena ima toliko da ih je nemoguće sve nabrojati uključujući automobilsku industriju, farmaceutsku industriju, proizvodnju strojeva, poljoprivredu itd. [1]

Da bi se razumjeli razlozi uporabe i raširenosti polietilena potrebno je upoznati se s njegovim svojstvima. Kao što je već spomenuto, on je najjednostavniji polimer što znači da je njegova osnovna jedinica, odnosno mer, $-\text{CH}_2\text{CH}_2-$, a koji povezivanjem tvore lančane makromolekule $-(\text{CH}_2\text{CH}_2)_n-$. Jedan od strukturnih parametara koji utječe na svojstva polietilena je stupanj kristalnosti. To je mjera za omjer kristalne faze prema amorfnoj, a njoj je proporcionalna gustoća polietilena. Kod nabiranja proizvoda od polietilena moglo se uočiti da se proizvodi rade od polietilena različitih gustoća. Tako se razlikuju polietilen niske gustoće (LDPE), linearni polietilen niske gustoće (LLDPE), polietilen visoke gustoće (HDPE) i polietilen ultra visoke molekularne mase (UHMWPE). Naime, s porastom gustoće povećavaju se talište, tvrdoća, vlačna čvrstoća, produljenje pri raskidu, otpor prema puzanju, krutost i kemijska postojanost, a smanjuju se savitljivost, prozirnost, žilavost i otpornost prema nastajanju pukotina od naprezanja. Sposobnost prerade polietilena ovisi o njegovoj prosječnoj molekularnoj masi na način da se oni veće molekularne mase teže prerađuju i pokazuju bolja mehanička svojstva. Kemijska svojstva polietilena vrlo su povoljna jer je otporan na većinu kemijskih supstanci, otporan je na utjecaj vode i ne apsorbira ju, netopljiv je u otapalima, ali pri dužem izlaganju bubri. Pri izlaganju ultraljubičastom zračenju i kemijskoj ili termičkoj oksidaciji postaje podložan procesima degradacije čime mu se među

ostalima slabe mehanička svojstva. Važno je napomenuti da je na široku primjenu polietilena utjecaj imala i njegova niska cijena. [1]

Polietilenske cijevi su se pokazale kao vrlo dobar proizvod dobrih svojstava, a sve većom proizvodnjom cijevi javlja se želja i potreba za unapređenjem proizvodnje i kvalitetnijim proizvodom. Cijevi je nekada potrebno spajati u dugačke cjevovode, a da bi ti spojevi bili što kvalitetniji potrebno je koristiti pogodnu opremu, ispravne parametre zavarivanja i dobro oblikovati spoj.

2. POLIETILENSKE CIJEVI

Polietilenske cijevi su se počele koristiti 50-ih godina prošlog stoljeća, a unatoč početnim otporima, zbog prednosti koje imaju nad do tada korištenim željeznima, u narednim desetljećima sve se više koriste i zamjenjuju ih. Njihova nabava i ugradnja bila je jednostavnija kao i popravci na terenu i skladištenje, imaju duži vijek trajanja te su troškovi održavanja za njih manji. Današnji cjevovodi su još kvalitetniji od tadašnjih zbog korištenja kvalitetnijih materijala kao i novih tehnologija spajanja i postavljanja. [2]

Kvalitetna cijev podrazumijeva fleksibilnu i žilavu cijev otpornu na proces elektrokemijske korozije, otpornu na biološke utjecaje, glatke i neljepljive unutarnje površine, cijev na koju seizmološka zbivanja nema utjecaja i koja pri korištenju ispod zemlje može podnijeti slojeve koji se nalaze na njoj. Također, ukoliko se na cijevi pojavi pukotina, ona mora biti otporna na njeno širenje. [3]

2.1. Proizvodnja polietilenskih cijevi

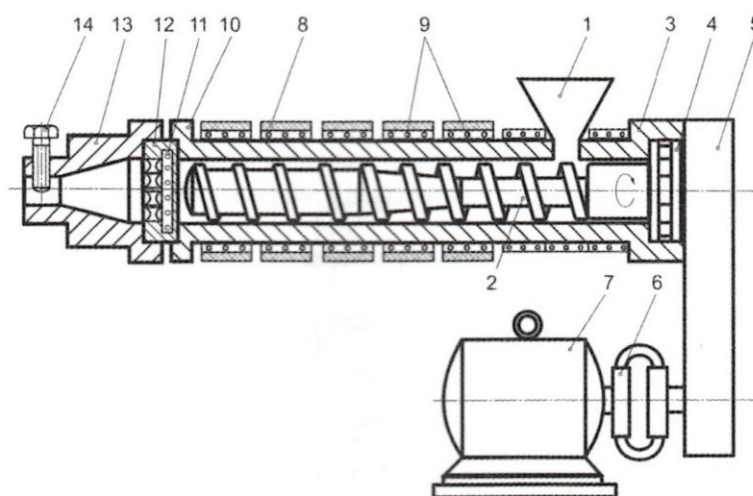
Za proizvodnju polietilenskih cijevi koristi se polietilen kojem su dodane male količine boje, stabilizatora, antioksidansa i ostali dodaci zaslužni za poboljšanje svojstava materijala i zaštitu prilikom proizvodnje, skladištenja i korištenja. Izbor boje koja se dodaje ovisi o svrsi cijevi. Prije proizvodnje cijevi potrebno je ispitati određene parametre, a oni uključuju brzinu protoka taljevine, gustoću i udio vlage, kao i provjeriti postoje li kakva onečišćenja. Uz to, s materijalom proizvođaču cijevi dolazi dokument koji govori o koeficijentu taljenja, gustoći, otpornosti na radna opterećenja, niskom intenzitetu propagacije pukotine i postojanosti na specifične načine djelovanja okoliša. U proizvodnji cijevi ključni koraci su zagrijavanje, taljenje i oblikovanje materijala u određeni oblik, kao i zadržavanje tog oblika za vrijeme hlađenja. [3]

Stroj koji se koristi za izradu cijevi je ekstruder. U njemu se polietilen zagrijava, tali, miješa i od njega se prenosi do kalupa gdje se oblikuje u cijev. On se obično opisuje veličinom pužnog vijka i duljinom cilindra. Konstrukcija pužnog vijka ključna je za dobivanje kvalitetne cijevi. Pužni vijak radi na principu naljepljivanja i klizanja na način da materijal mora prianjati na cilindar tako da okretanje vijka tjera materijal prema naprijed. U slučaju da materijal nije došao obojen zadaća vijka je i da pomiješa boju s materijalom. Na cilindru se nalaze grijači čija temperatura se regulira termo elementima, a veći dio topline koje se dovodi

polietilenu dolazi od energije proizvedene radom vijka i pogona. Kako je potrebno motriti i kontrolirati količinu dovedene topline, dodaje se i sustav hlađenja zrakom i vodom. [3]

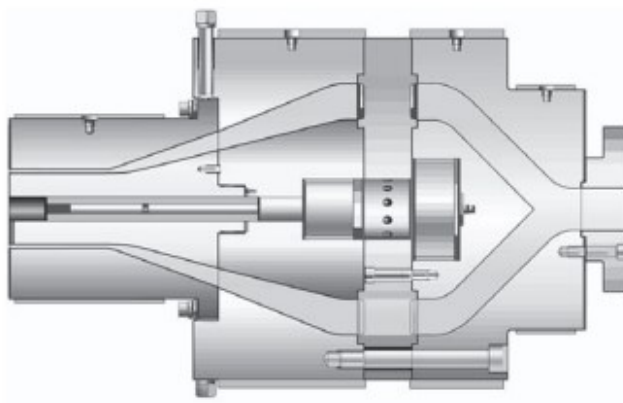
Općenito se standardni jednopužni ekstruder, koji je prikazan na *Slici 1*, sastoji od sljedećih dijelova [4]:

- lijevak (na *Slici 1* označen brojem 1)
- pužni vijak (na *Slici 1* označen brojem 2)
- cilindar (na *Slici 1* označen brojem 3)
- tlačni ležaj (na *Slici 1* označen brojem 4)
- namjestivi pogon (na *Slici 1* označen brojem 5)
- spojka (na *Slici 1* označen brojem 6)
- pogonski motor (na *Slici 1* označen brojem 7)
- grijalica (na *Slici 1* označena brojem 8)
- hladila (na *Slici 1* označena brojem 9)
- prirubnica (na *Slici 1* označena brojem 10)
- sita (na *Slici 1* označena brojem 11)
- cjedilo (na *Slici 1* označeno brojem 12)
- glava ekstrudera, ujedno i mlaznica (na *Slici 1* označena brojem 13)
- prigušnica (na *Slici 1* označena brojem 14).

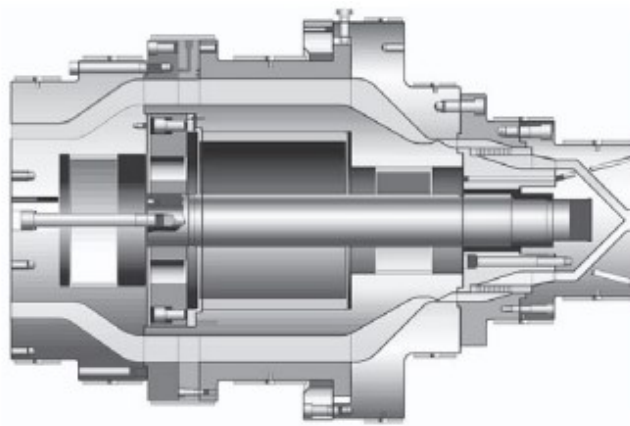


Slika 1. Presjek standardnog jednopužnog ekstrudera [4]

Rastaljeni polietilen iz ekstrudera izlazi u obliku dvije trake i prolazi kroz jedno ili više mrežastih sita da bi se spriječio prolaz nečistoća i dobio homogeniji materijal. Takav odlazi u kalup, odnosno alat u kojem se raspoređuje oko osovine i oblikuje u prstenasti oblik te istiskuje. Najčešće se pojavljuju dvije vrste konstrukcija kalupa (eng. spider i basket), a razlikuju se prema načinu na koji se taljevina raspoređuje u oblik i prema tome kako je osovina poduprta. Kod spider konstrukcije kalupa taljevina se raspoređuje oko osovine pomoću stošca poduprtog žbicama. Obzirom da je taljevina razdvojena konstrukcijom koja nalikuje paukovim nožicama ona se spaja i nakon toga odlazi u dio kalupa u kojem se ponovno uspostavlja jednolik protok i stvara konačan oblik, a važan je jer može utjecati na kvalitetu površine cijevi. Spider konstrukcija prikazana je na *Slici 2*. Kod basket konstrukcije kalupa taljevina se utiskuje kroz izbušeni rukavac ili ploču i pod pritiskom se spaja u oblik cijevi. Basket konstrukcija prikazana je na *Slici 3*. [3]



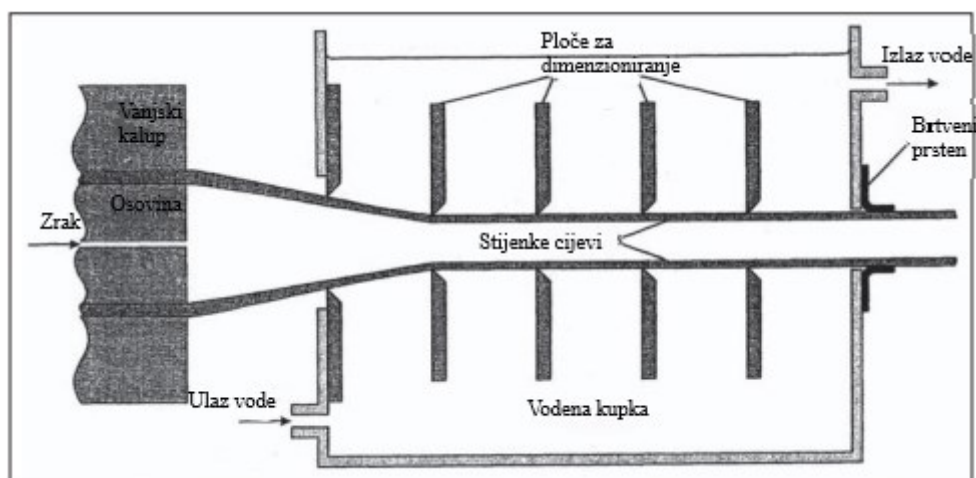
Slika 2. Spider konstrukcija kalupa [3]



