

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



Visokošolski program Gradbeništvo,
Smer operativno gradbeništvo

Kandidat:

Igor Buh

Gradnja rezervoarja iz nerjavnega jekla za fosforno kislino

Diplomska naloga št.: 228

Mentor:

izr. prof. dr. Boštjan Brank

Somentor:

doc. dr. Jelena Vojvodič Tuma

Ljubljana, 21. 4. 2006

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 624.014.2:624.953 (043.2)
Avtor: Igor Buh
Mentor: doc. dr. Boštjan Brank
Somentor: doc. dr. Jelena Vojvodič Tuma
Naslov: Gradnja rezervoarja iz nerjavnega jekla za fosforno kislino
Obseg in oprema: 60 str., 20 pregl., 40 sl., 12 en.
Ključne besede: jeklene konstrukcije, jekleni rezervoarji, kontrola gradnje
Izveček:

Osnovni cilj diplomske naloge je bil spoznati vse potrebne kontrole izdelave in montaže nadzemnih jeklenih rezervoarjev. Obravnavani rezervoar je zgrajen iz nerjavnega jekla. Njegova prostornina je 750 m³ in je namenjen shranjevanju fosforne kisline. V prvem delu so opisane potrebne kontrole v skladu z veljavnimi predpisi, v drugem delu pa so te kontrole tudi obravnavane. Predstavljeno je preverjanje ustreznosti postopka varjenja, ki zajema neporušitvene in porušitvene preiskave zvarjenega spoja. V zadnjem delu pa je predstavljena tudi kontrola izdelave in montaže rezervoarja. V tem poglavju so obravnavane neporušitvene kontrole zvarjenih spojev, dimenzijska kontrola rezervoarja ter hidrostatični preizkus.

BIBLIOGRAFIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 624.014.2:624.953 (043.2)
Author: Igor Buh
Mentor: Assist. prof. Boštjan Brank
Comentor: Assist. prof. Jelena Vojvodič Tuma
Title: Construction of a stainless steel storage tank for phosphoric acid
Notes: 60 p., 20 tab., 40 fig., 12 eq.
Key words: steel structures, steel tanks, construction control
Abstract:

The main purpose of this thesis was to get acquainted with all necessary procedures for steel storage tank manufacturing and assembly control. The representative storage tank was built from stainless steel and it was designed to hold 750 m³ of phosphoric acid. In the first section all legally mandatory control procedures are described and they are applied to our storage tank in the second section. Welding control is presented, which consists of destructive and non-destructive inspections of the welded joint. Overall construction control is presented in the last part of the thesis. This part also discusses non-destructive inspections of welded joints in the storage tank, dimensional control of the storage tank as well as the hydrostatic test.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Boštjanu Branku in somentorici doc. dr. Jeleni Vojvodič Tuma. Hvala tudi vsem sodelavcem na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije v Ljubljani, ki so mi neprestano nudili pomoč.

Nenazadnje pa se zahvaljujem tudi svojim staršema, ki sta mi skozi vsa leta študija nudila pomoč in mi stala ob strani.

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Oznake izbranega jekla v različnih standardih
Preglednica 2:	Delež legirnih elementov v jeklu 316 L v ut. %
Preglednica 3:	Napetost tečenja, natezna trdnost, trdota, raztezek, kontrakcija in žilavost jekla 316 L pri sobni temperaturi
Preglednica 4:	Izračun debeline pločevine za posamezne ovoje rezervoarja RF-8
Preglednica 5:	Kvalitetni razredi po standardu ENV 1993-1-6
Preglednica 6:	Dovoljena odstopanja v meridialni smeri za posamezne kvalitetne razrede
Preglednica 7:	Dovoljena odstopanja v obodni smeri za posamezne kvalitetne razrede
Preglednica 8:	Dovoljena odstopanja v področju zvarov za posamezne kvalitetne razrede
Preglednica 9:	Dovoljena odstopanja rezervoarja od popolnega kroga za posamezne kvalitetne razrede
Preglednica 10:	Maksimalna dopustna zamaknjenost pločevin v zavarjenih stikih
Preglednica 11:	Rezultati merjenja udarne žilavosti osnovnega materiala po Charpy-ju
Preglednica 12:	Izmerjen delež legirnih elementov v jeklu v ut. %
Preglednica 13:	Vsebnost δ -ferita v osnovnem materialu
Preglednica 14:	Dimenzijska kontrola pločevin drugega ovoja rezervoarja RF-8
Preglednica 15:	Rezultati nateznega preizkusa
Preglednica 16:	Rezultati upogibnega preizkusa zvarjenega spoja
Preglednica 17:	Rezultati merjenja udarne žilavosti zvara po Charpy-ju
Preglednica 18:	Rezultati meritve mikrotrdot (HV 300) na temenski strani zvara
Preglednica 19:	Rezultati meritve mikrotrdot (HV 300) na korenski strani zvara
Preglednica 20:	Vsebnost δ -ferita v varu

KAZALO SLIK

- Slika 1: Poškodbe na rezervoarju iz armiranega poliestra v Luki Koper
- Slika 2: Razviti plašč rezervoarja RF-8
- Slika 3: Prerez plašča rezervoarja RF-8
- Slika 4: Dno rezervoarja RF-8
- Slika 5: Detajl stika pločevin dna
- Slika 6: Streha rezervoarja RF-8
- Slika 7: Detajl spoja pločevin strehe
- Slika 8: Schaefflerjev diagram
- Slika 9: Ravnotežni diagram Fe – Cr s fazami, ki nastajajo pri različnih temperaturah
- Slika 10: Možne napake v zvarjenih spojih
- Slika 11: Komplet za penetrantsko kontrolo (čistilo, penetrant in razvijalec)
- Slika 12: Rentgenski aparat ter varilni etalon pripravljen za radiografsko preiskavo
- Slika 13: Vakuumska črpalka ter vakuumski poveznik za kotne zware
- Slika 14: Lokalno odstopanje plašča rezervoarja v meridialni (aksialni) smeri
- Slika 15: Lokalno odstopanje plašča rezervoarja v obodni smeri
- Slika 16: Lokalno odstopanje plašča rezervoarja v področju vertikalnih in horizontalnih zvarov
- Slika 17: Odstopanje premera plašča od popolnega kroga
- Slika 18: Rezervoar prostornine 60.000 m³ na Serminu pri Kopru
- Slika 19: Inštrumentirano Charpy-jevo kladivo za merjenje udarne žilavosti na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije v Ljubljani
- Slika 20: Mikrostruktura osnovnega materiala
- Slika 21: Dimenzijska kontrola pločevin
- Slika 22: Lokacija rezervoarja RF-8 na terminalu tekočih kemikalij
- Slika 23: Gradnja rezervoarja – dvigovanje petega in šestega ovoja ter strehe
- Slika 24: Gradnja rezervoarja – namestitev podpornih stebrov
- Slika 25: Gradnja rezervoarja – dvigovanje četrtega, petega in šestega ovoja ter strehe, za namestitev podpornih stebrov
- Slika 26: Streha rezervoarja

- Slika 27: Grelna špirala vgrajena v dno rezervoarja
- Slika 28: Preizkušanci za porušitvene preiskave
- Slika 29: Varilni etalon pred penetrantsko preiskavo, po nanosu penetranta ter po nanosu razvijalca
- Slika 30: Radiogram
- Slika 31: Natezni diagram
- Slika 32: Upogibni preizkus
- Slika 33: Upogibni preizkušanci (2 temenska in 2 korenska) po preizkusu
- Slika 34: Makroposnetek zvarjenega spoja
- Slika 35: Diagram mikrotrdot
- Slika 36: Vzorec za metalografski pregled zvarjenega spoja
- Slika 37: Meja med varom in toplotno vplivnim področjem z vključkom žlindre
- Slika 38: Mikrostruktura vara
- Slika 39: Kontrola priprave zvarnega spoja
- Slika 40: Dimenzijska kontrola rezervoarja

KAZALO

1.0 UVOD	1
1.1 <i>Namen in cilj naloge</i>	1
2.0 PROJEKTNA DOKUMENTACIJA	2
2.1 <i>Opis konstrukcije</i>	2
2.2 <i>Izbira osnovnega materiala</i>	6
2.3 <i>Predpisi</i>	9
2.4 <i>Obtežbe</i>	10
2.5 <i>Dimenzioniranje elementov</i>	12
3.0 KONTROLA IZDELAVE IN MONTAŽE REZERVOARJEV	14
3.1 <i>Splošno</i>	14
3.2 <i>Kontrola varilskih del</i>	16
3.2.1 <i>Napake v zvarjenih spojih</i>	16
3.2.2 <i>Neporušitvene preiskave zvarjenih spojev</i>	18
3.2.2.1 <i>Vizualna kontrola zvarov</i>	18
3.2.2.2 <i>Penetrantska kontrola zvarov</i>	20
3.2.2.3 <i>Radiografska kontrola zvarov</i>	22
3.2.2.4 <i>Kontrola tesnosti zvarov</i>	24
3.3 <i>Geometrijska odstopanja pri izdelavi in montaži</i>	25
3.4 <i>Hidrostatski preizkus</i>	32
3.5 <i>Protikorozijska zaščita</i>	33
3.5.1 <i>Rezervoarji iz konstrukcijskega jekla</i>	33
3.5.2 <i>Rezervoarji iz nerjavnega jekla</i>	34
3.6 <i>Dokumentacija o kontroli izdelave in montaže</i>	35
4.0 KONTROLA IZDELAVE IN MONTAŽE REZERVOARJA RF-8	36
4.1 <i>Kontrola osnovnega materiala</i>	36
4.2 <i>Korozijska obstojnost osnovnega materiala</i>	39
4.3 <i>Dimenzijska kontrola obdelave pločevin</i>	40
4.4 <i>Pregled dokumentacije za zagotovitev kvalitete izdelave</i>	41
5.0 KONTROLA MONTAŽE REZERVOARJA RF-8	42

<i>5.1 Sestava rezervoarja</i>	<i>42</i>
<i>5.2 Preverjanje ustreznosti postopka varjenja</i>	<i>46</i>
5.2.1 Neporušitvene preiskave zvarjenega spoja	47
5.2.2 Natezni preizkus zvarjenega spoja	49
5.2.3 Upogibni preizkus zvarjenega spoja	50
5.2.4 Preizkus udarne žilavosti	51
5.2.5 Meritev mikrotrdot	52
5.2.6 Metalografski pregled zvarjenega spoja	53
<i>5.3 Vizualna kontrola zvarov</i>	<i>55</i>
<i>5.4 Penetrantska kontrola zvarov</i>	<i>56</i>
<i>5.5 Radiografska kontrola zvarov</i>	<i>56</i>
<i>5.6 Kontrola tesnosti zvarov</i>	<i>57</i>
<i>5.7 Dimenzijska kontrola rezervoarja</i>	<i>57</i>
<i>5.8 Hidrostatični preizkus</i>	<i>58</i>
6.0 ZAKLJUČEK	59
7.0 VIRI	60

1 UVOD

1.1 Namen in cilj naloge

Na terminalu tekočih kemikalij v Luki Koper je že od leta 1986 skladiščena fosforna kislina v šestih 750 m³ nadzemnih rezervoarjih. V letu 2005 je prišlo do poškodbe in puščanja rezervoarja izdelanega iz armiranega poliestra (*slika 1*), zato se je Luka Koper odločila za postavitev novega rezervoarja.



Slika 1: Poškodbe na rezervoarju iz armiranega poliestra v Luki Koper

V diplomski nalogi je predstavljena gradnja novega rezervoarja RF – 8 izdelanega iz nerjavne pločevine, obravnavane pa so tudi vse potrebne kontrole za izdelavo in montažo rezervoarja. Prostornina novega nadzemnega rezervoarja RF – 8 je 750 m³. Rezervoar je postavljen v armiranobetonski lovilni bazen, ki je skupen za vseh 6 rezervoarjev z oznako RF-5 do RF-10. V novem rezervoarju bo skladiščena 93 % bela fosforna kislina H₃PO₄, ki ima temperaturo strjevanja pri 27 °C in se uporablja v prehrabeni industriji.