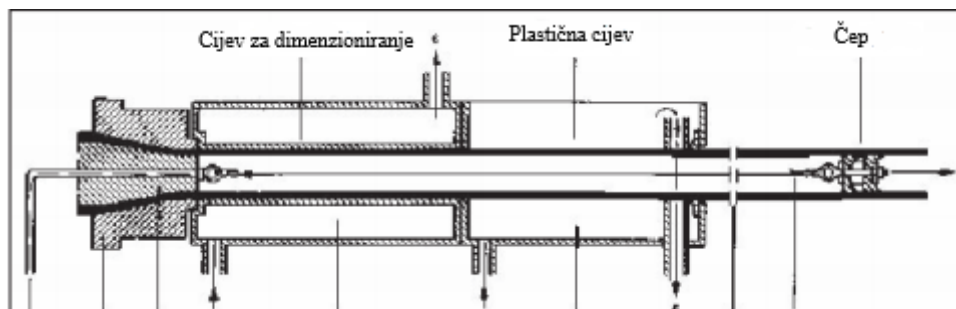
Slika 3. Basket konstrukcija kalupa [3]

Sljedeće operacije u procesu proizvodnje polietilenskih cijevi su dimenzioniranje i hlađenje koji se ostvaruju provlačenjem cijevi kroz rukavac za dimenzioniranje i korištenjem rashladnog spremnika. Dimenzioniranjem se osigurava da cijev zadrži svoj oblik i dimenzije tijekom hlađenja, a najčešće se izvodi vakuumom ili rjeđe primjenom pritiska. Prilikom dimenzioniranja vakuumom, još dok se rastaljeni materijal provlači kroz cijev za dimenzioniranje ili prstenove, vanjska površina cijevi se pomoću vakuuma prihvaća za rukavac za dimenzioniranje. Dimenzioniranje vakuumom prikazano je na *Slici 4*. Druga metoda, koja se temelji na primjeni tlaka, koristi tlak na način da djeluje na cijev iznutra korištenjem čepa povezanog kablom i tako ju pritišće na unutarnji dio rukavca. Dimenzioniranje primjenom tlaka prikazano je na *Slici 5*. [3]

Ovisno o veličini cijevi ona se može hladiti uranjanjem ili mlazom. One cijevi koje su manjih dimenzija se obično uranjaju u vodenu kupku dok se mlaz koristi za one većih dimenzija. Temperature vode moraju biti između 4 °C i 10 °C, a trajanja kupke mora biti dovoljno da rashladi cijev ne temperaturu ispod 71 °C. Prije nego što cijev napusti rashladni spremnik ona mora biti sposobna zadržati svoj oblik. Prilikom hlađenja postoji opasnost od zaostalih naprežanja. Iz tog razloga postoje zone popuštanja koje omogućavaju da se toplina sadržana unutar cijevi izrači. Također je bitno dobro odrediti potreban prostor između kupki radi kontroliranja naprežanja u cijevi jer se njihovim svođenjem na minimum produžuje njihov vijek trajanja. [3]



Slika 4. Dimenzioniranje vakuumom [3]



Slika 5. Dimenzioniranje tlakom [3]

Tijekom cijelog procesa hlađenja nužno je osigurati dovoljnu silu za izvlačenje, kao i održavati brzinu izvlačenja konstantnom. Debljina stijenke cijevi određena je upravo brzinom izvlačenja i brzinom vrtnje pužnog vijka na način da se pri konstantnoj brzini vijka, a povećanjem brzine izvlačenja smanjuje debljina stijenke. [3]

2.2. Klasifikacija polietilenskih cijevi

Klasifikacija polietilenskih cijevi može biti sljedeća [5, 6]:

- prema boji
- prema tlaku koji cijev može podnijeti
- prema vrsti polietilena.

2.2.1. Klasifikacija cijevi prema boji

Podjela cijevi koja je odmah vidljiva je ona po boji. Izbor boje nije proizvoljan već ovisi o tome za što se cijev koristi, a propisnim korištenjem boja, kao i ostalih oznaka, povećava se sigurnost i smanjuju pogreške.

Boje cijevi koje se koriste i njihova primjena su [5]:

- crna bez crta – sve primjene osim plina
- crna s plavim crtama – transport pitke vode
- potpuno žuta ili crna sa žutim crtama – plin, plinovita goriva, plin iz slojeva ugljena, procesni plin, ukapljeni plin pod pritiskom
- crna s crvenim crtama – sredstva za gašenje požara npr. voda

- potpuno bijela – komunikacijski vodovi u rudarstvu
- crna s ljubičastim crtama – povratna, reciklirana voda, voda koja nije pitka
- potpuno narančasta – električni vodovi
- crna s bijelim crtama – kanalizacija
- crna sa smeđim ili crvenim crtama – ruralna primjena.

2.2.2. Klasifikacija cijevi prema tlaku koji može podnijeti

Polietilenske cijevi proizvode se u različitim razredima ovisno o tlakovima koje cijev može podnijeti s vodom pri 20 °C. Ti razredi se označavaju oznakom PN (eng. nominal pressure). [6]

Prema europskim standardima razredi tlakova su [6]:

- PN 2,5 – maksimalni tlak iznosi 2,5 bara
- PN 4 – maksimalni tlak iznosi 4 bara
- PN 6 – maksimalni tlak iznosi 6 bara
- PN 10 – maksimalni tlak 10 bara
- PN 16 – maksimalni tlak 16 bara.

2.2.3. Klasifikacija cijevi prema vrsti polietilena

Polietilenske cijevi se također mogu podijeliti prema vrsti materijala pri čemu broj označava minimalnu potrebnu čvrstoću izraženu u barima. [6]

Materijali koji se koriste su [6]:

- PE 32 – za niskotlačne cjevovodne sustave
- PE 40 – za niskotlačne cjevovodne sustave
- PE 63 – za cjevovodne sustave izložene srednjim tlakovima, sustave za navodnjavanje, priključke za pitku vodu
- PE 80 – za mrežu za distribuciju prirodnog plina, za pitku vodu
- PE 100 – za cjevovode visokih zahtjeva.

2.3. Primjena polietilenskih cijevi

2.3.1. Primjena iznad zemlje

Kada se polietilenske cijevi primjenjuju iznad zemlje one se mogu jednostavno položiti na zemljinu površinu ili podupri potpornim sustavima. Pritom je važno obratiti pažnju na to je li cijev koja se koristi pogodna za uvjete u kojima će se primjenjivati jer na cijevi mogu utjecati temperatura, kemijski utjecaji, ultraljubičasto zračenje, potencijalna mehanička djelovanja ili opterećenja i unutarnji tlakovi. [3]

Zbog izloženosti suncu, promjena godišnjih doba i izmjena dana i noći cijevi koje se nalaze iznad zemlje su izložene promjenama temperature. Cijevi koje se koriste pod tlakom se, u pravilu, mogu primjenjivati na temperaturama između $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok se one koje se ne koriste pod tlakom čak i do $82\text{ }^{\circ}\text{C}$. Smanjenjem temperature raste modul elastičnosti polietilenske cijevi što rezultira time da cijev postaje tvrđa, a zadržava duktilnost. Kada se cijevi primjenjuju u ekstremnim uvjetima pod visokim tlakovima i niskim temperaturama neki od materijala ne mogu apsorbirati i raspršiti energiju, koja je posljedica primjerice iznenadnog udara, već se uz prisustvo drugih sila mogu formirati pukotine koje se mogu širiti uzduž cijevi. Ova pojava je moguća kod cijevi koje se primjenjuju za plin ili komprimirani zrak, dok kod onih koje prenose tekućine se ne očekuje. Sljedeća stvar na koju treba obratiti pažnju prilikom primjeni cijevi su njene promjene u duljini. Promjene u duljini polietilenskih cijevi mogu biti veće nego kod primjerice metalnih, ali su naprezanja pri korištenju sredstava za ograničavanje manja jer je modul elastičnosti polietilena manji nego kod drugih materijala, a time su sredstva za ograničavanje jednostavnija i jeftinija. [3]

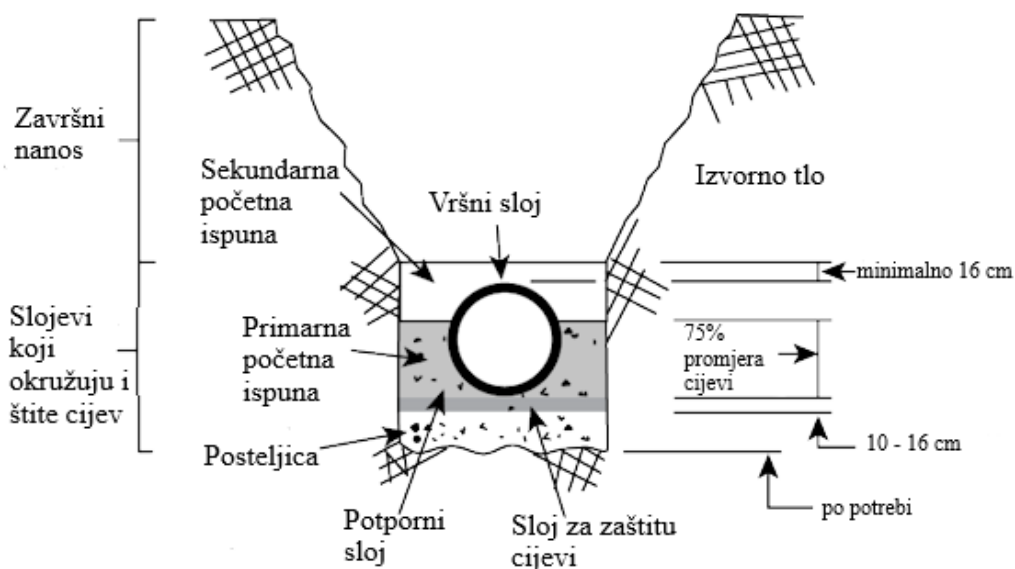
Polietilenska cijev neće hrđati, truliti niti će na nju djelovati galvanska korozija, ali ako će se primjenjivati za neku tekućinu koja nije voda ili u kemijski agresivnom okruženju može doći do smanjenja čvrstoće materijala. U takvom okruženju treba obratiti pažnju na kemijsku agresivnost tvari, njegovu koncentraciju, vrijeme izlaganja i temperaturu jer u nekim slučajevima polietilenska cijev može trajati dovoljno dugo i najbolji je izbor u financijskom pogledu. [3]

Primjenom cijevi iznad zemlje one se izlažu sunčevoj svjetlosti. Ultraljubičasti dio zračenja može uzrokovati oštećenja na materijalu ako on nije dobro zaštićen. Prema istraživanjima cijevi koje ima koncentraciju od najmanje 2% ravnomjerno raspoređene čađe zaštićene su od štetnog ultraljubičastog zračenja. [3]

Pri primjeni cijevi iznad zemlje važno je obratiti pažnju i na lokaciju postavljanja. Ako se postavlja na lokaciju blizu primjerice autoceste, potrebno je pružiti dodatnu zaštitu cijevi. To se može postići izgradnjom nasipa ili ograđivanjem cijevi na kritičnim područjima. [3]