Investitor gradnje novega rezervoarja je Luka Koper d.d. Projektno dokumentacijo je izdelal Inštitut za vode Republike Slovenije. Rezervoar je izdelala in montirala Nafta Strojna d.o.o. iz Lendave, kontrolo del za Nafto Strojno pa je izvedel Inštitut za kovinske materiale in tehnologije iz Ljubljane.

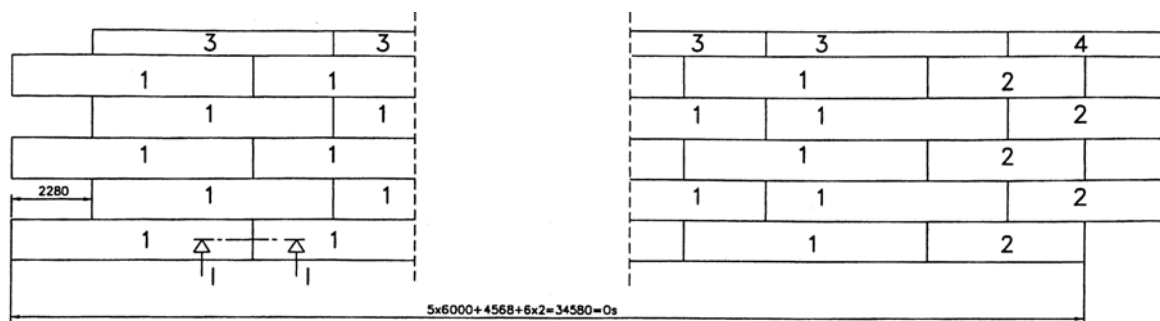
2 PROJEKTNA DOKUMENTACIJA

2.1 Opis konstrukcije

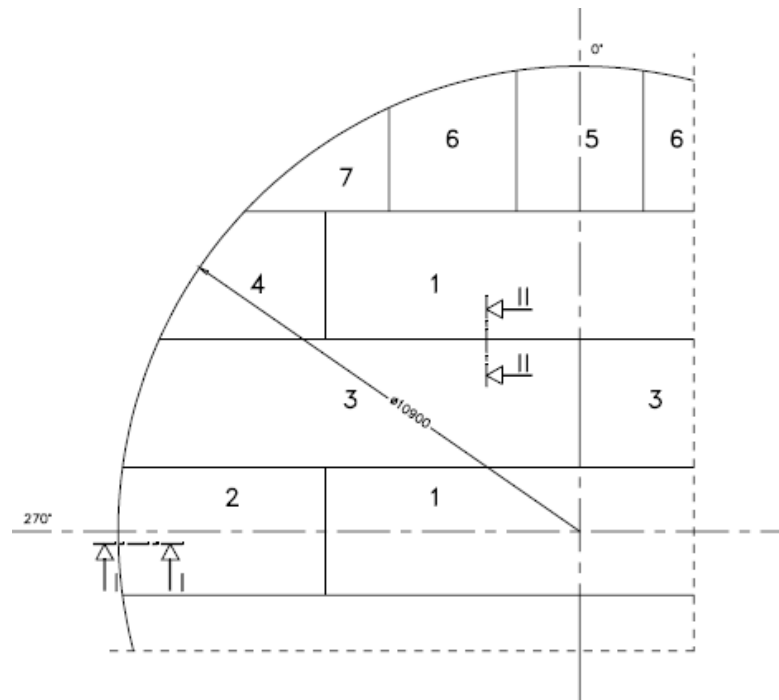
Plašč rezervoarja

Plašč rezervoarja je izdelan iz pločevin pravokotne oblike, ki so medsebojno sočelno zvarjene. Pet pasov rezervoarja je visokih 1500 mm, en pas pa je visok 700 mm. Vsak pas rezervoarja je sestavljen iz petih segmentov pločevin dolžine 6000 mm in enega segmenta dolžine 4568 mm, ki se prikroji po obsegu plašča rezervoarja, ki meri v spodnjem delu 34557 mm. Pločevine plašča so iz materiala X2CrNiMo 17-12-2 po DIN 17440 (EN 10222-1) oziroma 316 L po standardu ASTM. Debelina pločevine je 7 mm. Nerjavna pločevina je z notranje strani zaradi zaščite površine prevlečena s PVC folijo.

Plašč rezervoarja leži na obodnem prstanu širine 200 mm in debeline 7 mm. Na armiranobetonski temelj je pritrjen preko dvajsetih enakomerno po obodu plašča rezervoarja razporejenih ekspanzijskih temeljnih vijakov M16. Razviti plašč rezervoarja RF-8 je prikazan na *sliki 2*.

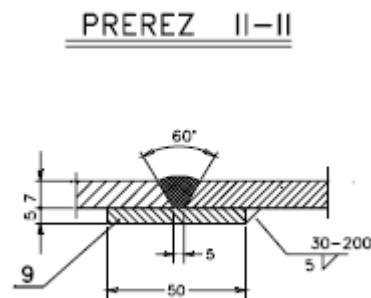


Slika 2: Razviti plašč rezervoarja RF-8



Slika 4: Dno rezervoarja RF-8

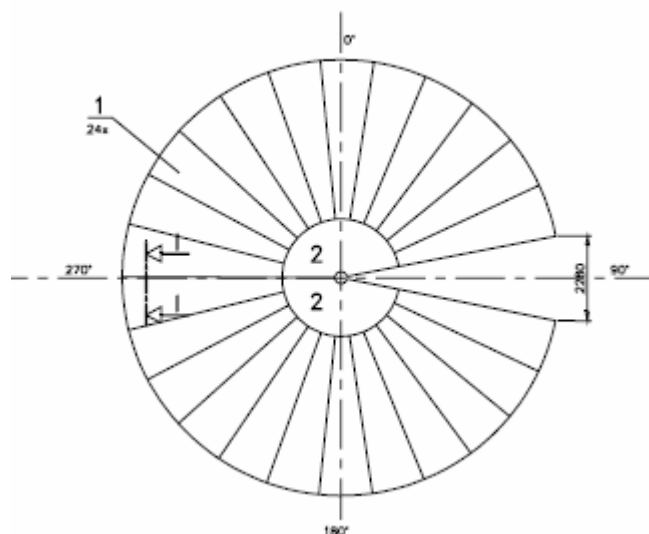
Slika 5 prikazuje detajl stika pločevin dna rezervoarja.



Slika 5: Detajl stika pločevin dna

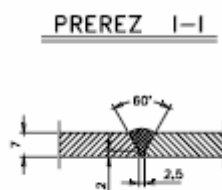
Streha rezervoarja

Streha rezervoarja je samonosilni konus – membranskega tipa, izdelan iz pločevine debeline 7 mm, prav tako iz materiala X2CrNiMo 17–12–2 po DIN 17440. Pločevine so sočelno zvarjene. Streha rezervoarja je prikazana na *sliki 6*.



Slika 6: Streha rezervoarja RF-8

Na *sliki 7* je prikazan detajl spoja pločevin strehe.



Slika 7: Detajl spoja pločevin strehe

Ostalo

Ker je potrebno fosforno kislino v rezervoarju ogrevati, je rezervoar izoliran z mineralno volno debeline 100 mm (z zaščitno Al - folijo) in obložen z oblogo TRIMOVAL TP 750, debeline 0,6 mm iz jekla prebarvanega s premazom odpornim na morsko atmosfero. Cevovodi, armatura in priključki za manipulacijo so ogrevani z električnim kablom za gretje in obloženi z mineralno volno debeline 50 mm z zaščitno Al – pločevino debeline 0,6 mm, prebarvani pa so s premazom odpornim na morsko atmosfero. Priključka za izpust iz dna rezervoarja imata dodatno vgrajeno bakreno cev za gretje s toplo vodo kot možno rezervo v sistemu električnega gretja. Spoj armiranobetonskega temelja in rezervoarja je izveden s „sika“ trakom dimenzije 200 mm x 1 mm.

2.2 Izbira osnovnega materiala

Za vse dele konstrukcije rezervoarja – plašč, streho, dno rezervoarja in anularni prstan je izbran material X2CrNiMo 17–12–2. To je avstenitno nerjavno jeklo legirano z molibdenom in z nizko vsebnostjo ogljika ter zato z večjo obstojnostjo proti različnim vrstam korozije. Uporablja se za izdelavo konstrukcij v kemijski in prehrabeni industriji. Ta oznaka je povzeta po EN – European Standard.

Preglednica 1 : Oznake izbranega jekla v različnih standardih

Oznaka standarda	Ime standarda	Oznaka jekla
EN	European Standard (European Norm)	X2CrNiMo 17-12-2
W.NR.	Oznaka v Atlasu jekel	1.4404
ASTM	American Society for Testing and Materials	316 L
BS	British Standards	316 S 11
AFNOR	Association Francaise de Normalisation	Z3CND 17-11-02
Acroni	Oznaka Acroni	Acroni 12 LC

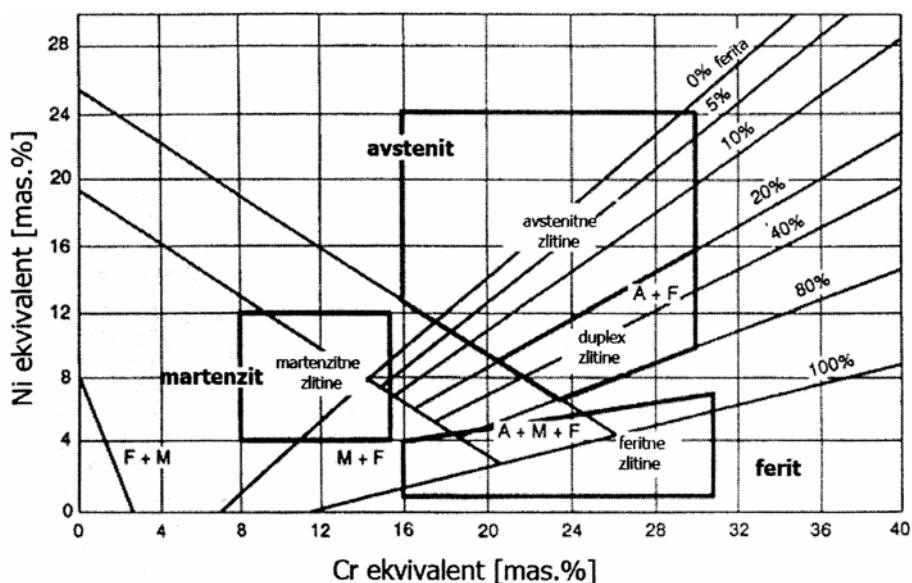
Kemična sestava jekla – delež legirnih elementov je razviden iz *preglednice 2*.

Preglednica 2: Delež legirnih elementov v jeklu 316 L v ut. %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
≤ 0,030	≤ 0,75	≤ 2,0	≤ 0,030	≤ 0,045	16-18	10-14	2-4	≈65

Nerjavna jekla so jekla, ki vsebujejo več kot 12 % kroma. Na površini jekla nastaja v prisotnosti kisika tanka in dobro oprijeta plast kromovega oksida Cr₂O₃. Površina jekla se tako pasivira in močno zavre ali pa popolnoma prepreči korozijske procese. Dodatki niklja, molibdena in bakra še povečujejo korozijsko odpornost, istočasno pa vplivajo tudi na mehanske lastnosti. Na mehanske lastnosti vplivajo še legirni elementi kot so ogljik, titan,

niobij in dušik. Glede na mikrostrukturne značilnosti, ki so odvisne od legirnih elementov, so nerjavna jekla razdeljena na *feritna*, *avstenitna*, *martenzitna* in *dupleks (avstenit, ferit)* nerjavna jekla. Vrste nerjavnih jekel so v odvisnosti od krom in nikelj ekvivalenta podana v Schaefflerjevem diagramu, ki je prikazan na *sliki 8*.