2.3.2. Primjena pod zemljom

Iako se primjena cijevi pod zemljom može činiti jednostavna i da je potrebno samo iskopati kanal, postaviti cijev i napuniti kanal to nije tako. Kanal treba biti pravilno iskopan uzimajući u obzir faktore poput svojstva tla, dimenzija cijevi i podzemnih voda. Tako razina podzemne vode treba biti niže od postavljene cijevi, a kada se postavljaju za cijevi većih dimenzija potrebno je koristiti strojeve poput dizalica jer se one ne smiju bacati ili kotrljati da bi se smjestile u kanal. Potrebno je osigurati omotač koji obuhvaća cijev i štiti ju od mehaničkih oštećenja uzrokovanih udarcima ili tvrdim predmetima ispod zemlje, kao i poduprti ju gdje je potrebno zbog slojeva zemlje koji ju opterećuju. Presjek kanala za cijev prikazan je na *Slici 6*. [3]



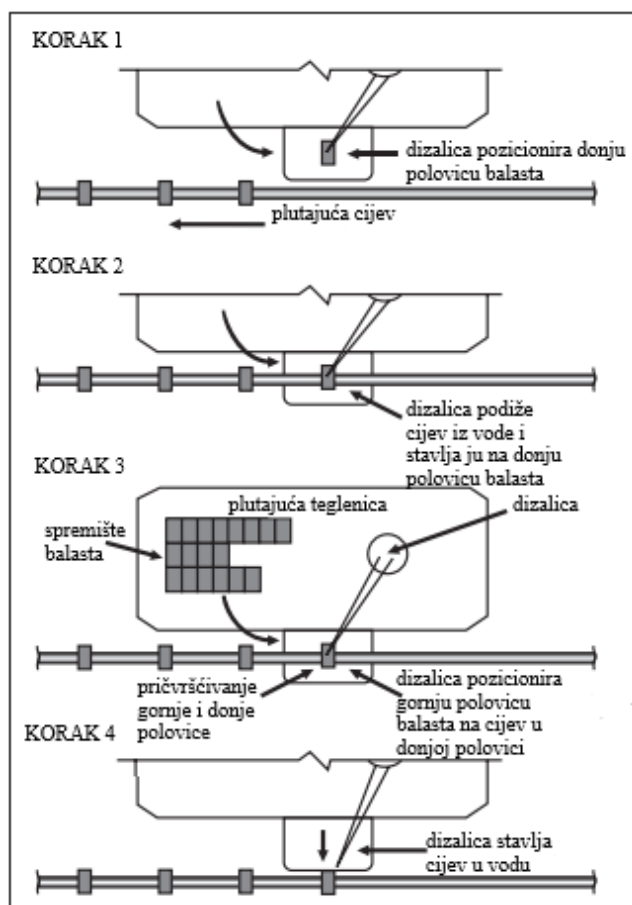
Slika 6. Presjek kanala za cijev [7]

Temelji za cijev su potrebni kada tlo kanala ne pruža dovoljno čvrstu podlogu za materijal posteljice. Sloj koji se stavlja na temelje je početna ispuna i on se proteže još najmanje 16 cm iznad postavljene cijevi. Ovaj sloj je ključan jer o kvaliteti njegovih

materijala ovisi sposobnost podržavanja slojeva i odupiranja izvijanja cijevi, a čine ga posteljica, potporni sloj i primarna i sekundarna početna ispuna. Posteljica služi za poboljšavanje tla kanala ispravljanjem nepravilnosti i osiguravanje jednolike potpore duž cijevi. Potporni sloj koji se nalazi ispod donje polovice cijevi raspodjeljuje nametnuta opterećenja, a materijal koji ga čini i njegov položaj su odgovorni za smanjivanje deformacija cijevi. Primarna početna ispuna je sloj koji služi za sprječavanje deformacija u bočnom smjeru, a da bi davala dobru potporu visina joj mora biti najmanje 75% promjera cijevi. Svrha sekundarne početne ispune je raspodjela opterećenja koja dolaze odozgo i zaštita cijevi od utjecaja završnog nanosa. Završni nanos ima manji utjecaj na cijev jer mu cilj nije njena zaštita, ali njegovim postojanjem se smanjuju opterećenja na cijev. On ne smije sadržavati veliko kamenje, neobrađene materijale niti krhotine. [3]

2.3.3. Primjena u moru

Zbog već spomenutih prednosti nad metalnim cijevima, poput otpornosti na galvansku koroziju i fleksibilnosti, polietilenske cijevi pogodne su i za primjenu u morskom okruženju. Mjesto za postavljanje cijevi trebalo bi biti na kopnu blizu vodene površine u koju treba porinuti cijev i u blizini točke na kojoj cijev ulazi u vodu. Površina tla treba biti poravnata i bez kamenja i ostalih objekata koji mogu oštetiti cijev. Područje u kojem cijev prelazi s kopna u vodu treba biti zaštićeno od utjecaja valova, plutajućeg leda i brodskog prometa. U metodi plutanja i uranjanja (eng. float – and – sink) nakon odabira prigodnog promjera cijevi i debljine njene stijenke potrebno je ukomponirati i balaste koji osiguravaju da cijev ostane potopljena na odabranom mjestu. Oni se postavljaju na način da se cijev sa zaštitom od trenja postavi na donju polovicu balasta, a potom se postavi gornja polovica te se postavljaju vijci koji osiguravaju da balast čvrsto stoji na cijevi. Taj postupak je prikazan na *Slici 7*. [3]



Slika 7. Postupak postavljanja balasta na cijev [3]

2.3.4. Primjena u transportu vode i plina

Opsežni testovi koji se provode na polietilenskim cijevima pokazuju da su one u potpunosti sigurne za prijenos pitke vode. Ti testovi obuhvaćaju ispitivanje okusa, mirisa i izgleda vode, kao i ispitivanje rasta mikroorganizama, što su opsežniji testovi nego što se provode na cijevima od tradicionalnih materijala u većini europskih zemalja. [8]

Cijevi od polietilena visoke gustoće za transport pitke vode koriste se od 1970 – ih i pokazuju se kao savršen izbor za tu primjenu. Potencijalna curenja vode eliminiraju se čvrstim spojevima, materijal je otporan na kemikalije pa one ne mogu doprijeti do vode, zbog svoje fleksibilnosti cijevi se mogu postaviti u oblike koji nisu potpuno pravilnog izgleda. Mogu se koristiti i za hladnu i vruću vodu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. [9]

Osim za pitku vodu, cijevi od polietilena visoke gustoće koriste se i za otpadne vode primjerice kanalizacijske odvođe i odvod oborinskih voda. Za to su zaslužni njihova otpornost

na koroziju, kemijska otpornost, čvrsti spojevi, otpornost na zamor, cijena te manja masa u odnosu na ostale materijale od kojih se izrađuju cijevi. [10]

Zbog toga što na unutarnjoj površini polietilenske cijevi nema hrapavost ona se svrstava u kategoriju glatkih cijevi. Ta kategorija označava najniži otpor protjecanju fluida. Tijekom vremena polietilenska cijev, zbog otpornosti na koroziju i biološke utjecaje, zadržava glatku površinu i svoju hidrauličku učinkovitost. [3]

Od 1960-ih polietilenske cijevi se koriste za transport plina, a danas je u SAD-u i Kanadi 99% plastičnih cijevi napravljeno upravo od polietilena. Inače, od ukupnog broja plinovoda 90% otpada na plastične. Prednosti koje su do sada nabrojane razlozi su zbog kojih se polietilenske cijevi koriste i za plinovode. Tu se poglavito ističe kemijska otpornost koja je potrebna kako kemijski spojevi iz plina ne bi uništavali cijev. [11]

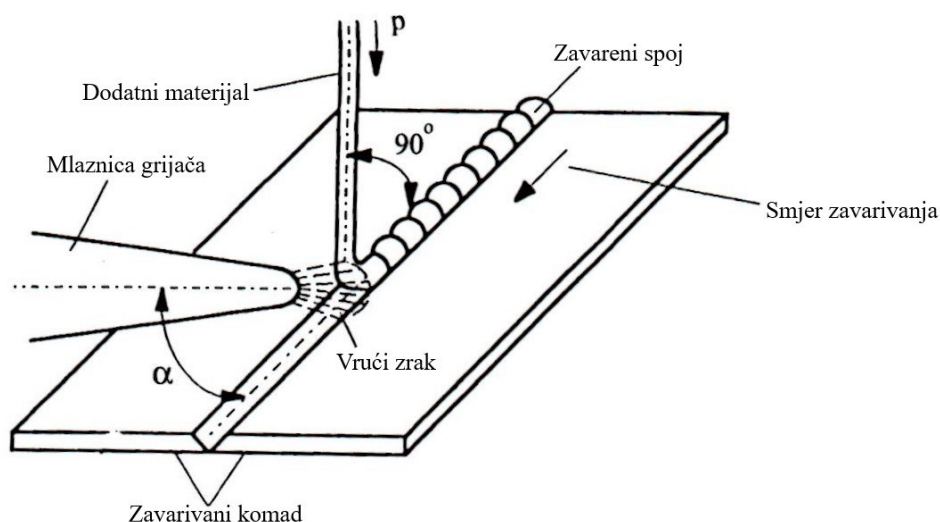
Da bi cijevi bile kvalitetnije i transport plina odvijao se što sigurnije provode se testiranja. Ti testovi obuhvaćaju uobičajena ispitivanja poput ispitivanja materijala, dijelova proizvoda i sposobnosti proizvodnog sustava da postigne željeni standard. Testiranja na materijalu i dijelovima se provode u određenim intervalima kako bi se utvrdila kvaliteta i ujednačenost proizvodne linije. Testovi se provode i na način da se rade testiranja na svim šaržama proizvoda prije njihovog puštanja na tržište. [11]

3. SPAJANJE POLIETILENSKIH CJEVOVODA

Od polimernih materijala mogu se zavarivati samo plastomeri. Plastomeri, koji se još nazivaju i termoplasti, su materijali linearnih i granatih makromolekula koji su taljivi i topljivi. Oni se pri zagrijavanju omekšavaju i tale, a pri hlađenju skrućuju, što se može ponavljati. Pri sobnoj temperaturi su u čvrstom stanju, a porastom temperature slabe sekundarne sile veza što rezultira mekšanjem materijala. Daljnjim rastom temperature sekundarne veze popuštaju, lanci molekula se nesmetano gibaju što rezultira taljenjem materijala. Kada temperatura zagrijavanja prijeđe temperaturu taljenja nastupa termoplastično stanje. Zbog difuzije molekula dodirnih površina u tom je stanju moguće zavarivanje. Hlađenjem zavarenih komada uspostavljaju se sekundarne veze i materijal se vraća u čvrsto stanje. [4, 12]

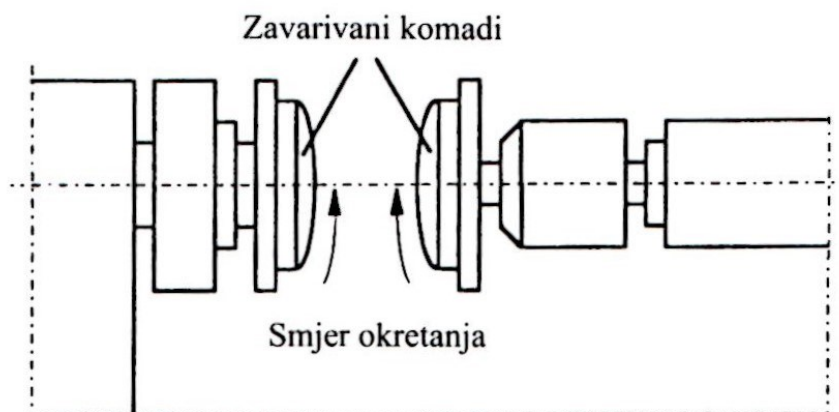
3.1. Zavarivanje polimernih materijala

Zavarivanje polimernih materijala ostvaruje se pritiskom komada čija su dodirna mjesta zagrijavanjem omekšala do plastičnog stanja. Polimeri ne provode električnu struju i tališta su im niža nego tališta metala pa su za to potrebne znatno niže temperature. Većina postupaka zavarivanja polimera temelji se na zagrijavanju spojnih mjesta vrućim plinom ili zrakom, vrućom žicom ili nekim grijaćim elementom, plamenom ili infracrvenim zračenjem. Ako se koriste dodatni materijali poput šipki oni su obično istog kemijskog sastava kao i osnovni materijal i tada se toplina vrućeg plina usmjerava i na osnovni i na dodatni materijal. Zavarivanje polimernog materijala vrućim zrakom prikazano je na *Slici 8*. [12]