Slika 8: Schaefflerjev diagram

Avstenitno strukturo imajo jekla, ki so legirana s 16% kroma in 8% niklja. Ogljik v trdni raztopini stabilizira avstenit. Ker pa se veže v kromov karbid ($(Fe,Cr)_{23}C_6$ (karbid vrste $M_{23}C_6$), se okolica osiromaši na kromu in mesta z deležem kroma pod kritično vsebnostjo 12% se ne pasivirajo. Karbidi se lahko izločajo tudi po kristalnih mejah in tako jeklo je občutljivo za interkristalno korozijo. Avstenitna nerjavna jekla imajo do 0,1% ogljika. Jekla odporna proti interkristalni koroziji imajo do 0,03% ogljika. Jekla z višjo vsebnostjo ogljika pa so lahko stabilizirana z elementi, ki so močni karbidotvorci (titan, niobij). Titan in niobij vežeta ogljik v karbide TC in NbC, ki so enakomerno razporejeni po kovinski matici. Jeklo je odporno proti interkristalni koroziji in tudi matica ni nikjer osiromašena na vsebnosti kroma. Oba elementa vežeta tudi dušik, pri čemer nastajajo karbonitridi Ti(CN) in Nb(CN). Molibden v avstenitnih nerjavnih jeklih stabilizira pasivacijsko plast in poveča odpornost jekla v medijih, ki vsebujejo klorove ione. Molibden destabilizira avstenit, zato imajo ta jekla povišano vsebnost niklja.

Jeklo se dobavlja v gašenem stanju (gašenje v vodi s temperature 1050 – 1100 °C). V avstenitni mikrostrukturi je vedno nekaj odstotkov *delta ferita* (do 5 %). Jeklo se pri obdelavi hitro hladno utrjuje in je zato potrebna taka toplotna obdelava, da je v jeklu veliko notranjih napak (dislokacij) in se zato lahko hladno dobro preoblikuje. Zelo pomembna lastnost avstenitnih jekel je žilavost, ki se ne zmanjša tudi pri zelo nizkih temperaturah. Pri večjih stopnjah hladne deformacije je potrebno jeklo med posameznimi fazami preoblikovanja ponovno gasiti. Mehanske lastnosti jekla 316 L so podane v *preglednici 3*.

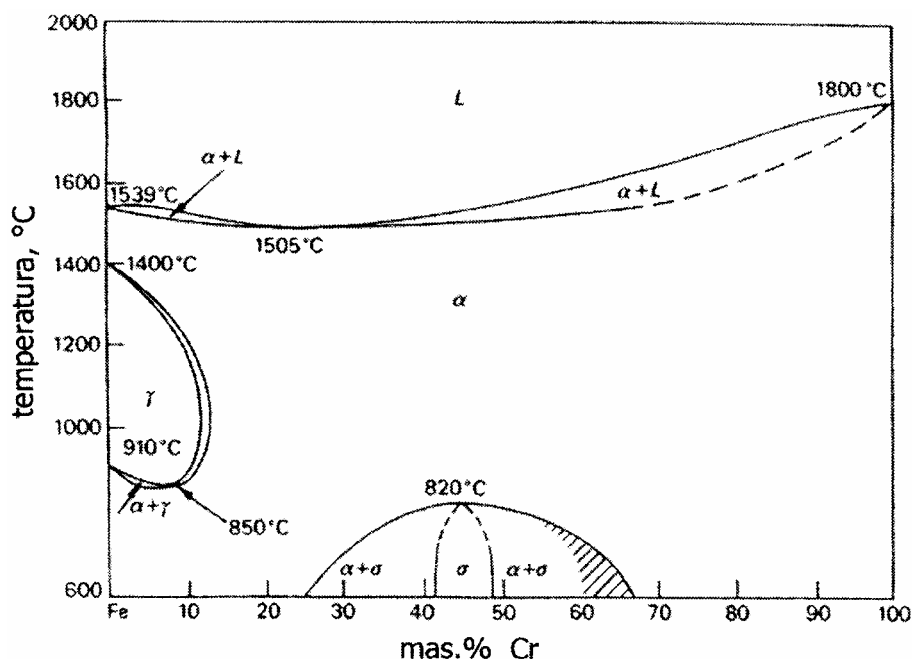
Preglednica 3: Napetost tečenja, natezna trdnost, trdota, raztezek, kontrakcija in žilavost jekla 316 L pri sobni temperaturi

σ_{ys} [N/mm ²]	σ_m [N/mm ²]	HB (HV)	δ_5 [%]	Z [%]	Žilavost ISO-V [J]
≥ 190	460 – 690	120 – 180 (125 – 190)	≥ 35	≥ 60	≥ 85

Jeklo ima nizko vsebnost ogljika in je legirano z molibdenom, kar mu zagotavlja dobro korozijsko odpornost tudi v nekaterih organskih in anorganskih kislinah. Jeklo se dobro polira, kar je s stališča korozije pomembno, ker je polirano jeklo bistveno bolj odporno proti koroziji.

Jeklo se dobro vari, varjenje pa mora potekati v nevtralni atmosferi, da ne pride do naogličjenja taline. Zvar mora imeti v avstenitni mikrostrukturi nekaj δ -ferita, da pri strjevanju ne nastanejo lunckerji oziroma mikroporozna mesta. Varjenje mora biti izvedeno pri takih pogojih, da v toplotno vplivnem območju ne nastajajo karbidi. Zaradi preprečitve interkristalne korozije je ustrežnejše varjenje s stabiliziranim dodajnim materialom.

Jeklo se uporablja do temperature 350 °C. Pri višjih temperaturah poteka v δ -feritu spinodalni razpad na področja bogatejša in revnejša na kromu glede na njegovo povprečno vsebnost (izločanje intermetalne faze CrFe bogate na kromu) in nastajanja sigma (σ) faze, ki se izloča po kristalnih mejah (*slika 9*). Zaradi teh faz se žilavost jekla močno poslabša.



Slika 9: Ravnotežni diagram Fe – Cr s fazami, ki nastajajo pri različnih temperaturah

2.3 Predpisi

Pri projektiranju rezervoarja lahko uporabljamo naslednje standarde in predpise:

- API 650 – „Welded Steel Tanks for Oil Storage“, 1998, add 2001
- DIN 18800 „Steel Structures“, T1 – Design and Construction, T4 – Stability, Buckling of Shells, November 1992 (T1-za konstrukcijo rezervoarja, T4 – za kontrolo napetosti in stabilnosti)
- BS 2654 – „Manufacture of Vertical Steel Welded Non Refrigerated Storage Tanks with But – Welded Sheels for the Petroleum Industry“, 1989 (za razpored ojačilnih obročev in izračun stabilnosti pri potresni obtežbi)
- DIN 4119 (konstrukcija vertikalnega cilindričnega rezervoarja)
- Eurocode 1 – ENV 1991: Osnove projektiranja in vplivi na konstrukcije
- Eurocode 3 – ENV 1993: Projektiranje jeklenih konstrukcij – Del 4-2: Silosi, rezervoarji in cevovodi – Rezervoarji (prevzet ENV 1993-4-2:1999 z metodo platnice)

- Eurocode 3 – ENV 1993: Projektiranje jeklenih konstrukcij – Del 1-6: Splošna pravila – Dodatna pravila za lupinaste konstrukcije (prevzet ENV 1993-1-6:1999 z metodo platnice)
- Eurocode 8 – ENV 1998: Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih
- SIST ENV 1991-1: Osnove projektiranja in vplivi na konstrukcije - 1. del: Vplivi na konstrukcije
- SIST ENV 1991-2: Gostote, lastna teža in koristne obtežbe
- SIST ENV 1991-3: Vplivi na konstrukcije – obtežbe snega
- SIST ENV 1991-4: Vplivi na konstrukcije – vplivi vetra

2.4 Obtežbe

Obtežbe, ki lahko delujejo na rezervoar so naslednje :

- lastna teža rezervoarja in opreme,
- hidrostatični pritisk medija,
- sneg,
- veter s pritiskujočim in sesalnim učinkom,
- notranji podpritisk ali nadpritisk,
- potresne sile.

Hidrostatični pritisk medija in notranji nadpritisk povzročata v plašču rezervoarja natezne sile, zato je smotrna uporaba kvalitetnejših jekel za plašč. Vse druge obtežbe pa povzročajo v plašču tudi tlačne aksialne in obodne sile, ki zahtevajo primerno ojačitev plašča rezervoarja z ojačilnimi obroči, potrebna pa je tudi kontrola lokalne stabilnosti proti izbočenju pločevin plašča. Poleg kontrol napetosti in lokalne stabilnosti pa so potrebne tudi kontrole globalne stabilnosti v smislu zagotovitve varnosti proti prevrnitvi rezervoarja zaradi obtežbe z vetrom ali potresom.

Debelina plašča rezervoarja se določa na osnovi hidrostatičnih pritiskov, ki pa so različni v eksploataciji (vskladiščeni medij) in pri hidrotestu (običajno voda). Dimenzije plašča rezervoarja pa morajo istočasno zagotavljati tudi stabilnost plašča zaradi vpliva tlačnih

napetosti, ki jih povzroča obtežba strehe, snega, opreme, vetra in potresa. V potresnih obtežbah je zajet vpliv tako teže konstrukcije kot delovanja tekočega medija v rezervoarju. Velikost potresnih obtežb pa je odvisna od kvalitete temeljnih tal, potresne cone, kjer je postavljen rezervoar in od specifične teže tekočega medija. Navedene obtežbe povzročajo aksialne tlačne napetosti, eventuelni podtlak v notranjosti rezervoarja in veter ter obodne tlačne napetosti. Zato je potrebno pri stabilnostnem dokazu varnosti proti izbočenju upoštevati interakcijo napetosti v dveh pravokotnih smereh. Stabilnost plašča se poleg ustrezne debeline plašča doseže tudi s primernim razporedom in dimenzijami ojačilnih obročev. Ekonomičen odnos med številom in dimenzijami ojačilnih obročev ter debelino plašča rezervoarja je stvar optimizacije konstrukcije. Pri izračunani debelini plašča jeklenega rezervoarja je potrebno upoštevati dodatek za eventuelne negativne tolerance pločevin (0,3 mm) in dodatek za korozijo plašča (običajno 1 mm).

Izračun strešne konstrukcije rezervoarja je odvisen od izvedbe in pogojev podpiranja. Glavna obtežba je lastna teža strehe z opremo, sneg in veter.

Dimenzije dna rezervoarja pa se določijo na osnovi konstrukcijskih potreb z omejitvami podanimi v predpisih.

V našem primeru je za rezervoar RF - 8 upoštevano naslednje :

- lastna teža plašča,
- teža strehe,
- teža opreme,
- teža snega (0,35 kN/m²),
- hidrostatični pritisk medija (fosforna kislina) v eksploataciji z $g = 17,8 \text{ kN/m}^3$,
- hidrostatični pritisk vode pri hidrotestu z $g = 9,81 \text{ kN/m}^3$,
- obtežba z vetrom pri hitrosti 160 km/h,
- potresna obtežba za VIII. potresno cono po MCS in slaba tla.