Slika 8. Zavarivanje polimernih materijala vrući zrakom [12]

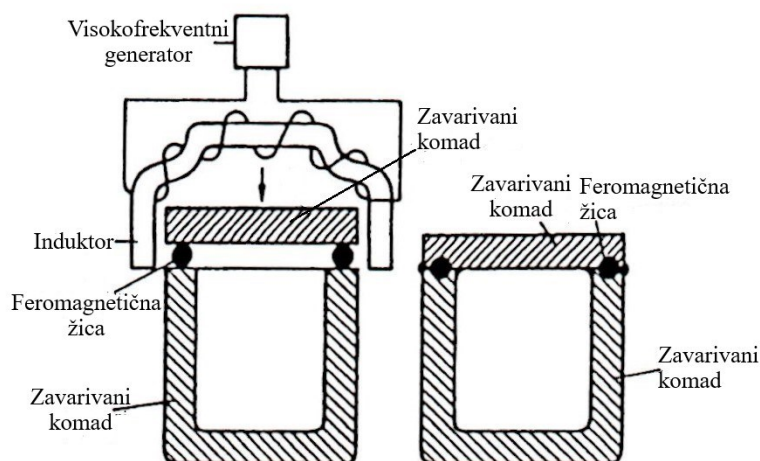
Grijaći elementi koji se koriste za zavarivanje mogu biti ploče, valjci, trake ovisno o obliku i vrsti polimera. Oni se postavljaju između komada i zagrijavaju površine koje je potrebno spojiti, a izvuku se kada se postigne tjestasto stanje i potom se komadi stisnu. U nekim slučajevima dovoljno je trenje da se površine zagriju. Zavarivani komadi pritom rotiraju u suprotnim smjerovima i pritisnu se. Taj slučaj je prikazan na *Slici 9.* [12]



Slika 9. Zavarivanje polimera trenjem [12]

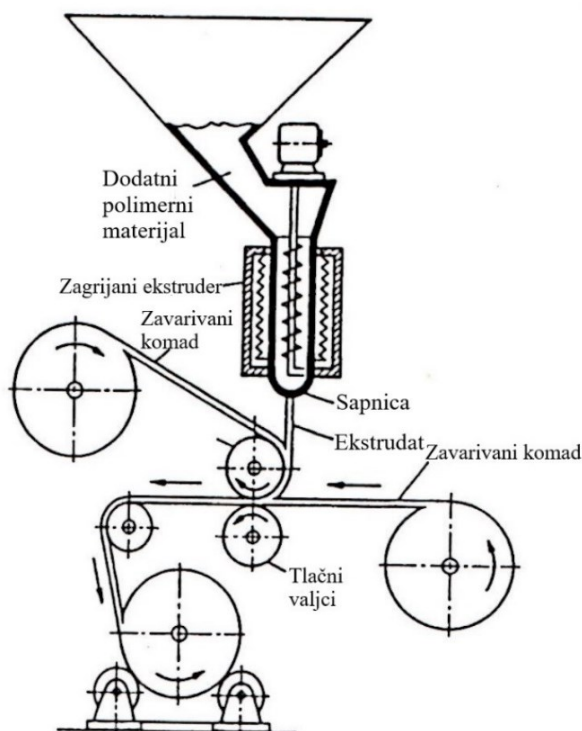
Zavarivanje se može ostvariti pritiskom grijača zagrijanih visokofrekventnom strujom, a mogu biti ravni ili valjkastog oblika. Ovaj postupak se temelji na pretvorbi električne

energije u toplinsku energiju unutar materijala. Za polimere se koriste ultrazvučno i induksijsko zavarivanje pomoću feromagnetske žice, a ona nakon spajanja ostaje u materijalu. Razlikuju se pločasto, šavno i točkasto zavarivanje. Shematski prikaz ovog postupka nalazi se na *Slici 10*. [12]



Slika 10. Shematski prikaz induksijskog zavarivanja plastičnih materijala [12]

Moguće je i ekstruzijsko zavarivanje. Ovaj postupak se sastoji od stavljanja sloja rastaljenog polimernog materijala između zavarivanih komada. Rastaljeni materijal dolazi u obliku granulata, a najčešće se zagrijava vrućim zrakom. Shema ekstruzijskog zavarivanja nalazi se na *Slici 11*. [12]



Slika 11. Shematski prikaz ekstruzijskog zavarivanja plastičnih materijala [12]

Je li neki postupak zavarivanja pogodan određuje se na temelju niza kriterija poput čvrstoće, nepropusnosti, kemijske postojanosti, brzine izrade i montaže, zahtjeva zavora, oblika izratka, veličine serije itd. Da bi provođenje procesa zavarivanja bilo pravilno potrebno je ispuniti sljedeće uvjete [4]:

- precizno određena temperatura za određeni materijal
- ispravan pritisak
- ispravna brzina zavarivanja.

3.2. Postupci zavarivanja polietilenskih cijevi

Koji god postupak zavarivanja cijevi se koristi materijal se zagrijava do temperature plastičnosti te se pritiskom postiže spajanje cijevi. Polietilen je najčešće korišten materijal, a ističe se polietilen visoke gustoće. Važno je imati na umu da atmosferski uvjeti poput vlage, vjetrova, topline od sunca i temperature utječu na kvalitetu zavarenog spoja. [12]

3.2.1. *Sučeljeno zavarivanje grijaćom pločom*

Korištenjem topline za spajanje cijevi i ispravnim provođenjem postupka dobivaju se spojevi koji su čvrsti jednako kao i cijev, a nekada i čvršći od nje te koji su otporni na curenje. Da bi rezultat bio takav treba pripremiti mjesto za zavarivanje na način da se provjeri ispravnost opreme za zavarivanje te osiguraju povoljni vremenski uvjeti za provođenje procesa korištenjem zagrijavanja, šatora, tendi i slične opreme. Zavarivaču je potrebno osigurati odgovarajuće alate i pribor poput pile, četke za čišćenje, sredstva za odmašćivanje te kvalitetan uređaj za zavarivanje. [3, 12]

3.2.1.1. *Oprema za sučeljeno zavarivanje grijaćom pločom*

Uređaj za fuzijsko zavarivanje treba biti sposoban [3]:

- poravnati krajeve cijevi
- pritegnuti cijevi
- postaviti krajeve cijevi paralelno jedan drugom i okomito na središnju os
- zagrijati krajeve cijevi
- primijeniti odgovarajuću silu.

Uređaj se priprema na način da se odabiru odgovarajuća kliješta i umetci koji moraju biti nepomični da bi mogućnost aksijalnog pomicanja bila što manja. Nakon stabilizacije temperature grijaće ploče temperatura se provjerava digitalnim termometrom, a između zavarivanja poželjno ju je pokriti vrećom otpornom na toplinu da bi se smanjili gubici topline. Potrebno je provjeriti jesu li oštrice koje služe za rezanje krajeva cijevi dovoljno oštre, čiste i čvrsto pričvršćene da bi ispunile svoju svrhu. Ako one ne stoje dobro mogu klizati tokom rotacije. Svi pomični dijelovi moraju se pomicati glatko, a ako se koristi hidraulička oprema potrebno je provjeriti dolazi li gdje do curenja. [13]

Na tržištu su dostupni ručni, automatski i polu automatski uređaji za zavarivanje. Automatski uređaji su opremljeni elektro-hidraulički kontroliranim kliještima, rezačima i grijaćim pločama te mogu bilježiti parametre zavarivanja. Poluautomatski uređaji nude neke od funkcija navedenih kod automatskih. [14]

Jedan od mnogobrojnih uređaja na tržištu prikazan je na *Slici 12*. Radi se o modelu Delta 355 All Terrain proizvođača RITMO S.p.A.



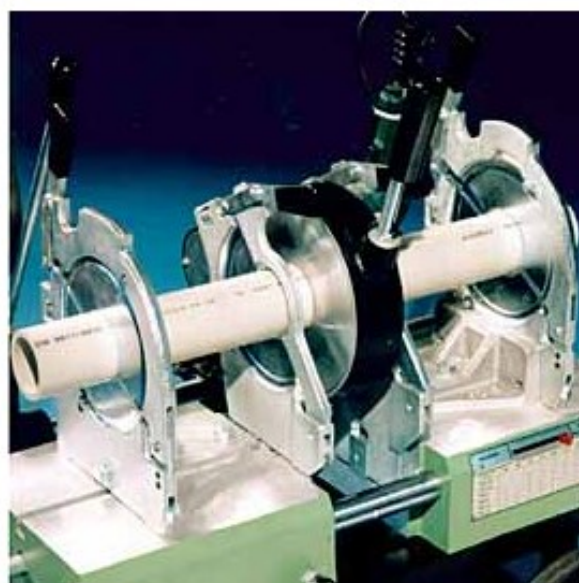
Slika 12. Delta 355 All Terrain proizvođača RITMO S.p.A. [15]

3.2.1.2. Postupak sučeljenog zavarivanja grijaćom pločom

Prvi korak u postupku dobivanja zavarenog spoja je čišćenje cijevi, njihovo pričvršćivanje i poravnavanje. Čišćenje se provodi na način da se odmašćuje površina cijevi i skidaju strugotine. Prilikom poravnavanja cijevi potrebno je izvršiti kontrolu planparalelnosti površina i posmaka cijevi koji smije biti najviše 10% debljine stijenke. Korak pričvršćivanja i poravnavanja cijevi prikazan je na *Slici 13*, a priprema krajeva na *Slici 14*. [12]



Slika 13. Pričvršćivanje i poravnavanje cijevi [13]



Slika 14. Priprema krajeva cijevi za zavarivanje [13]

Sljedeći korak je taljenje cijevi. Za to je potrebno ugrijati grijaću ploču na 200 - 220 °C. Krajevi cijevi se pritišću na ploču, pritiskom za izjednačavanje se postiže potpuno nalijeganje površina na ploču, a na površinama se stvaraju nadvišenja zavora. Postavljanje grijaće ploče je prikazano na *Slici 15*, a stvaranje nadvišenja na *Slici 16*. [12]



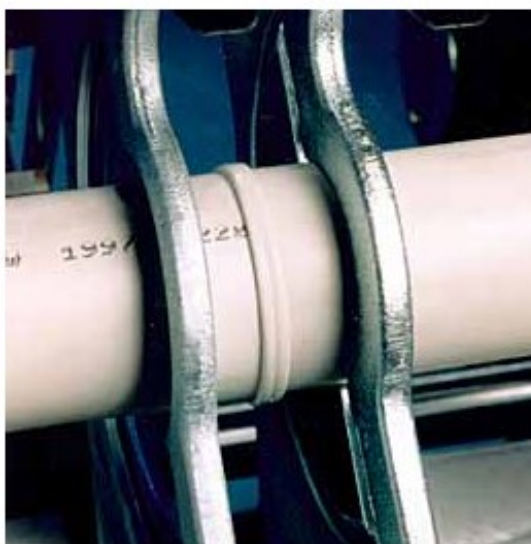
Slika 15. Postavljanje grijaće ploče [13]



Slika 16. Stvaranje nadvišenja [13]