2.5 Dimenzioniranje elementov

Osnovni podatki :

Notranji premer plašča	D =	11 m
Nominalni premer plašča	D=D _i +t _i	11,007 m
Višina plašča	H _{pl} =	8,2 m
Višina polnjenja	H _m =	8 m
Specifična masa tekočine	G =	1,78 kg/dm ³
Minimalna dovoljena debelina plašča	t =	5 mm
Korozijski dodatek	CA =	0,5 mm
Projektna temperatura	T =	75 °C
Dovoljena natezna napetost za projektne pogoje	S _d =	137 N/mm ²
Dovoljena natezna napetost za testne pogoje	S _t =	114 N/mm ²
Specifična masa jekla	ρ =	7850 kg/m ³

Izračunsko debelino plašča za projektne pogoje izračunamo po predpisu API 650-tč. 3.6.3.2:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H_i - 0,3048) \cdot G}{S_d} + CA \quad (2.1)$$

Izračunsko debelino plašča za testne pogoje izračunamo po predpisu API 650-tč. 3.6.3.2:

$$t_t = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H_i - 0,3048)}{S_t} \quad (2.2)$$

Preglednica 4: Izračun debeline pločevine za posamezne ovoje rezervoarja RF-8

<i>Pas</i>	H_p	S_d	S_t	H_i	t_d'	t_d	t_t'	t_t	t	<i>masa</i>
<i>št.</i>	<i>m</i>	N/mm^2	N/mm^2	<i>m</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>kg</i>
1	1,5	137	114	8,00	5,89	5,89	3,64	5,50	7	2850
2	1,5	137	114	6,50	4,84	5,50	2,93	5,50	7	2850
3	1,5	137	114	5,00	3,79	5,50	2,22	5,50	7	2850
4	1,5	137	114	3,50	2,74	5,50	1,51	5,50	7	2850
5	1,5	137	114	2,00	1,69	5,50	0,80	5,50	7	2850
6	0,7	137	114	0,50	0,64	5,50	0,09	5,50	7	1330
Skupaj: 8,2 m					Skupna masa vseh ovojev					= 15580 kg
					Izračunski volumen rezervoarja					= 779 m ³

Kjer pomeni:

H_p višina pločevine posameznega ovoja rezervoarja

H_i višina pritiska medija na posamezni ovoj

t_d' izračunana debelina pločevine posameznega ovoja glede na projektne pogoje

t_d izbrana debelina pločevine posameznega ovoja glede na projektne pogoje

t_t' izračunana debelina pločevine posameznega ovoja glede na testne pogoje

t_t izbrana debelina pločevine posameznega ovoja glede na testne pogoje

t izbrana debelina pločevine za posamezni ovoj rezervoarja

Na podlagi izračuna prikazanega v preglednici 4 se je projektant odločil za 7 mm enotno debelino vseh ovojev rezervoarja.

Debelina dna rezervoarja je določena po točki 3.1.5.5 standarda API 650, ki navaja, da je najtanjša debelina pločevine, ki se lahko uporabi za dno 6 mm. Ker je rezervoar majhnega premera se je projektant odločil za to debelino, ki pa ji je prištel še korozijski dodatek in na osnovi tega izbral pločevino debeline 7 mm.

3.0 KONTROLA IZDELAVE IN MONTAŽE REZERVOARJEV

3.1 Splošno

Kontrola izdelave in montaže rezervoarja je določena v projektu, obravnavana pa je v različnih predpisih. V EN-14015-2005 je kontrola izdelave in montaže rezervoarjev navedena v točki 15 in obsega :

- izdelava rezervoarja
 - sprejem in identifikacija materiala
 - rokovanje, shranjevanje in označevanje materiala
 - priprava pločevine in tolerance
 - obdelava pločevine in tolerance
 - priprava raznih priključkov
 - varjenje v delavnici
 - stanje površin elementov rezervoarja
 - označevanje za montažo
 - pakiranje in transport na gradbišče
- montaža rezervoarja na gradbišču in tolerance
 - temelji
 - mesta sidranja
 - rokovanje in skladiščenje materiala
 - zavračanje poškodovanega materiala med transportom
 - pločevin dna in plašča rezervoarja
 - tolerance, sestave ovojev in geometrija plašča rezervoarja
 - fiksna streha
 - priključki na rezervoarju
 - začasni priključki na rezervoarju

V standardu API 650 je izdelava rezervoarjev zajeta v točki 4, montaža pa v točki 5 ter obsega naslednje :

- izdelava rezervoarjev
 - splošno
 - kontrola v delavnici
- montaža rezervoarjev
 - splošno
 - varjenje
 - kontrola, preizkušanje in popravila
 - popravila zvarov
 - geometrijska odstopanja

Še vedno pa je v veljavi pravilnik o tehničnih ukrepih in pogojih za montažo jeklenih konstrukcij (Ur. list SFRJ št. 29/1970), ki obravnava naslednje :

- projekt za montažo jeklenih konstrukcij
 - projekt odra
 - načrt organizacije gradbišča
 - seznam opreme za izvedbo montažnih del
- priprava gradbišča za izvedbo montažnih del
 - ureditev gradbišča
 - ukrepi za zagotovitev varnosti
- kontrola in prevzem jeklene konstrukcije v delavnici
- transport jeklene konstrukcije
- skladiščenje jeklene konstrukcije na gradbišču
- priprava za montažo jeklenih konstrukcij
 - izdelava odra
 - izdelava opor jeklene konstrukcije
- montaža jeklenih konstrukcij
 - kontrola konstrukcije na montaži

3.2 Kontrola varilskih del

Pri izdelavi in montaži rezervoarjev je varjenje posameznih elementov rezervoarja najbolj pomembno opravilo. Kontrola varilskih del poteka v splošnem pred pričetkom varjenja, med samim varjenjem in po končanih varilskih delih. Pred pričetkom del mora izvajalec predložiti ustrezno dokumentacijo za zagotovitev kvalitetne izvedbe zvarjenih spojev.

3.2.1 Napake v zvarjenih spojih

Napake v zvarih so lahko posledica uporabe neustrezne tehnologije varjenja, neustrezno izbranega dodatnega materiala, neustreznih parametrov varjenja ali neustrezne priprave zvarnega spoja.

V osnovi ločimo napake na površini in napake v zvaru. V zvarih se ne pojavi samo ena vrsta napake, najpogosteje se pojavijo kombinacije napak.

Najpogostejše napake so:

- plinski mehurji,
- oksidni vključki in nečistoče,
- razpoke.

Plinski mehurji:

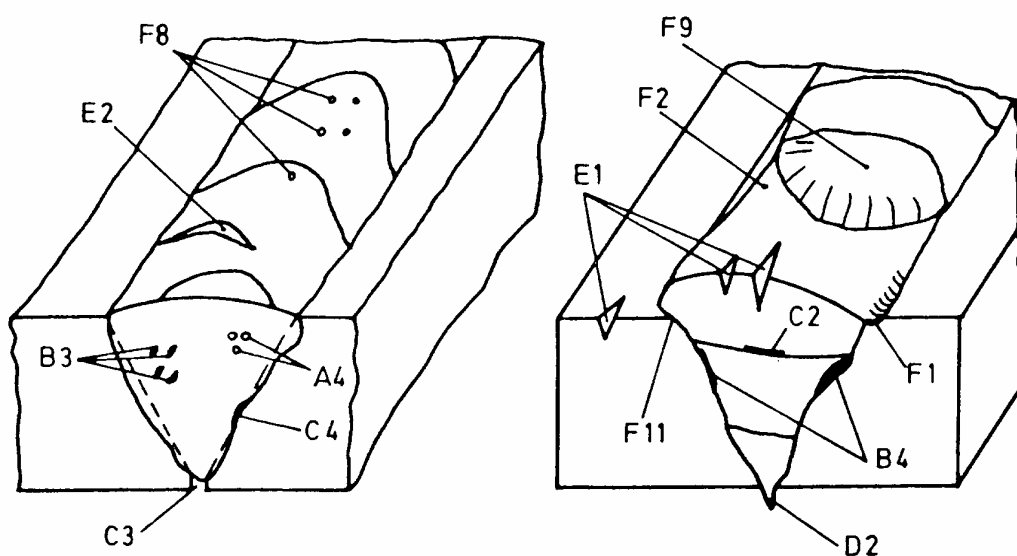
Plinski mehurji so napolnjeni s plinom, ki je ostal v varu pri strjevanju. Pojavijo se tako pri sočelnih zvarih kot pri kotnih zvarih. Pojavijo se zaradi nečistega osnovnega materiala (mastna ali zarjavela površina), vlažnih elektrod ali mehansko poškodovanih elektrod. Dovoljeno število in oblika plinskih mehurjev je odvisno od predpisane kvalitete zvarjenega spoja in njegove dolžine.

Oksidni vključki in nečistoče:

Nečistoče in oksidni vključki so nepravilne oblike. Te napake so lahko samostojne, večslojne ali skupinske. Njihova orientacija in velikost je različna. Pojavijo se lahko ob uporabi neustreznih elektrod ali ob neustrezno izbrani varilni tehnologiji. Vključki imajo ostre in nepravilne prehode.

Razpoke:

Razpoke so lahko makroskopske ali mikroskopske. Po orientaciji so lahko vzdolžne, prečne ali poljubne smeri. Razpoke se lahko pojavijo v notranjosti, na površini zvara ali v toplotno vplivanem področju zvarjenega spoja. Vzrok za njihov nastanek je neenakomerno segrevanje, neustrezni dodajni material ali pa napačna tehnologija varjenja. Pojavijo se lahko tudi pri varjenju debelejših materialov, če jih varimo pri nizkih temperaturah brez predgrevanja. Razpoke so najnevarnejše napake v zvaru, zato jih je vedno potrebno odstraniti z brušenjem. Najpogostejše napake v zvarjenih spojih so prikazane na *sliki 10*.



Slika 10: Možne napake v zvarjenih spojih

Oznake na sliki pomenijo:

A4	gnezdo por	E1	vzdolžne razpoke
B3	gnezdo žindre	E2	prečne razpoke
B4	žindra v vrsti	F1	obžig
C2	nespojena mesta med posameznimi varki	F2	vdolbljeno teme zvara
C3	neprevarjen koren	F8	pore na površini
C4	zlep	F9	žrelce na površini
D2	prekap zvara	F11	nadvišanje zvara

3.2.2 Neporušitvene preiskave zvarjenih spojev

Pri varjenju jeklenih konstrukcij je vedno potrebno preveriti ali so zvarjeni spoji brez napak in ali so takšne kvalitete kot so predpisane v projektu.

Za kontrolo zvarov se uporablja različne neporušitvene metode preiskave, pri čemer ima vsaka svoje prednosti in pomankljivosti. Izbira pravilne metode je pomembna za odkrivanje napak v zvarjenih spojih. Velik vpliv na kvaliteto zvarjenega spoja ima mikrostruktura materiala v toplotno vplivnem področju, ker je to običajno kritično mesto zvara.

Za kontrolo kvalitete izdelave zvarjenih spojev se največkrat uporabljajo naslednje vrste neporušitvenih preiskav:

- vizualna kontrola zvarov,
- penetrantska kontrola zvarov,
- radiografska kontrola zvarov,
- preizkus na neprepustnost – tesnostni preizkus (predvsem na rezervoarjih).

Splošne zahteve za neporušitvene preiskave so podane v standardu EN 25817.

3.2.2.1 Vizualna kontrola zvarov

Vizualna kontrola je najstarejša neporušitvena metoda preiskave materiala. Osnovni instrument za izvajanje pregleda je oko kontrolorja in primerna osvetlitev. Delimo jo na direktno in indirektno. Definicije obeh metod se od standarda do standarda razlikujejo. ASME Code opredeljuje direktno metodo kot pregled s prostimi očmi, dopušča pa še uporabo ogledala ali lupe. Z uporabo dodatnih pripomočkov postane vizualna kontrola indirektna. Evropski standardi opredeljujejo direktno metodo širše, tako spada v to skupino tudi uporaba boroskopov. Kot indirektna metoda pa se opredeljuje uporaba fotoaparatorov in videosistemov, ki omogočajo kasnejšo analizo posnetih površin ter uporaba avtomatizacije in robotike. Pripomočki v vizualni kontroli so lahko enostavni kot npr. lupe, ogledala in razni merilni instrumenti kot so ravnila, različna mehanska pomična merila, posebna merila za zware itn. Instrumenti za merjenja pa so lahko tudi na visokem tehnološkem nivoju:

boroskopi, endoskopi, kamere, mikroskopi in daljinsko vodeni manipulatorji z vgrajeno kamero.