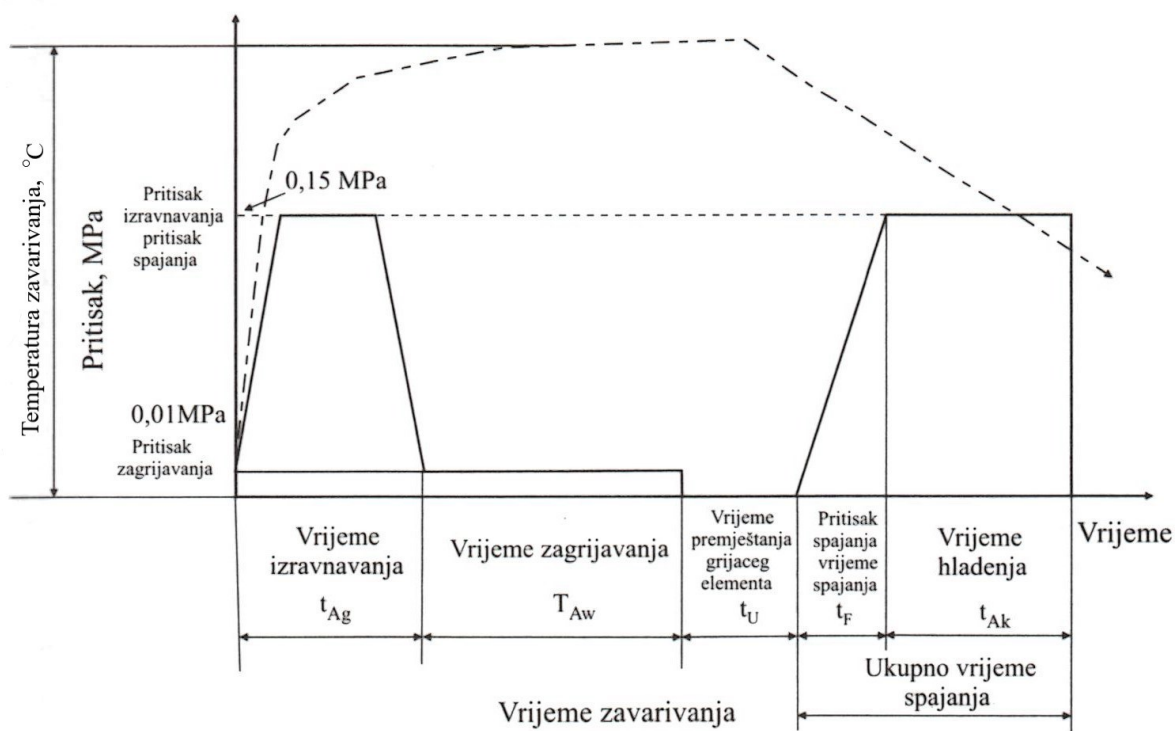
Nakon što završi grijanje grijaća ploča se izmiče te se krajevi cijevi spoje. Spajanje je potrebno obaviti što prije kako ne bi došlo do nepoželjnog hlađenja površina. Cijevi je potrebno držati pritisnutima, kontinuirano povećavajući pritisak dok se cijev ne ohladi, a nakon hlađenja nadvišenje se može skinuti. Vrijeme zagrijavanja i hlađenja se određuje na temelju debljine stijenke cijevi, okolišne temperature i intenziteta strujanja zraka, a prisilno

hlađenje nije dopušteno. Kako cijevi izgledaju stisnute u stroju može se vidjeti na *Slici 17*. Kada se cijevi potpuno ohlade provodi se ispitivanje tlačnom probom na način da se primjenjuje tlak koji je 1,5 puta veći od maksimalnog radnog tlaka te on tokom 10 minuta ne smije pasti u sustavu. [12]



Slika 17. Hlađenje cijevi u uređaju za zavarivanje [13]

Na *Slici 18* prikazan ciklus zavarivanja za PE 80 cijevi i spojne komade. Za dani slučaj za vrijeme zagrijavanja materijala primjenjuje se pritisak od 0,01 MPa, a u fazi priljublivanja 0,15 MPa. [12]



Slika 18. Prikaz ciklusa zavarivanja za PE 80 cijevi i spojne komade [12]

U Tablici 1 nalaze se parametri za zavarivanje polietilena.

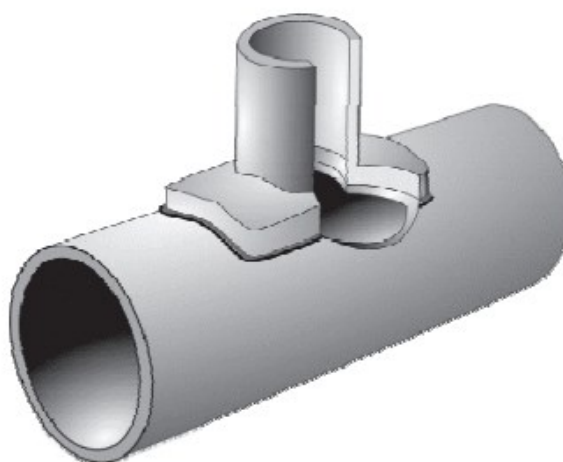
Tablica 1. Parametri ciklusa zavarivanja polietilena [12]

Debljina stijenke, mm	Nadvišenje, mm	Vrijeme zagrijavanja, s	Vrijeme podešavanja, s	Vrijeme porasta pritiska kod $p = 0,15$ MPa, s	Vrijeme hlađenja kod $p = 0,15$ MPa, min
2,0 – 4,5	0,5	30 – 70	3	3 – 6	3 – 6
4,5 – 7,0	1,0	70 – 120	4	4 – 8	6 – 10
7,0 – 12,0	1,5	120 – 190	5	8 – 12	10 – 16
12,0 – 19,0	2,0	190 – 250	6	10 – 15	16 – 24
19,0 – 26,0	2,5	250 – 330	7	15 – 20	24 – 32
26,0 – 37,0	3,0	330 – 460	8	20 – 25	32 – 40
37,0 – 50,0	3,5	460 – 600	17	25 – 30	40 – 45

3.2.2. Zavarivanje pomoću spojnice

Spojnice pomoću kojih se obavlja fuzijsko zavarivanje mogu biti sedlastog oblika ili oblika grla. Postupak zavarivanja kod obje je sličan kao i kod sučeljenog zavarivanja grijaćom pločom.

Za sedlasto fuzijsko zavarivanje potrebna je spojnica koja se spaja na cijev. Postupak se sastoji od zagrijavanja vanjske površine cijevi i površine spojnice korištenjem konkavnih i konveksnih alata. Spoj napravljen zavarivanjem sedlaste spojnice nalazi se na *Slici 19*. [3]



Slika 19. Spoj napravljen zavarivanjem sedlaste spojnice [3]

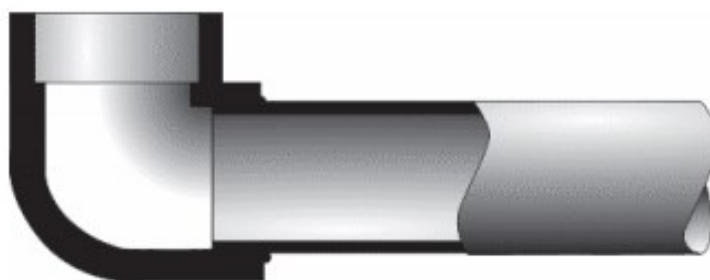
Najprije je potrebno očistiti površinu cijevi gdje će biti postavljena spojnica. Potom se postavljaju odgovarajući adapteri za zagrijavanje sedla i uređaj za sedlasto zavarivanje. Nakon pripremanja površina cijevi i spojnice one se poravnavaju i zagrijavaju. Potom se pritišću i drže do kraja hlađenja kada se uređaj za zavarivanje miče. [3]

Slika 20 prikazuje primjer uređaja za sedlasto zavarivanje. Radi se o modelu Sidewinder[®] Compact Jaw Clamp proizvođača McElroy Manufacturing.



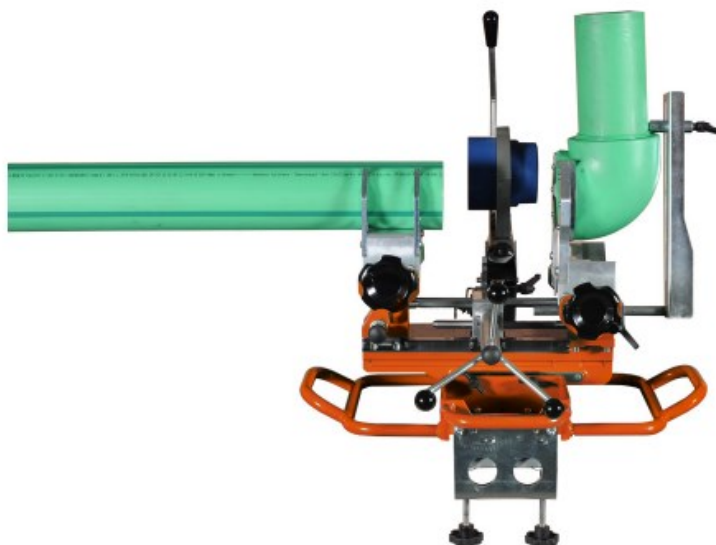
Slika 20. Sidweinder® Compact Jaw Clamp proizvođača McElroy Manufacturing [16]

Kada se koristi spojnica koja ima oblik grla potrebno je istovremeno zagrijavati vanjsku površinu krajeva cijevi i unutarnju površinu spojnice. Kao i u postupcima do sada te površine moraju biti očišćene, ali na krajevima cijevi potrebno je napraviti skošenja na cijevima promjera većeg od 31,75 mm. Spoj napravljen ovakvom spojnicom prikazan je na *Slici 21.* [3]



Slika 21. Spoj napravljen korištenjem spojnice u obliku grla [3]

Primjer uređaja koji se koristi za izradu ovakvih spojeva nalazi se na *Slici 22.* Radi se o uređaju Prisma 125 Light proizvođača Ritmo S.p.A.



Slika 22. Prisma 125 Light proizvođača Ritmo S.p.A. [17]

3.2.3. Zavarivanje elektrofuzijskim spojnica

Postupak zavarivanja elektrofuzijskim spojnica razlikuje se od ostalih postupaka fuzijskog zavarivanja po načinu na koji se toplina unosi u spoj. Kod ovog postupka toplina se u spoj unosi iznutra pomoću vodiča struje u spoju ili pomoću vodljivog polimera. [3]

3.2.3.1. Oprema za zavarivanje elektrofuzijom

Oprema za zavarivanje elektrofuzijom uključuje spojnicu, generator struje, odgovarajuće alate i upravljačku jedinicu koja kontrolira osnovne fuzijske parametre, a to su temperatura, pritisak i vrijeme. Upravljačka jedinica sama namješta ove parametre koji se očitavaju iz bar koda koji se nalazi na elektrofuzijskoj spojnici. [12, 18]

Primjer opreme i uređaja za zavarivanje elektrofuzijom nalazi se na *Slici 23*, a radi se o modelu Elektra 315 proizvođača RITMO S.p.A. Na primjeru ovog uređaja, pored upravljačke jedinice, vidljiv je i kabel pomoću kojeg se upravljačka jedinica spaja sa spojnicom kao i čitač bar kodova.



Slika 23. Elektra 315 proizvođača RITMO S.p.A. [19]

Primjer elektrofuzijske spojnice može se vidjeti na *Slici 24.*



Slika 24. Elektrofuzijska spojnica



Slika 25. Etiketa i bar kod na elektrofuzijskoj spojnici

Na Slici 25 prikazan je primjer etikete s bar kodom koja se nalazi na elektrofuzijskoj spojnici. Vidljivo je da su na njoj istaknuti parametri, a to su napon, vrijeme fuzije i vrijeme hlađenja.