Vizualna kontrola zvarjenih spojev zajema:

- kontrola priprave zvarnega robu,
- kontrola med varjenjem,
- kontrola po varjenju.

Pri kontroli priprave zvarnega robu je potrebno preveriti:

- obliko in mere zvarnih robov, ki morajo ustrezati zahtevam iz varilnega postopka oziroma projektne dokumentacije,
- pripravo površine (čistost, odprašenost, razmaščenost, predgrevanje),
- da so elementi konstrukcije poravnani tako, da ne vplivajo na pojav varilskih napak.

Pri kontroli, ki se izvaja med varjenjem je potrebno preveriti:

- da je spenjanje elementov izvedeno po navodilih, načrtih oziroma po ustrezni specifikaciji varilnega postopka, tako da dimenzijsko ustrezajo zahtevam,
- čiščenje površine med varki,
- da med varjenjem ni vidnih nobenih napak,
- sanacijo napak opaženih med varjenjem,
- uporabo ustrezne opreme za varjenje,
- izvedbo sanacije neustrezno zvarjenih spojev (brušenje in ponovno varjenje)

Po varjenju pa je potrebno preveriti:

- čistost površine zvarjenega spoja,
- geometrijo zvarjenega spoja (nadvišenje, globino zajed, višino korena) ter
- toplotno obdelavo (v primeru zahteve).

Zahteve za vizualno kontrolo zvarov so podane v naslednjih standardih:

- ISO 3058
- EN 970
- EN 13018
- EN 13927

3.2.2.2 Penetrantska kontrola zvarov

Metoda temelji na prodiranju obarvane tekočine (penetranta) z majhno površinsko napetostjo v napake na površini preiskovanega izdelka. Metoda je uporabna le takrat, ko so napake proti površini odprte. Po določenem času se penetrant odstrani s površine in ga iz napak aktiviramo z belim razvijalcem. Razvijalec zaradi kapilarnega učinka posrka penetrant iz razpoke ter s tem ustvari dobro viden kontrast indikacije napake na površini. Tako dobimo rdečo indikacijo na beli osnovi. Glede na intenzivnost obarvanja lahko sodimo o globini napake.

Pri preiskavi na terenu je potrebno upoštevati vremenske pogoje, ki jih določa proizvajalec penetrantov.

Postopek preiskave s tekočimi penetranti je naslednji:

- Preveriti je potrebno atmosferske pogoje – temperatura zraka med preiskavo mora biti med 5 °C in 50 °C.
- Čiščenje površine – mehansko, kemično, razmaščevanje z organskimi topili
- Nanašanje penetranta je lahko:
 - z nabrizgavanjem,
 - s čopičem,
 - z omakanjem.
- Pronicanje penetranta je običajno okoli 15 minut.
- Čiščenje površine je lahko:
 - spiranje z vodo,
 - čiščenje s suho krpo,
 - uporaba posebnega čistila in suhe krpe.

- Nanašanje razvijalca:
 - suhe razvijalce se nanaša elektrostatično,
 - mokre razvijalce se nanaša s pršilno dozo.
- Razvijanje indikacij napak je običajno okoli 15 minut.
- Indikacija napak:
 - pri obarvanih (rdečih) penetrantih se opazuje barvni madež (indikacijo) na belem ovoju (razvijalcu),
 - pri fluorescentnih penetrantih se opazuje indikacije z ultravijolično svetlobo.
- Čiščenje površine – s površine se odstrani vse ostanke penetranta in razvijalca.

Prednosti uporabe tekočih penetrantov so možnost kontrole velikih površin, preprosta tehnologija kontrole ter istočasno prikazovanje rezultatov. Slabosti so predhodno odstranjevanje različnih površinskih zaščit in daljši čas preiskave. Na *sliki 11* je prikazan komplet za penetrantsko kontrolo.



Slika 11: Komplet za penetrantsko kontrolo (čistilo, penetrant in razvijalec)

Zahteve za penetrantsko kontrolo zvarov so podane v naslednjih standardih:

- EN ISO 3059
- EN 571-1
- EN 1289

3.2.2.3 Radiografska kontrola zvarov

Velik del radiografskih pregledov se opravi na zvarjenih spojih, ker je varjenje tehnološki proces, ki je precej občutljiv na pojavljanje različnih vrst napak, po drugi strani pa se zvarjeni spoji pogosto nahajajo v močno obremenjenih delih konstrukcij.

Rentgensko (X) in gama (γ) sevanje prodira skozi preizkušane in se oslabi v odvisnosti od debeline materiala skozi katerega je prodrlo. Na mestih, kjer je v materialu praznina ali pa je gostota materiala manjša, preide skozi material večja količina sevanja, kar se pozna na filmu. Pri presevanju je v uporabi točkasti izvor, zato je vsak posneti radiogram centralna projekcija napake. Povečava, ki pri tem nastane, je zanemarljiva. V temnici razviti film je radiogram. Vsak radiogram mora zadovoljiti osnovnim zahtevam predpisov. Po razvitju filma v temnici sledi ovrednotenje radiograma. Ovrednotenje pomeni preverjanje ali ima radiogram:

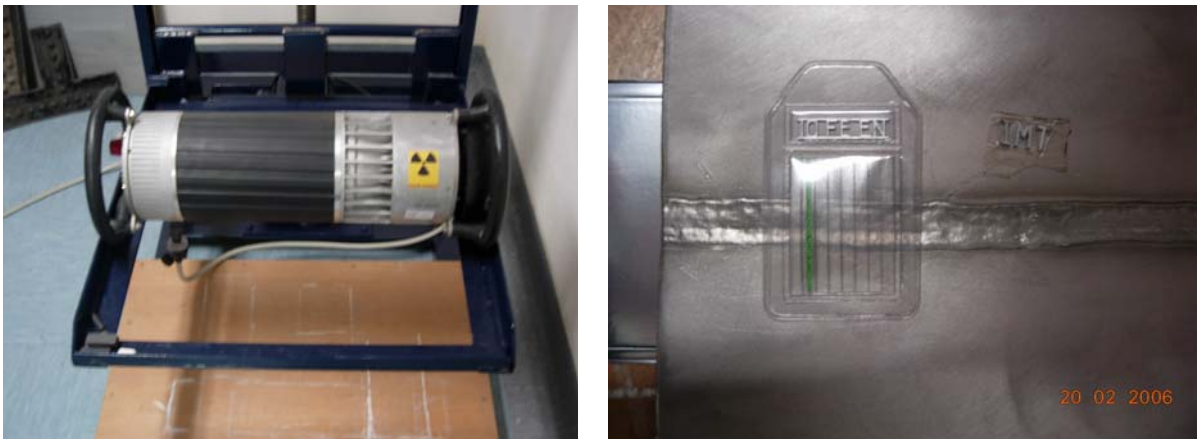
- zaporedno številko,
- ustrezní indikator kakovosti (IKS) slike (žični, stopničasti indikator),
- ustrezno optično gostoto (počrnitev) $D > 2.0$,
- lažne indikacije, ki lahko nastanejo zaradi nepravilnega ravnanja s filmom pred presevanjem, med in po razvitju.

Ovrednotenju radiograma sledi izrednotenje. Izrednotenje radiograma pomeni identifikacijo napak v zvaru. Pojavijo se svetli in temni detajli. Svetli detajli so nadvišenja varov, navarki, rebra v odlitkih predmetov, ki so postavljeni na presevanec, IKS, barvni premazi, ki vsebujejo težke kovine. Temni detajli so vdolbine (žlebovi, izvrtine, površinske neprepustnosti (obžigi, zajede, zareze), notranje napake (pore, žindra, livarski pesek, lunke, razpoke). Najbolj tipične napake odkrite z radiografijo so naslednje:

- okrogle pore – temni oglati detajli, od enega do nekaj milimetrov premera,
- črvičaste pore – temni podolgovati na koncih zaokroženi detajli,
- vključki žindre – temni detajli neenakomerne oblike,
- nespojena mesta – podolgovati detajli, vzporedni z osjo zvara in nekoliko odmaknjeni od roba zvara,

- neprevarjen koren zvara – podolgovat detajl vzporeden z osjo zvara in poteka po sredini slike zvara,
- razpoke – večinoma ozek cikcakast detajl, lahko pa zelo ravna temna linija,
- obrobne zajede – nazobčan linijski detajl, ki se lahko razširi, lahko je prekinjen,
- napake na osnovnem materialu, ki so lahko zareze, zabrušena mesta, obžigi, obrizgi, efekti korozije – detajli so zaradi oblike lahko prepoznavni in jih opazimo pri vizualnem pregledu.

Slika 12 prikazuje industrijski rentgenski aparat.



Slika 12: Rentgenski aparat ter varilni etalon pripravljen za radiografsko preiskavo

Zahteve za radiografsko kontrolo zvarov so podane v naslednjih standardih:

- EN 444
- EN 1435
- EN 12517
- EN 13068-3

3.2.2.4 Kontrola tesnosti zvarov

Ena od metod preizkušanja tesnosti zvarov je preizkus z mehurčki. Pri tem preizkusu ni izmerjene vrednosti, temveč samo kvalitativna vrednost. Govori se torej o DA/NE izjavi – puščanje ali tesnost. Največja prednost preizkusa z mehurčki je v tem, da se lahko natančno določi mesto netesnosti.

Obstajata dva osnovna načina preizkusa z mehurčki:

- nadtlačna tehnika in
- vakuumska tehnika (vakuumski poveznik).

Nadtlačna tehnika je uporabna samo pri zaprtih posodah, ki lahko zadržijo določen tlak. Puščanje posode mora dopuščati takšno vrednost, da se lahko posodo natlači na določen tlak. Natlačen preizkusni plin prodira skozi luknjo navzven (atmosferski tlak), katerega se lahko s pomočjo preizkusne tekočine odkrije na površini posode.

Z vakuumsko tehniko se lahko preizkuša tudi objekte, ki ne morejo zadrževati tlaka. Razliko tlaka se dobi na preizkušani strani objekta s podtlakom (vakuumom) na določenem področju s pomočjo poveznika, kjer se puščanje opazuje preko okna. Zrak je vsesan zaradi vakuuma skozi netesno mesto preko preizkusne tekočine na površino, ki je opazovana s poveznikom, prikazanim na *sliki 13*.

Ker vakuumski poveznik ni prilagodljiv, se mora njegovo geometrijo vedno prilagoditi preizkušancu. Zato je potrebno izdelati poveznik za vsak preizkus posebej, možno pa je kupiti nekatere standarne poveznike za ukrivljene površine, za kotne ali ravne zware.

Zahteve za kontrolo tesnosti zvarov so podane v standardu EN 1593.



Slika 13: Vakuumska črpalka ter vakuumski poveznik za kotne zware

3.3 Geometrijska odstopanja pri izdelavi in montaži

Predpisi

Tolerance pri izdelavi in montaži rezervoarja so določene v standardu ENV 1993-1-6 ter standardu API 650.

Lokalno odstopanje plašča pri montaži

Tolerance pri montaži morajo biti v skladu s tolerancami katere so predpisane s standardi za skladiščne rezervoarje. Standard ENV 1993-1-6 za lokalno odstopanje plašča rezervoarja predpisuje 3 kvalitetne razrede (*preglednica 5*).

Preglednica 5: Kvalitetni razredi po standardu ENV 1993-1-6

<i>Kvalitetni razred</i>	<i>Izvedena kvaliteta</i>
Razred A	Odlična
Razred B	Zelo dobra
Razred C	Normalna

Lokalno odstopanje v meridialni (aksialni) smeri:

Dolžina šablone:

$$l_{gx} = 4 \cdot \sqrt{r \cdot t} \quad (3.1)$$

Dolžina šablone (RF-8):

$$l_{gx} = 4 \cdot \sqrt{5500 \cdot 7} = 785 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Dovoljena odstopanja:

$$U_{0x} = \frac{w_{0x}}{l_{gx}}, U_{0x} \leq U_{0,\max} \quad (3.3)$$

Preglednica 6: Dovoljena odstopanja v meridialni smeri za posamezne kvalitetne razrede

Kvalitetni razred	$U_{0,\max}$	w_{0x}	w_{0x} (RF-8)
Razred A	0,006	$w_{0x} = l_{gx} \cdot U_{0,\max}$	4, 70 mm
Razred B	0,010	$w_{0x} = l_{gx} \cdot U_{0,\max}$	7,85 mm
Razred C	0,016	$w_{0x} = l_{gx} \cdot U_{0,\max}$	12,50 mm

Kjer pomeni:

l_{gx} dolžina kontrolirne šablone

r polmer rezervoarja

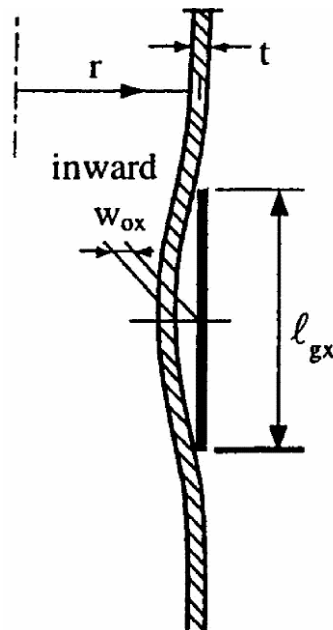
t debelina pločevine rezervoarja

U_{0x} parameter izvedene kvalitete

$U_{0,\max}$ parameter kvalitete za posamezen razred

w_{0x} dovoljeno odstopanje geometrije od kontrolirne šablone

Slika 14 prikazuje lokalno odstopanje plašča rezervoarja v meridialni smeri



Slika 14: Lokalno odstopanje plašča rezervoarja v meridialni (aksialni) smeri

Lokalno odstopanje v obodni smeri:

Lokalno odstopanje plašča v radialni smeri se kontrolira s šablono, ki ima polmer krivulje enak polmeru plašča. Kontrola se vrši po končanem varjenju vsakega posameznega pasu po cellem obsegu plašča.

Dolžina šablone:

$$l_{g\theta} = 2,3 \cdot \sqrt[4]{l^2 \cdot r \cdot t} \leq r \quad (3.4)$$

Dolžina šablone (RF-8):

$$l_{g\theta} = 2,3 \cdot \sqrt[4]{(8200\text{mm})^2 \cdot 5500\text{mm} \cdot 7\text{mm}} = 2918\text{mm} \leq 5500\text{mm} \quad (3.5)$$

Dovoljena odstopanja:

$$U_{0\theta} = \frac{w_{0\theta}}{l_{g\theta}} \quad , \quad U_{0\theta} \leq U_{0,\text{max}} \quad (3.6)$$

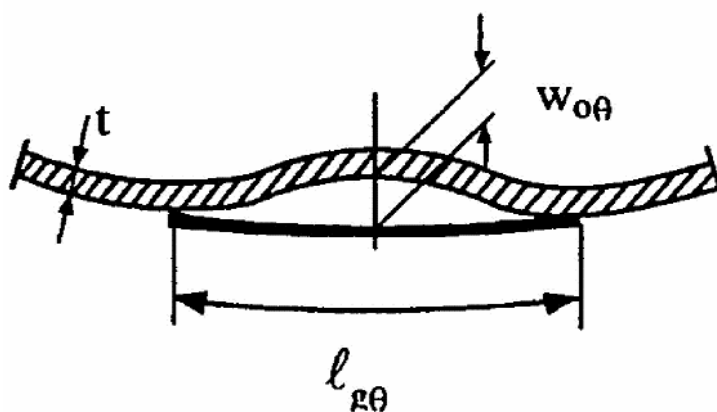
Preglednica 7: Dovoljena odstopanja v obodni smeri za posamezne kvalitetne razrede

<i>Kvalitetni razred</i>	$U_{0,max}$	$w_{0\theta}$	$w_{0\theta}$ (RF-8)
Razred A	0,006	$w_{0\theta} = l_{g\theta} \cdot U_{0,max}$	17,50 mm
Razred B	0,010	$w_{0\theta} = l_{g\theta} \cdot U_{0,max}$	29,18 mm
Razred C	0,016	$w_{0\theta} = l_{g\theta} \cdot U_{0,max}$	46,68 mm

Kjer pomeni:

l_{gx}	<i>dolžina kontrolirne šablone</i>
l	<i>višina celotnega ovoja rezervoarja</i>
r	<i>polmer rezervoarja</i>
t	<i>debelina pločevine rezervoarja</i>
$U_{0\theta}$	<i>parameter izvedene kvalitete</i>
$U_{0,max}$	<i>parameter kvalitete za posamezen razred</i>
$w_{0\theta}$	<i>dovoljeno odstopanje geometrije od kontrolirne šablone</i>

Slika 15 prikazuje lokalno odstopanje plašča rezervoarja v obodni smeri.



Slika 15: Lokalno odstopanje plašča rezervoarja v obodni smeri

Lokalno odstopanje v področju vertikalnih in horizontalnih zvarov:

Dolžina šablone:

$$l_{gw} = 25 \cdot t_{\min} \leq 500 \text{ mm} \quad (3.7)$$

Dolžina šablone (RF-8):

$$l_{gw} = 25 \cdot 7 \text{ mm} = 175 \text{ mm} \leq 500 \text{ mm} \quad (3.8)$$

Dovoljena odstopanja:

$$U_{0w} = \frac{w_{0w}}{l_{gw}}, \quad U_{0w} \leq U_{0,\max} \quad (3.9)$$

Preglednica 8: Dovoljena odstopanja v področju zvarov za posamezne kvalitetne razrede

Kvalitetni razred	$U_{0,\max}$	w_{0w}	w_{0w} (RF-8)
Razred A	0,006	$w_{0w} = l_{gw} \cdot U_{0,\max}$	1,05 mm
Razred B	0,010	$w_{0w} = l_{gw} \cdot U_{0,\max}$	1,75 mm
Razred C	0,016	$w_{0w} = l_{gw} \cdot U_{0,\max}$	2,80 mm

Kjer pomeni:

l_{gw} dolžina kontrolirne šablone

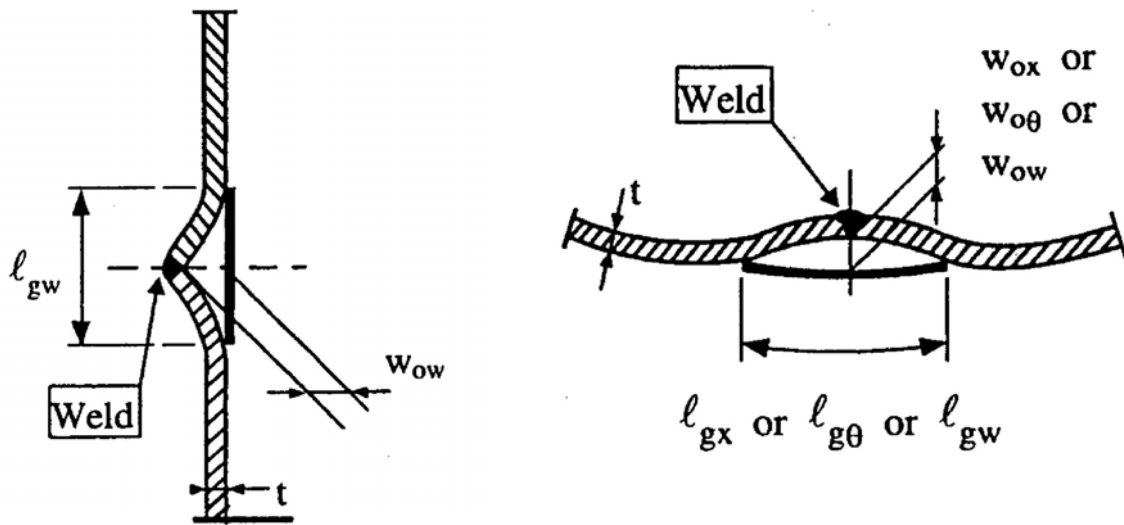
t_{\min} debelina tanjše pločevine na zvarnem spoju rezervoarja

U_{0w} parameter izvedene kvalitete

$U_{0,\max}$ parameter kvalitete za posamezen razred

w_{0w} dovoljeno odstopanje geometrije od kontrolirne šablone

Slika 16 prikazuje lokalno odstopanje plašča v področju zvarov.

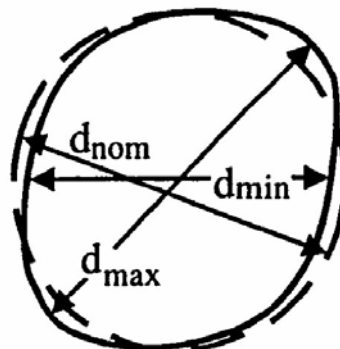


Slika 16: Lokalno odstopanje plašča rezervoarja v področju vertikalnih in horizontalnih zvarov

Merjenje se izvaja pri horizontalnih zvarih na vsake 3 m oziroma na vseh mestih, kjer so opažene deformacije. Vertikalne zve se kontrolira na 3 mestih – zgoraj, spodaj in v sredini.

Odstopanje premera plašča

Odstopanje premera plašča od popolne okroglosti prikazuje *slika 17*. Za odstopanje premera plašča rezervoarja od popolne okroglosti standard ENV 1993-1-6 prav tako podaja tri kvalitetne razrede.



Slika 17: Odstopanje premera plašča od popolne okroglosti

$$U_R = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}}, \quad U_{R,\max} \leq U_R \quad (3.10)$$

Preglednica 9: Dovoljena odstopanja rezervoarja od popolne okroglosti za posamezne kvalitete razrede

<i>Kvalitetni razred</i>	$U_{R,\max}$	<i>Dovoljeno odstopanje od popolne okroglosti (RF-8)</i>
Razred A	0,007	$\pm 38,5$ mm
Razred B	0,010	± 55 mm
Razred C	0,015	$\pm 82,5$ mm

Uporabljeni izrazi pomenijo:

d_{nom}	<i>nazivni premer rezervoarja</i>
d_{min}	<i>minimalni notranji premer rezervoarja</i>
d_{max}	<i>maksimalni notranji premer rezervoarja</i>
U_R	<i>parameter izvedene kvalitete</i>
$U_{R,\max}$	<i>parameter kvalitete za posamezen razred</i>

Odstopanja pločevin v zvarjenih stikih

Za odstopanje pločevin enakih debelin v zvarjenih stikih standard ENV 1993-1-6 podaja maksimalne dopustne zamaknjenosti pločevin (*preglednica 10*).

Preglednica 10: Maksimalna dopustna zamaknjenost pločevin v zavarjenih stikih

<i>Kvalitetni razred</i>	<i>Maksimalna dopustna zamaknjenost pločevin</i>
Razred A	$e_a \leq 2\text{mm}$
Razred B	$e_a \leq 3\text{mm}$
Razred C	$e_a \leq 4\text{mm}$

Dimenzije

Dolžina obdelanih pločevin za izdelavo plašča sme odstopati $\pm 1,6$ mm, širina pa $\pm 0,8$ mm. Pravokotnost obdelanih plošč se določa z merjenjem diagonal. Na ploščo se nariše okvir, katerega stranice so oddaljene 50 mm od roba. Razlika dolžin diagonal tega okvirja mora biti manjša ali enaka 3 mm.