3.2.3.2. Postupak zavarivanja elektrofuzijom

Priprema cijevi za zavarivanje uključuje struganje površine cijevi do dubine od oko 3 mm (Slika 26) kako bi se uklonila nečistoća i kontaminirajući elementi te njeno brisanje krpicom s izopropanolom da bi se uklonila preostala prašina. Na cijevima se potom označavaju mjesta na koja dolazi spojnica (Slika 27). Cijevi se uklještaju kako bi se spriječilo njihovo pomicanje. Stavlja se elektrospojnica i očitava se njen bar kod i zavarivanje može početi. Protokom električne struje u žici unutar spojnice javlja se otpor i žica se zagrijava. Zbog toga dolazi do taljenja materijala cijevi i spojnice te se događa fuzija rastaljenih materijala. [3, 12]



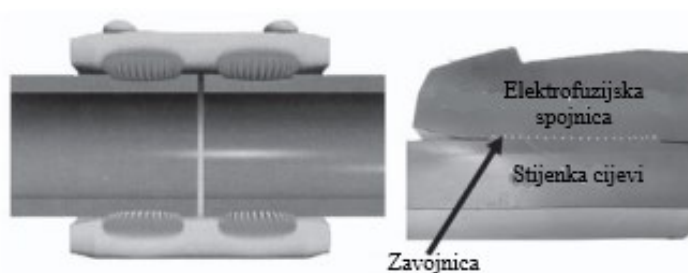
Slika 26. Struganje površine cijevi [20]



Slika 27. Označavanje mjesta na koje dolazi spojnica [20]

Nakon napajanja zavojnice nastaju vruće i hladno područje, odnosno zone topljenja i smrzavanja. Ove zone osiguravaju da je fuzija kontrolirana na preciznoj duljini i da se pritisak taljevine kontrolira tokom cijelog procesa spajanja. [12]

Kada prođe preporučeno vrijeme hlađenja uklanjaju se kliješta i spremaju podaci o zavarivanju. Ako je nastali spoj dobro napravljen on je čvrst kao i cijev i može podnijeti sva opterećenja pri radu. Presjek spoja nalazi se na *Slici 28*. [3, 18]



Slika 28. Presjek spoja napravljenog elektrofuzijom [3]

Uspješnost zavarivanja može se provjeriti vizualnim indikatorima. Prvi je ekran upravljačke jedinice na koji daje informaciju o završenosti procesa, a drugi su pipci na spojnici. Nakon zavarivanja pipci se izdižu, a prikazani su na *Slici 29*. [20]



Slika 29. Izdignuti pipci na spojnici [20]

3.3. Koji postupak zavarivanja cijevi odabrati?

O nekoliko faktora ovisi koji je postupak zavarivanja cijevi bolji za neki slučaj. Elektrofuzija se češće koristi za zavarivanje na teže dostupnim mjestima i za cijevi promjera 16 mm do 170 mm, a sučeljeno zavarivanje za one promjera 50 mm do 2000 mm. Za razliku

od sučeljenog zavarivanja, kojim se mogu zavarivati samo cijevi istog vanjskog i unutarnjeg promjera, elektrofuzijsko zavarivanje se može koristiti i za cijevi različitih promjera, odnosno različite debljine stjenke. Također elektrofuzijom se mogu zavarivati i isti materijali, ali različitog ranga primjerice polietilen različite gustoće. Izbor postupka ovisi i o načinu na koji će cijev biti ugrađena. Primjerice ako će se cijev koristiti u oblozi već postojećeg cjevovoda sučeljeno zavarivanje je bolji izbor. [21]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio proveden je u laboratorijima na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a ispitivani su zavari polietilenskih cijevi dobiveni pomoću elektrofuzijske spojnice. Ispitivanje je provedeno na kidalici (ljuštenje) i pomoću penetranta.

4.1. Ispitivane cijevi

Ispitivanje je vršeno na dva uzorka polietilenskih cijevi.

4.1.1. Cijev 1

Cijev 1 je polietilenska cijev prikazana na *Slici 30* i *Slici 31*.

Radi se o cijevi dimenzija:

- $d_v = 110$ mm
- $d_u = 90$ mm.

Vidljivo je da se radi o cijevi crne boje s plavim crtama iz čega se može zaključiti da je namijenjena transportu pitke vode. Također se može uočiti područje na kojem je u pripremi cijevi za zavarivanje strugan sloj cijevi, a ta su područja zaokružena na *Slici 30*.



Slika 30. Cijev 1



Slika 31. Elektrofuzijska spojnica na Cijevi 1

Na etiketi na elektrofuzijskoj spojnici stoji oznaka PN16 iz čega se može zaključiti da se radi o cijevi koja može podnijeti tlakove do 16 bara. U *Tablici 2* su prikazani parametri koje propisuje bar kod na etiketi.

Tablica 2. Parametri zavarivanja Cijevi 1

Električni napon	Vrijeme fuzije	Vrijeme hlađenja
39,5 V	230 s	10 min

Pregledom vizualnih indikatora (strelice na *Slici 31* usmjerene su prema njima) može se uočiti kako oba nisu izbačena jednako visoko što znači da je tijekom zavarivanja došlo do nepravilnosti.

4.1.2. Cijev 2

Cijev 2 prikazana je na *Slici 32*, a radi se o cijevi dimenzija:

- $d_v = 110 \text{ mm}$
- $d_u = 90 \text{ mm}$.



Slika 32. Elektrofuzijska spojnica na Cijevi 2

Vidljivo je da se radi o cijevi crne boje sa žutim crtama iz čega se može zaključiti da je namijenjena transportu plina ili plinovitih goriva. Mogu se uočiti tragovi skidanja sloja u pripremi cijevi za zavarivanje.

Parametri zavarivanja očitani s etikete nalaze su u *Tablici 3*.

Tablica 3. Parametri zavarivanja Cijevi 2

Električni napon	Vrijeme fuzije	Vrijeme hlađenja
40 V	185 s	10 min

Pregledom vizualnih indikatora može su uočiti da su izbačeni jednako visoko.

4.2. Makroskopsko ispitivanje

Iz ispitivanih cijevi dobivena su četiri uzorka, iz svake cijevi po dva, jedan s lijeve strane, a drugi s desne.

Makroskopsko ispitivanje provodi se sukladno normi HRN EN 12814-5:2008.

4.2.1. Izrada uzoraka

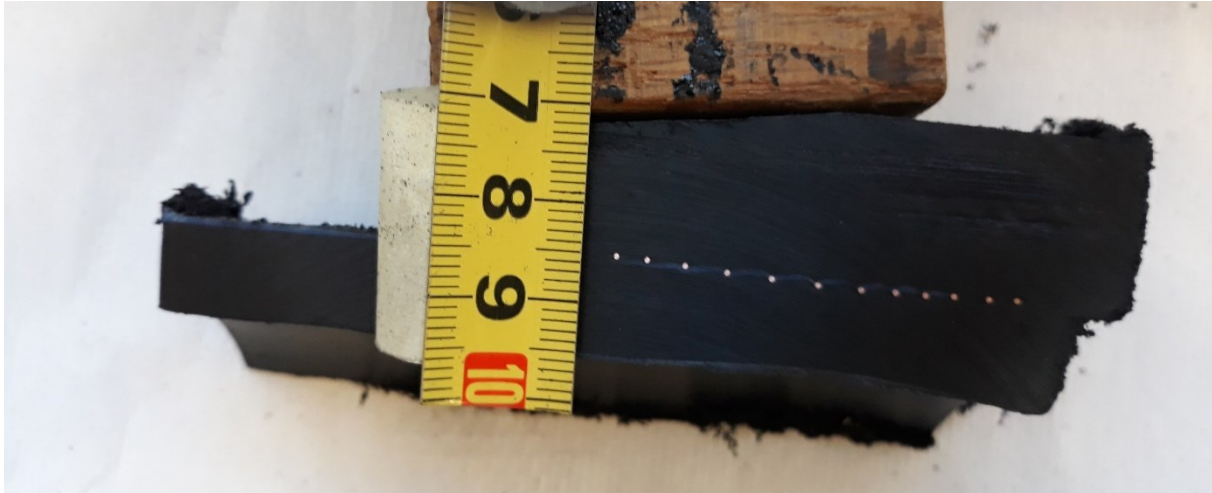
Uzorci za ispitivanje ljuštenjem su izrađeni pomoću pile u Laboratoriju za zavarivanje, a pila je prikazana na *Slici 33*.



Slika 33. Pila u Laboratoriju za zavarivanje, FSB

4.2.2. Uzorak 1 lijevo

Lijeva polovica Uzorka 1 prikazana je na *Slici 34*.



Slika 34. Uzorak 1 lijevo

Na makroizbrusku nema nepravilnosti poput šupljina niti nema stranih uključaka. Priprema rubova cijevi je odgovarajuća, a oblik zavora zadovoljavajući. Protaljivanje je potpuno u zoni žice. Može se uočiti da između svih namotaja žice razmak nije jednak.

4.2.3. Uzorak 1 desno

Desna polovica Uzorka 1 prikazana je na *Slici 35*.

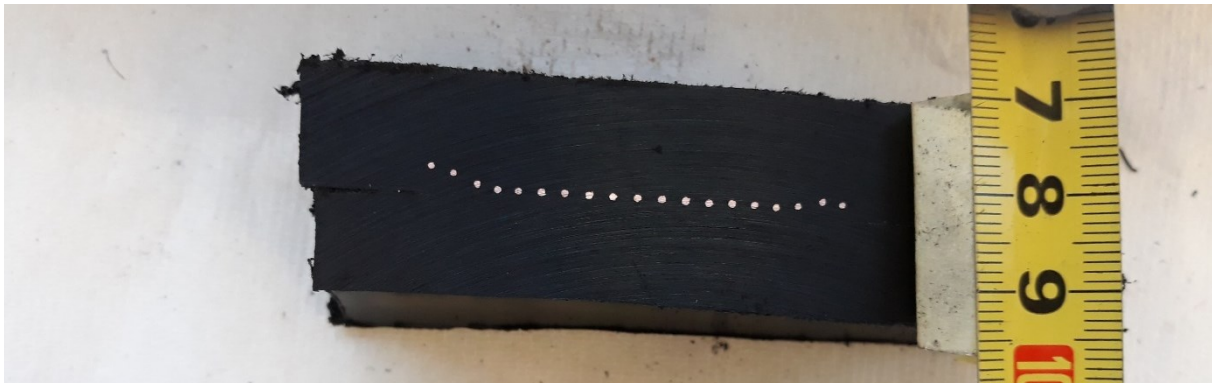


Slika 35. Uzorak 1 desno

Na makroizbrusku nisu vidljive nepravilnosti poput šupljina i nema stranih uključaka. Priprema rubova cijevi je odgovarajuća, a oblik zavora zadovoljavajući. Protaljivanje je potpuno u zoni žice. Može se uočiti da razmak između svih namotaja žice nije jednak.

4.2.4. Uzorak 2 lijevo

Lijeva polovica Uzorka 2 prikazana je na *Slici 36*.

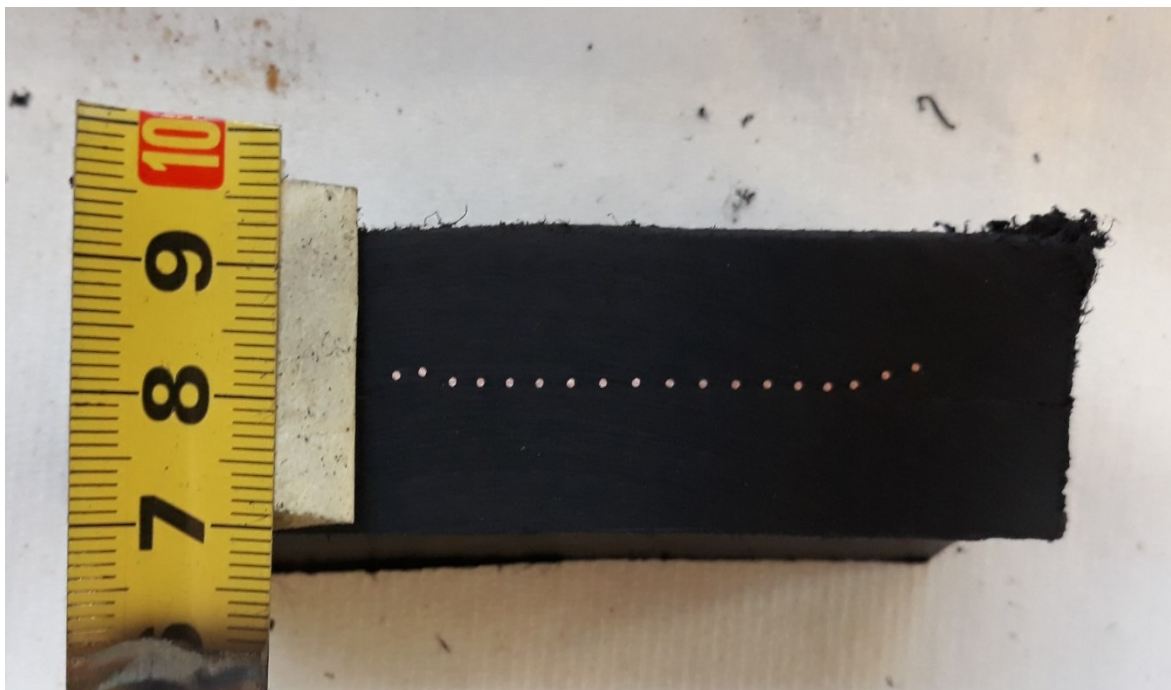


Slika 36. Uzorak 2 lijevo

Na makroizbrusku se ne uočavaju nepravilnosti poput šupljina i stranih uključaka. Priprema rubova cijevi je odgovarajuća, a oblik zavora zadovoljavajući. Protaljivanje je potpuno u zoni žice. Može se uočiti da je između namotaja žice razmak približno jednak.

4.2.5. Uzorak 2 desno

Desna polovica Uzorka 2 prikazana je na *Slici 37*.



Slika 37. Uzorak 2 desno

Na makroizbrusku nema nepravilnosti poput šupljina niti nema stranih uključaka. Priprema rubova cijevi je odgovarajuća, a oblik zavara zadovoljavajući. Protaljivanje je potpuno u zoni žice. Može se uočiti da je između namotaja žice razmak približno jednak.

4.3. Ispitivanje ljuštenja

Norma koja propisuje ljuštenje je HRN EN 12814-4:2008. Ispitivanje ljuštenja provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, a na *Slici 38* prikazana je kidalica na kojoj je ispitivanje izvedeno. Ovim postupkom se ispituje čvrstoća prijanjanja zavarenog spoja. Na slici je uz kidalicu prikazan i ekran računala povezanog s kidalicom na kojem se prikazuju F, Δ - dijagrami. Radi se o kidalici modela EU 40 mod proizvođača Werkstoffprüfmaschinen koja ima mjerno područje od 0 do 400 kN.



Slika 38. Kidalica u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, FSB

Uzorci se u kidalicu postavljaju na način prikazan na *Slici 39* i nakon toga se pokreću pokretni mostovi kidalice i dolazi do opterećivanja zavara. Opterećuju je dok ne dođe do pucanja te bilježi sila pri kojoj se pucanje dogodilo.



Slika 39. Uzorak postavljen u kidalicu

4.3.1. Rezultati ispitivanja ljuštenja

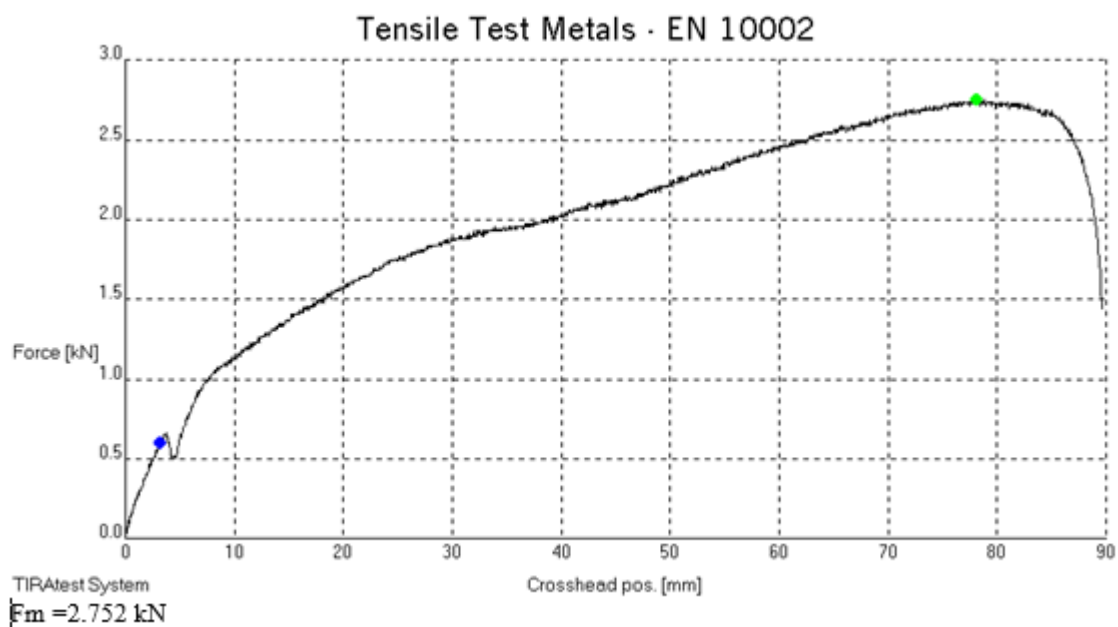
Rezultati ispitivanja ljuštenja pokazuju koliko opterećenje može izdržati zavareni spoj i je li zavareni spoj uopće dobar, obzirom bi on trebao biti najmanje jednako čvrst kao osnovni materijal.

4.3.1.1. Rezultati ispitivanja ljuštenja Uzorka 1 lijevo

Na *Slici 40* prikazan je Uzorak 1 lijevo nakon ljuštenja, a na *Slici 41* dijagram koji pokazuje opterećenje zavara i pomak križne glave.



Slika 40. Uzorak 1 lijevo nakon ljuštenja



Slika 41. Dijagram opterećenja Uzorka 1 lijevo

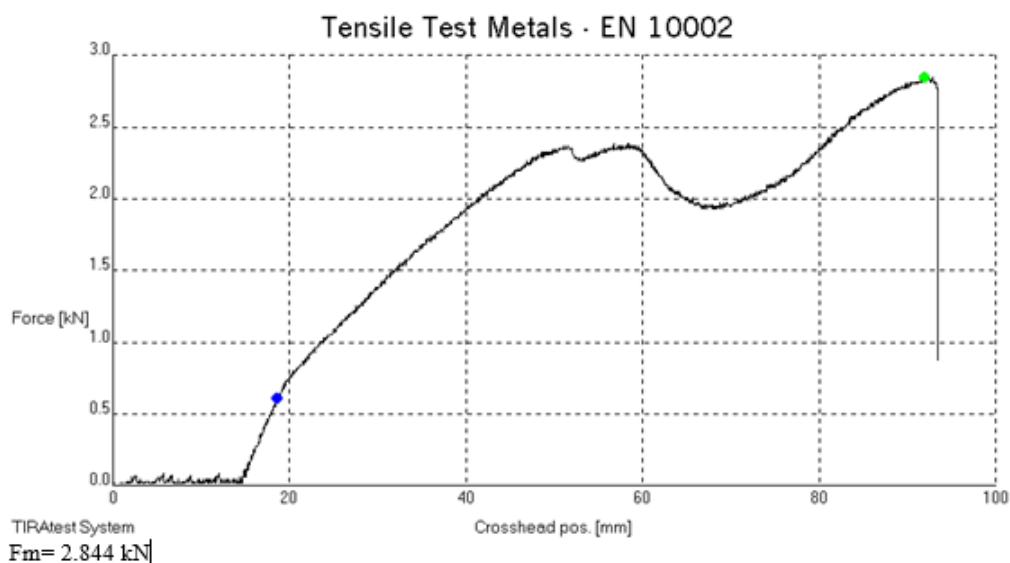
Iz slike uzorka je vidljivo da je do pucanja osnovnog materijala došlo prije nego do pucanja zavara što znači da u pogledu čvrstoće zavar zadovoljava. Pucanje se dogodilo pri sili od 1,5 kN, a maksimalna sila kojoj je zavar bio izložen iznosi 2,752 kN. Nakon zavarivanja Uzorka 1 indikatori na elektrospojnici ukazivali su na to da zavarivanje nije proteklo bez greške jer nisu bili jednako izbačeni.

4.3.1.2. Rezultati ispitivanja ljuštenja Uzorka 1 desno

Na Slici 42 prikazan je Uzorak 1 desno nakon ljuštenja, a na Slici 43 dijagram koji pokazuje opterećenje zavara i pomak križne glave.



Slika 42. Uzorak 1 desno nakon ljuštenja



Slika 43. Dijagram opterećenja Uzorka 1 desno

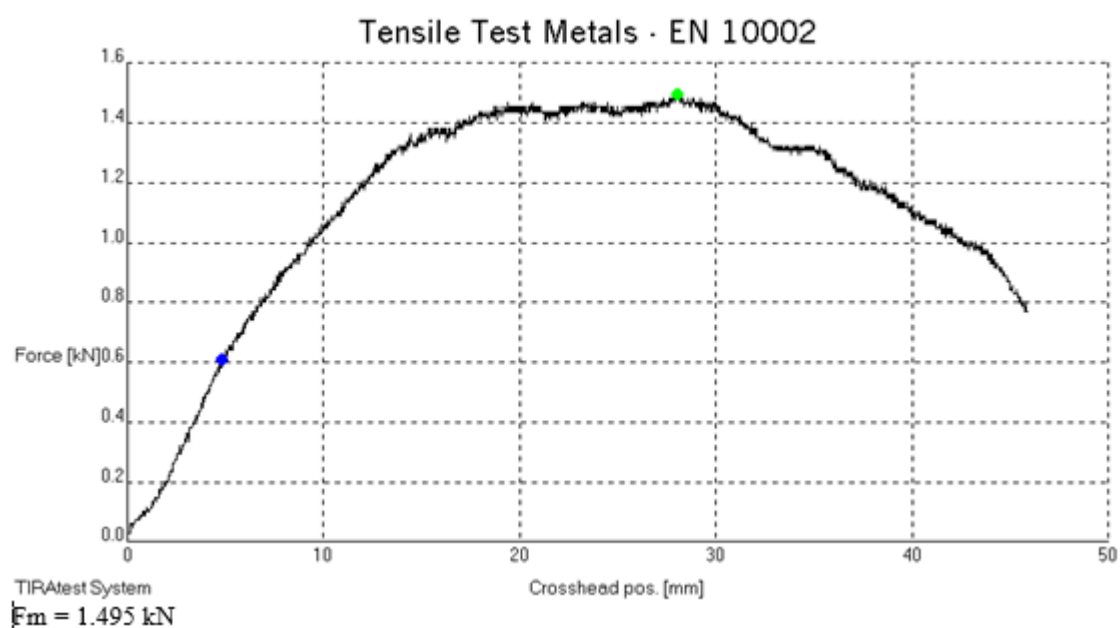
Iz slike uzorka je vidljivo da je do pucanja osnovnog materijala došlo prije nego do pucanja zavara što znači da u pogledu čvrstoće zavar zadovoljava. Pucanje se dogodilo pri sili nešto manjoj od 1 kN, a maksimalna sila kojoj je zavar bio izložen iznosi od 2,844 kN. Nakon zavarivanja Uzorka 1 indikatori na elektrospojnici ukazivali su na to da zavarivanje nije proteklo bez greške jer nisu bili jednako izbačeni.

4.3.1.3. Rezultati ispitivanja ljuštenja Uzorka 2 lijevo

Na *Slici 44* prikazan je Uzorak 2 lijevo nakon ljuštenja, a na *Slici 45* dijagram koji pokazuje opterećenje zavara i pomak križne glave.