Vertikalnost plašča

Vertikalnost se kontrolira s svinčnico po končanem varjenju vsakega posameznega pasu in to na vsakih 10 m. Odstopanja ne smejo preseči vrednosti valjarniške tolerance. Odstopanje vrha plašča v odnosu na dno ne sme biti večje od ± 80 mm. Os rezervoarja ne sme od vertikale odstopati več kot 2 % od premera rezervoarja.

3.4 Hidrostatični preizkus

S hidrostatičnim preizkusom se preverja neprepustnost in stabilnost plašča rezervoarja, usedanje temeljev ter funkcionalnost opreme rezervoarja. Rezervoar se običajno napolni do maksimalne višine polnjenja medija. Postopek hidrostatičnega preizkusa je določen v projektu, običajno pa poteka takole:

- polnjenje z vodo do 1/3 rezervoarja in zadrževanje ter izvedba meritve posedanja temelja na vgrajenih reperjih,
- polnjenje z vodo do 2/3 rezervoarja in zadrževanje ter izvedba meritve posedanja temelja na vgrajenih reperjih,
- polnjenje z vodo do maksimalne višine rezervoarja in zadrževanje ter izvedba meritve posedanja temelja na vgrajenih reperjih,
- praznjenje rezervoarja do višine 2/3 in zadrževanje ter izvedba meritve posedanja temelja na vgrajenih reperjih,
- praznjenje rezervoarja do višine 1/3 in zadrževanje ter izvedba meritve posedanja temelja na vgrajenih reperjih,
- popolno praznjenje rezervoarja in meritev posedanja temelja na vgrajenih reperjih.

V primeru zahtevnega terena (slaba nosilnost tal) se izvede polnjenje in praznjenje rezervoarja po četrtinah.

Poleg meritev posedanja temelja se med hidrostatičnim preizkusom kontrolira še neprepustnost plašča in v primeru, da se pojavi puščanje rezervoarja, je potrebno vodo takoj izprazniti do najmanj 30 cm pod ugotovljeno napako ter to napako nemudoma sanirati. Če pride do izpiranja materiala temelja mora biti izvedeno popravilo temelja.

3.5 Protikorozijska zaščita

3.5.1 Rezervoarji iz konstrukcijskega jekla

Cilj projektiranja sleherne jeklene konstrukcije je funkcionalnost, stabilnost ter primerna življenjska doba proti primernim stroškom izdelave, uporabe in vzdrževanja. Protikorozijska zaščita kovinskih izdelkov, konstrukcij in razne opreme temelji na ustvarjanju pregrade, ki preprečuje dostop korodirnega medija do kovine. Poznamo več vrst protikorozijske zaščite, med glavne pa sodijo:

- kovinske prevleke,
- oksidne prevleke,
- organske prevleke ter
- anorganske prevleke.

Rezervoarji iz konstrukcijskega jekla so običajno zaščiteni z organskimi premazi. Namen premaznega sredstva ni le protikorozijska zaščita, ampak pogosto daje tudi lepši videz kovinskim izdelkom. V osnovi ločimo osnovni in pokrivni premaz. Osnovni premaz je v celotnem sistemu protikorozijske zaščite najpomembnejši, saj je v neposrednem stiku s kovino. Osnovni premaz ščiti kovino pred korozijo. Vloga pokrivnega premaza pa je zaščita kovine pred atmosferskimi vplivi ter potrebna mehanska in obrabna odpornost. Primer protikorozijske zaščite rezervoarja iz konstrukcijskega jekla je prikazan na *sliki 18*.



Slika 18: Rezervoar prostornine 60.000 m³ na Serminu pri Kopru

3.5.2 Rezervoarji iz nerjavnega jekla

Tudi rezervoarji iz nerjavnih jekel so kljub imenu »nerjavni« podvrženi določenim vrstam korozije. Glavne oblike korozije nerjavnih jekel so:

- jamičasta korozija,
- interkristalna korozija ter
- napetostna korozija.

Zaščita nerjavnih jekel proti koroziji se močno razlikuje od zaščite konstrukcijskih jekel. Nerjavna jekla se korozijsko zaščitijo z ustvarjanjem pasivnih filmov na površini jekla. Korozijska odpornost pasivnega filma je odvisna od vrste korodirnega medija in vrste nerjavnega jekla. Krom izboljšuje stabilnost pasivnega filma, molibden in krom izboljšujeta korozijsko odpornost v kloridnih medijih, nikelj pa izboljšuje odpornost nerjavnih jekel v

močnih kislinah. Na splošno velja, da so feritna (Cr) jekla manj odporna kot avstenitna (CrNi), slednja pa slabša kot (CrNiMo).

Priprava površine je eden od pomembnejših dejavnikov pri tvorbi pasivnih filmov. Fino brušene in polirane površine omogočajo tvorbo bolj homogenih pasivnih filmov kot grobe ter s tem bistveno boljše protikorozijsko zaščito.

3.6 Dokumentacija o kontroli izdelave in montaže

Podjetje, ki gradi rezervoar mora pred pričetkom varilskih del predati nadzornemu organu in investitorju naslednje:

- terminski plan izvedbe del,
- plan izvedbe neporušitvenih preiskav,
- potrdilo o kvalifikaciji postopka varjenja,
- potrdilo o izvršeni kvalifikaciji varilcev,
- potrdilo o kvaliteti osnovnega in dodajnega materiala,
- potrdilo o usposobljenosti izvajalca za opravljanje varilskih del.

Po opravljeni montaži rezervoarja pa je potrebno predložiti:

- varilske dnevnikne,
- zapisnik o geometrijski kontroli,
- poročila o izvedenih neporušitvenih preiskavah,
- zapisnik o izvedbi hidrostatičnega preizkusa,
- poročilo o izvedeni protikorozijski zaščiti rezervoarja.

4.0 KONTROLA IZDELAVE REZERVOARJA RF - 8

Luka Koper d.d. je investitor gradnje novega rezervoarja za fosforno kislino na terminalu tekočih kemikalij. Projektno dokumentacijo je izdelal Inštitut za vode Republike Slovenije. Rezervoar je izdelala in montirala Nafta Strojna d.o.o. iz Lendave.

4.1 Kontrola osnovnega materiala

Nafta Strojna je predložila v pregled potrdila o kvaliteti uporabljenega materiala. Za kontrolo je bil odvzet vzorec osnovnega materiala, na katerem so bile opravljene naslednje preiskave:

- merjenje udarne žilavosti po Charpy-ju,
- metalografski pregled materiala,
- kemična analiza,
- meritev δ -ferita.

Merjenje udarne žilavosti osnovnega materiala

Izbrano nerjavno jeklo ima dobro žilavost, vendar je potrebno omeniti, da se mehanske lastnosti kovin spreminjajo s temperaturo, zato je težko govoriti o absolutno krhkem ali absolutno žilavem materialu. S Charpy-jevim preizkusom udarne žilavosti določimo odpornost materiala proti krhkemu lomu. Preizkus poteka tako, da se kladivo dvigne do začetne lege (*slika 19*) in se ga nato spusti, da le-to zaniha. Pri tem kladivo udari ob preizkušanelec in doseže končno lego, ki je nižja od začetne. Razlika med začetno in končno lego nastane na račun porabljene energije za prelom preizkušancea. Meja pri kateri je udarna žilavost po Charpy-ju pozitivna, je 27 J.

Iz osnovnega materiala so bili izdelani trije preizkušanci z „V“ zarezo za preizkušanje udarne žilavosti na Charpy-jevem kladivu. Standardna dimenzija preizkušancev je 10x10x55 mm z „V“ zarezo globoko 2 mm. Naši preizkušanci pa so bili zaradi tanjše pločevine, ki se uporablja za rezervoar, nestandardnih dimenzij in sicer 7x10x55 mm. Zato je bila pri določanju udarne žilavosti potrebna korekcija glede površine prelomne ploskve. Glede na

pogoje, pri katerih bo rezervoar obratoval, se je preizkušanje izvajalo pri temperaturi +20 °C. Rezultati merjenja udarne žilavosti osnovnega materiala so podani v *preglednici 11*.



Slika 19: Inštrumentirano Charpy-jevo kladivo za merjenje udarne žilavosti na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije v Ljubljani

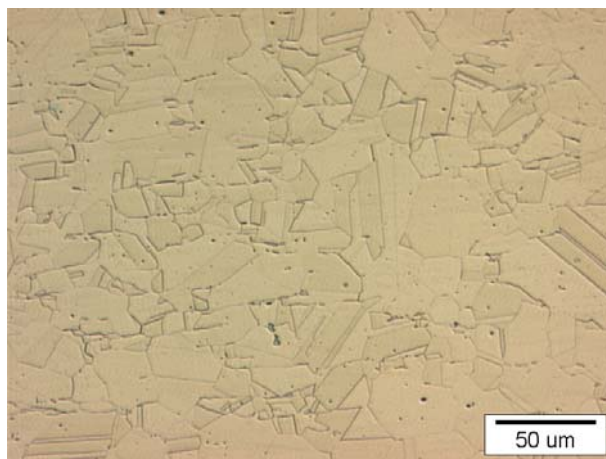
Preglednica 11: Rezultati merjenja udarne žilavosti osnovnega materiala po Charpy-ju

<i>Oznaka preizkušanca</i>	<i>Temperatura preizkušanja [°C]</i>	<i>Žilavost [J]</i>
OM 1	+20	208
OM 2	+20	204
OM 3	+20	194

Iz preglednice je razvidno, da je osnovni material pri sobni temperaturi dosegel dobro žilavost.

Metalografski pregled osnovnega materiala

Odvzet je bil tudi vzorec za metalografski pregled osnovnega materiala, ki je bil pregledan na optičnem mikroskopu. Mikrostrukturo osnovnega materiala prikazuje *slika 20*. Na sliki je lepo vidna avstenitna mikrostruktura jekla, kjer posamezne razpotegnjene črte predstavljajo zrna δ -ferita.



Slika 20: Mikrostruktura osnovnega materiala

Kemična analiza osnovnega materiala

Opravljen je bila tudi kemična analiza osnovnega materiala. Vsebnost posameznih legirnih elementov je podana v *preglednici 12*, iz katere je razvidno, da kemična sestava ustreza zahtevam standarda za jeklo 316 L.

Preglednica 12: Izmerjen delež legirnih elementov v jeklu v ut. %

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>
0,020	0,51	0,96	0,003	0,032	17	10,3	2,0

Meritev δ -ferita v osnovnem materialu

Na osnovnem materialu je bila na 24 mestih izvedena meritev δ -ferita. Rezultati meritve so podani v *preglednici 13*. Povprečna izmerjena vsebnost δ -ferita v osnovnem materialu je 0,78%, kar ustreza kemični sestavi nerjavne pločevine.