Slika 44. Uzorak 2 lijevo nakon kidanja



Slika 45. Dijagram opterećenja Uzorka 2 lijevo

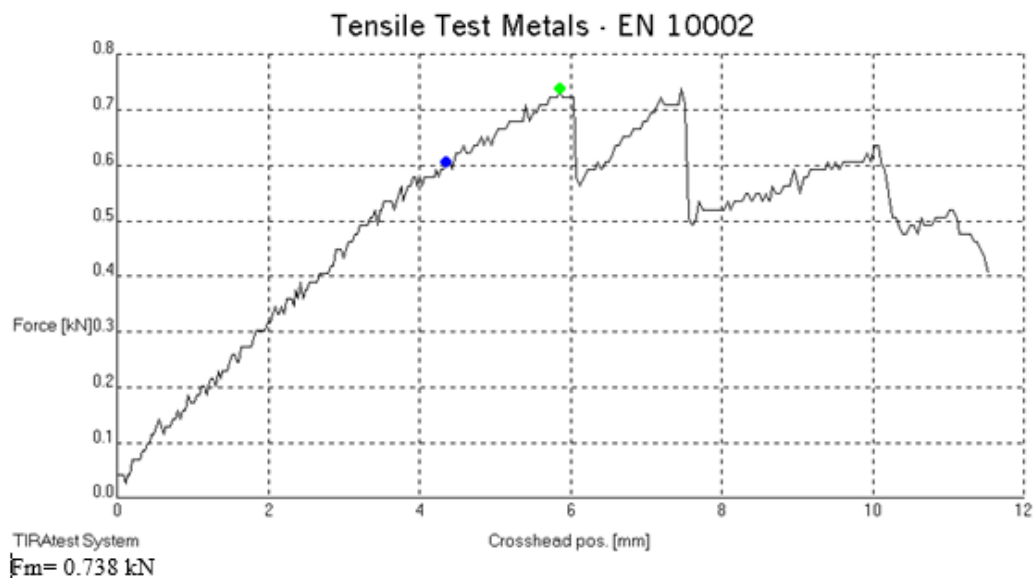
Iz slike uzorka je vidljivo da je došlo do pucanja zavora prije pucanja materijala što znači da je čvrstoća zavora manja. Pucanje se dogodilo pri sili nešto manjoj od 0,8 kN, a maksimalna sila kojoj je zavor bio izložen iznosi od 1,495 kN. Nakon zavarivanja Uzorka 2 indikatori na elektrospojnici su bili jednako izbačeni i ukazivali su na to da je zavarivanje uspješno izvršeno.

4.3.1.4. Rezultati ispitivanja ljuštenja Uzorka 2 desno

Na *Slici 46* prikazan je Uzorak 2 desno nakon ljuštenja, a na *Slici 47* dijagram koji pokazuje opterećenje zavara i pomak križne glave.



Slika 46. Uzorak 2 desno nakon kidanja



Slika 47. Dijagram opterećenja Uzorka 2 desno

Iz slike uzorka je vidljivo da je došlo do pucanja zavara prije pucanja materijala što znači da je čvrstoća zavara manja. Pucanje se dogodilo pri sili nešto od 0,4 kN, a maksimalna sila kojoj je zavar bio izložen iznosi od 0,738 kN. Nakon zavarivanja Uzorka 2 indikatori na

elektrospojnici su bili jednako izbačeni i ukazivali su na to da je zavarivanje uspješno izvršeno.

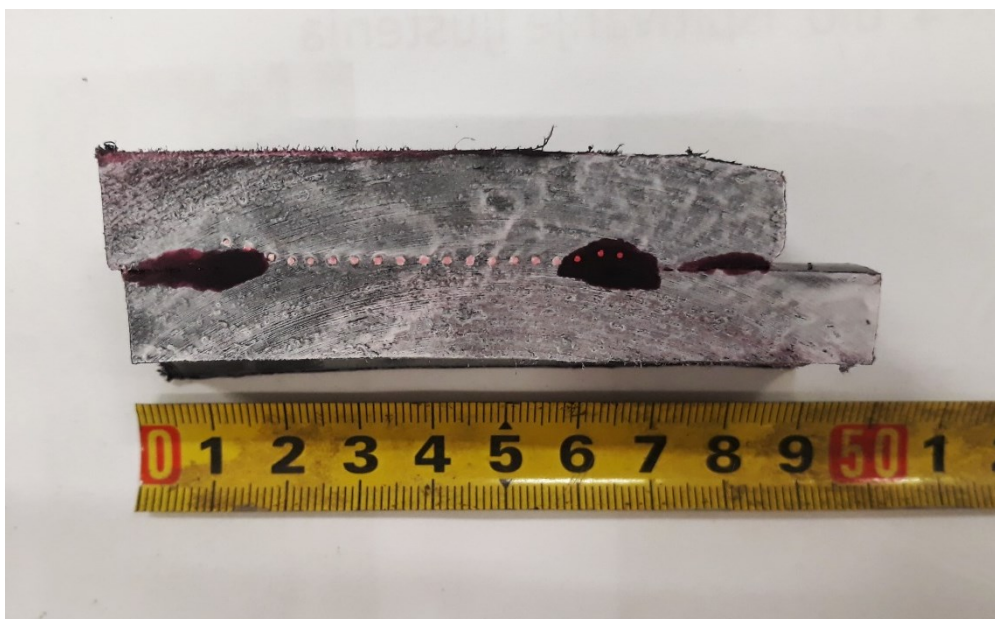
4.4. Ispitivanje penetrantima

Ispitivanje penetrantima provođeno je na uzorku napravljenom iz lijeve strane Cijevi 2. Sredstva za ispitivanje prikazana su na *Slici 48*, a radi se o sredstvu za čišćenje SKC-S proizvođača Magnaflux, penetrantu crvene boje Elite K71B2p proizvođača NDT Italiana i razvijaju SKD-S2 proizvođača Magnaflux. Prvo se nanosi sredstvo za čišćenje i prebriše krpom da bi se uklonile nečistoće poput ulja, potom se nanosi penetrant i ostavi da odstoji, prebriše se, a potom se nanese razvijajući pomoću kojeg će se izvući penetrant i pokazati mjesta na kojima su površinske nepravilnosti.



Slika 48. Sredstvo za čišćenje proizvođača Magnaflux, penetrant proizvođača NDT Italiana i razvijajući proizvođača Magnaflux

Ispitivani uzorak nalazi se na *Slici 49*.



Slika 49. Uzorak ispitivan penetrantima

4.4.1. Rezultati ispitivanja penetrantima

Na Slici 49 vidljivo je da se penetrant razvio oko tri žice. Prema normi EN 13067 pukotina u zavaru ne smije se proširiti iza drugog navoja žice na spojnici. Iz toga proizlazi da ovaj zavar ne zadovoljava jer nije u skladu s propisanom normom.

5. ZAKLJUČAK

Nakon početnog skepticizma polietilenske cijevi su zbog svojih prednosti ušle u široku upotrebu i zamijenile do tada u primjeni raširene čelične cijevi. Proizvode se od različitih vrsta polietilena i različitih svojstava pa su prilagođene svim potrebama. Mogu se koristiti iznad zemlje, u zemlji te ispod mora, a potpuno su sigurne za transport plina i vode, kako otpadne tako i pitke. Postupci njihovog zavarivanja su jednostavni i ne zahtijevaju visoko kvalificirane radnike. Zavarivanje se najčešće izvodi grijaćim pločama i pomoću elektrofuzijskih spojnica. Zavari na cijevima trebaju biti čvrsti poput samih cijevi ili čvršći.

Da bi se ustanovilo da je neki zavar cijevi dobar, odnosno da zadovoljava potrebno je provesti više testiranja što je u eksperimentalnom dijelu vidljivo na primjeru Cijevi 2. Vizualni indikatori na spojnici upućivali su na to da je taj zavar izveden bez nepravilnosti. Međutim, daljnjim ispitivanjima je dokazano da zavar nije dovoljno čvrst i da postoje pukotine koje prema normi nisu dozvoljene. Prilikom ispitivanja ljuštenja zavar je puknuo prije osnovnog materijala što ukazuje na to da njegova čvrstoća nije dovoljno dobra, a penetrantskom metodom ispitivanja otkrivene su nedozvoljene pukotine. Zavar Cijevi 1 je zbog vizualnih indikatora proglašen nezadovoljavajućim, ali ispitivanjem je utvrđeno da u pogledu čvrstoće taj zavar zadovoljava. Prilikom ljuštenja prvo je došlo do pucanja osnovnog materijala što ukazuje na to da je čvrstoća zavara veća od čvrstoće materijala.

LITERATURA

- [1] Tehnička enciklopedija, svezak 10: Oru – Polj, Jugoslavenski leksikografski zavod „Miroslav Krleža“, Zagreb, 1986.
- [2] The history of PE pipe (03. siječnja 2005.), Hart Energy, <https://www.hartenergy.com/news/history-pe-pipe-52531> (pristupljeno 22.12.2020.)
- [3] Handbook of Polyethylene Pipe, Plastics Pipe Institute, SAD, Texas, 2012.
- [4] Čatić I., Proizvodnja polimernih tvorevina, Biblioteka polimerstvo – serija zelena, Zagreb, 2006.
- [5] Can I get polyethylene pipes in different colours?, Acu – Tech Piping Systems, <https://www.acu-tech.com.au/2019-archive/can-i-get-polyethylene-pipes-in-different-colours/> (pristupljeno 16.01.2021.)
- [6] PE Pipes – Pressure Grades (2006.), The Engineering ToolBox, https://www.engineeringtoolbox.com/pe-pressure-grades-d_668.html (pristupljeno 16.01.2021.)
- [7] Open Cut, Plastics Pipe Institute, https://plasticpipe.org/municipal_pipe/advisory/opencut/index.html (pristupljeno 17.01.2021.)
- [8] Is PE pipe suitable for potable water applications? (31. svibnja 2018.), PE100+ Association, <https://www.pe100plus.com/PE-Pipes/Technical-guidance/model/Design/water-pipe/Is-PE-pipe-suitable-for-potable-water-applications-i250.html> (pristupljeno 19.01.2021.)
- [9] Potable water, WL Plastics, <https://wlplastics.com/potable-water/> (pristupljeno 19.01.2021.)
- [10] Waste water, WL Plastics, <https://wlplastics.com/waste-water/> (pristupljeno 19.01.2021.)
- [11] PE pipes for gas supply, Pars Ethylene Kish Co., <http://www.parsethylene-kish.com/separsekish/default.aspx?page=Document&app=Documents&docId=11492&docParId=11488> (pristupljeno 25.01.2021.)
- [12] Gojić M., Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.

- [13] Butt fusion welding of polyethylene pipe, TWI, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/butt-fusion-welding-of-plastics-058> (pristupljeno 23.01.2021.)
- [14] Equipment for butt fusion welding of thermoplastic pipe, TWI, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-type-of-equipment-is-available-for-butt-fusion-welding-of-thermoplastic-pipe> (pristupljeno 24.01.2021.)
- [15] DELTA 355 ALL TERRAIN butt fusion for pressure pipe, RITMO, <https://www.ritmo.it/en/butt-fusion-for-pressure-pipe/delta-355-all-terrain/> (pristupljeno 24.01.2021.)
- [16] SIDEWINDER[®], McElroy, <https://www.mcelroy.com/en/productdetail.htm?class=Sidewinder> (pristupljeno 24.01.2021.)
- [17] PRISMA 125 LIGHT socket fusion, RITMO, <https://www.ritmo.it/en/socket-fusion/prisma-125-light/> (pristupljeno 24.01.2021.)
- [18] What is electrofusion? (29. svibnja 2018.), PE100+ Association, <https://www.pe100plus.com/PE-Pipes/Technical-guidance/model/Construction/methods/What-is-electrofusion-i289.html> (pristupljeno 24.01.2021.)
- [19] ELEKTRA 315 high pressure, RITMO, <https://www.ritmo.it/en/electro-fusion/elektra-315/> (pristupljeno 24.01.2021.)
- [20] How to make an electrofusion joint correctly, Polypipe, <https://www.polypipe.com/efw> (pristupljeno 24.01.2021.)
- [21] Butt fusion or electrofusion welding for joining pipes?, TWI, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-factors-affect-whether-i-should-choose-butt-fusion-or-electrofusion-welding-for-joining-pe-pipes> (pristupljeno 24.01.2020)