Preglednica 13: Vsebnost δ -ferita v osnovnem materialu

<i>Meritve δ-ferita v osnovnem materialu v %</i>											
0,86	0,73	0,73	0,83	0,80	0,70	0,66	0,76	0,87	0,85	0,86	0,77
0,75	0,61	0,74	0,67	0,89	0,82	0,79	0,78	0,83	0,83	0,67	0,93

4.2 Korozijska obstojnost osnovnega materiala

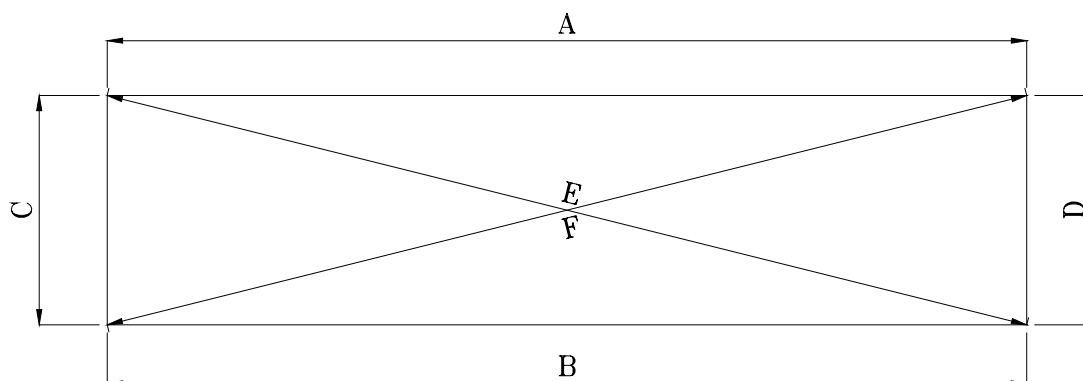
Korozijska obstojnost nerjavne pločevine kvalitete 316 L na 93 % fosforno kislino je preveril laboratorij za korozijo na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo v Mariboru. Fosforna kislina H_3PO_4 je brezbarvna, rahlo viskozna tekočina, ki jo lahko redčimo. Ima zmrzišče pri 27 °C in gostoto 1,791 g/ml pri 25 °C.

Korozijska obstojnost je bila določena za hrapavost $RA = 0,6 - 0,9$ in $RA = 1,5 - 2,0$. Iz rezultatov je razvidno, da je nerjavno jeklo 316 L v fosforni kislini dokaj odporno pri hrapavosti $RA = 0,6 - 0,9$, kar kaže tudi relativno nizka korozijska hitrost, ki znaša 0,12 mm/leto. Korozijska hitrost se znatno poveša pri hrapavosti $RA = 1,5 - 2,0$ in znaša 0,31 mm/leto. Podatek v literaturi navaja za jeklo 316 L korozijsko hitrost $\leq 0,11$ mm/leto. Izračunane vrednosti so malo višje od vrednosti podanih v literaturi, ker je bila za testiranje uporabljena pospešena kemijska reakcija kot posledica uporabljene elektrokemijske merilne metode.

Projektant je pri izračunu debeline plašča rezervoarja upošteval 0,5 mm korozijskega dodatka, izvajalec Nafta Strojna pa je zagotovil, da je bilo nerjavno jeklo gladko polirano s hrapavostjo $RA = 0,6 - 0,9$. Zunanjo površino rezervoarja je izvajalec poliral z diamantno pasto „antox“, notranjost rezervoarja pa je poleg poliranja zvarnih spojev še premazana z dušično kislino, ki je povzročila, da je notranjost rezervoarja prekrita s tanko plastjo zaščitne pasivne plasti.

4.3 Dimenzijska kontrola obdelave pločevin

V delavnici Naftne Strojne je bila opravljena dimenzijska kontrola pločevin. Ker je bila kontrola opravljena po krojenju pločevin, ni bil risan okvir, oddaljen 5 cm od roba pločevine kot to zahteva standard API 650. Opravljeno meritev prikazuje *slika 21*. Rezultati dimenzijske kontrole pločevin drugega ovoja rezervoarja so podani v *preglednici 14*.



Slika 21: Dimenzijska kontrola pločevin

V *preglednici 14* so prikazani rezultati dimenzijske kontrole pločevin drugega ovoja rezervoarja RF-8.

Preglednica 14: Dimenzijska kontrola pločevin drugega ovoja rezervoarja RF-8

Oznaka plošče	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]
1/2	5999	6000	1499	1499	6184	6183
2/2	6000	5999	1500	1501	6184	6185
3/2	6001	6001	1499	1499	6186	6186
4/2	6000	6000	1500	1500	6185	6185
5/2	6001	6000	1500	1499	6185	6186
6/2	4799	4799	1500	1500	5028	5028

Iz rezultatov dimenzijske kontrole pločevin drugega ovoja rezervoarja je razvidno, da so dimenzije pločevin po obdelavi v skladu z zahtevami projekta in standarda API 650.

4.4 Pregled dokumentacije za zagotovitev kvalitete izdelave

Nafta Strojna je predložila v pregled naslednjo dokumentacijo:

- plan kontrole izdelave rezervoarja v delavnici,
- potrdilo o kvaliteti osnovnega materiala,
- potrdila o periodičnih preizkušnjah varilcev,
- potrdilo o kvalifikaciji postopka varjenja,
- merilne protokole za pločevine.

Predloženi dokumenti so bili izdelani v skladu z zahtevami navedenimi v projektu.

5.0 KONTROLA MONTAŽE REZERVOARJA RF - 8

5.1 Sestava rezervoarja

Sestava plašča:

Plašč rezervoarja je sestavljen iz petih ovojev višine 1500 mm in šestega ovoja višine 700 mm. Vsak ovoj je sestavljen iz petih pločevin dolžine 6000 mm in prilagoditvene pločevine. Vse debeline pločevin plašča znašajo 7 mm.

Zaradi pomanjkanja prostora na gradbišču (*slika 22*) se je montaža plašča začela s petim ovojem višine 1500 mm. Ves postopek montaže je potekal na tleh. Pločevine so se med seboj spenjale po vertikalah s spenjalnimi varki po polavtomatskem postopku MAG z varilno žico v zaščiti plina Ar + 8 % CO₂. Po končanem varjenju vertikal petega ovoja in končani dimenzijski kontroli premera petega ovoja z merilnim trakom se je pristopilo k sestavi naslednjih ovojev. Pri sestavi naslednjega šestega ovoja plašča (višine 700 mm) so se pločevine zlagale na podložne ploščice petega ovoja. Za postavitev vertikalnih robov posameznih plošč z robovi plošč z nižjega ovoja v isto ravnino so se uporabljale plastične pritrdilne zagozde. Sledilo je varjenje radialnega zvara med petim in šestim ovojem. S pomočjo dvigala se je dvignilo streho na šesti ovoj, nato se je zavaril radialni zvarni spoj med šestim ovojem in streho. Na peti ovoj se je z zunanje strani zavarilo nosilce podpornih stebrov, avtodvigalo pa je dvignilo peti in šesti ovoj ter streho na višino 1520 mm. Ko so bili podporni stebri nameščeni, se je pričelo z montažo četrtega ovoja. Pri varjenju vertikalnih zvarnih spojev posamezni ovoj plašča rezervoarja ni smel biti radialno pritrjen. Šele, ko so bili zavarjeni vsi vertikalni zvarni spoji se je lahko pristopilo k varjenju radialnih zvarnih spojev. Ves postopek sestave, montaže, meritev in dvigovanja se je ponovil še za ostale ovoje. Pred montažo prvega ovoja rezervoarja se je s pomočjo dveh avtodvigal dvignilo celoten rezervoar in odstranilo pomožno zvezdasto konstrukcijo s podpornimi stebri. Pri montaži prvega ovoja se ni montiralo enega kosa pločevine, ker je le-to služilo kot vhodna odprtina za gradbena dela, dela za montažo ogrevalnega sistema v temelju rezervoarja in vgradnji dna rezervoarja.



Slika 22: Lokacija rezervoarja RF-8 na terminalu tekočih kemikalij

Potek gradnje rezervoarja je razviden iz *slik 23, 24 in 25.*



Slika 23: Gradnja rezervoarja – dvigovanje petega in šestega ovoja ter strehe



Slika 24: Gradnja rezervoarja – namestitev podpornih stebrov



Slika 25: Gradnja rezervoarja – dvigovanje četrtega, petega in šestega ovoja ter strehe za namestitev podpornih stebrov

Sestava strehe rezervoarja:

Streha rezervoarja je samonosilni konus membranskega tipa iz pločevin 316 L dimenzij 7x1431x4391 mm. Po natančni sestavi pločevin se je pričelo varjenje strehe. Po končanem varjenju so se na zunanjo stran strehe privarili ojačitveni kotniki.



Slika 26: Streha rezervoarja

Sestava dna rezervoarja:

V temelj rezervoarja se je najprej vgradilo izolacijo, sledila je plast nagibnega betona ter mreža, na katero se je namestilo 730 m grelne špirale. Grelno špiralo (*slika 27*) se je v celoti zalilo z betonom. Na ta beton pa se je položilo dno rezervoarja.

Dno rezervoarja je prav tako kot plašč ter streha iz pločevin 316 L dimenzije 7x1500x6000 mm, katere so medsebojno zvarjene s sočelnim zvarom z uporabo korenske letve. Nagib dna rezervoarja je 110 mm (1%).



Slika 27: Grelna špirala vgrajena v dno rezervoarja

5.2 Preverjanje ustreznosti postopka varjenja

Nafta Strojna je za preverjanje ustreznosti postopka varjenja zavarila dve pločevini velikosti 7x150x300 mm – varilni etalon. Varilni etalon je bil najprej pregledan z neporušitvenimi metodami, nato pa se je iz njega naredilo preizkušance za porušitvene preiskave in sicer dva preizkušanca za natezni preizkus z vdrtimi boki, štiri preizkušance za upogibni preizkus (2 za preizkus korena zvara in 2 za preizkus temena zvara), tri preizkušance za preizkus žilavosti v osnovnem materialu ter tri preizkušance za preizkus žilavosti na mestu zvara (*slika 28*). Mesto odvzema preizkušancev je bilo v skladu s standardom EN 288-3:1992.



Slika 28: Preizkušanci za porušitvene preiskave

5.2.1 Neporušitvene preiskave zvarjenega spoja

Zvarjeni spoj je bil pregledan z naslednjimi neporušitvenimi preiskavami:

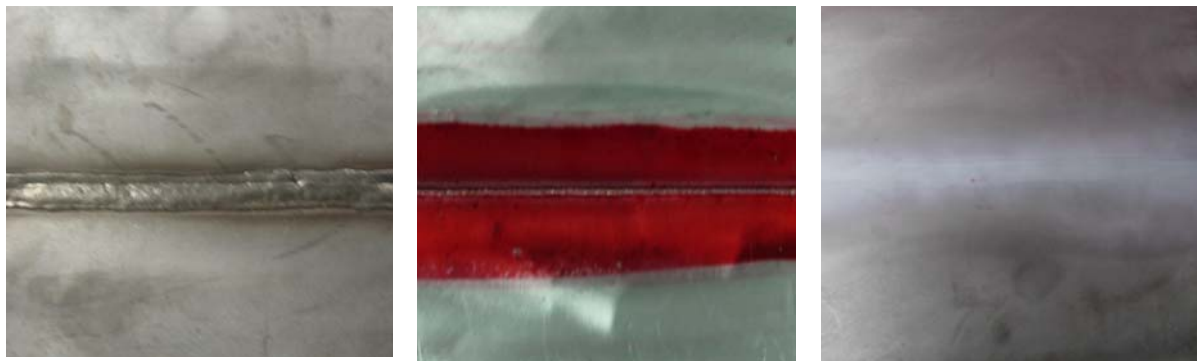
- vizualna kontrola,
- penetrantska kontrola,
- radiografska kontrola.

Vizualna kontrola:

Prva neporušitvena preiskava varilnega etalona je bila vizualna kontrola. Pri vizualni kontroli zvara ni bilo ugotovljenih nedopustnih napak na površini temena in korena zvarjenega spoja. Kontrola je bila opravljena v skladu s standardom EN 25 817.

Penetrantska kontrola:

Vizualni kontroli je sledila kontrola s penetranti. Varilni etalon je bil najprej očiščen s čistilnim oziroma razmaščevalnim sprejem. Po čiščenju vzorca je sledil nanos rdečega penetranta in čiščenje površine ter nanos belega razvijalca. Penetrantska kontrola je bila pozitivna, saj na nobeni strani zvara ni bilo nedopustnih indikacij (*slika 29*).



Slika 29: Varilni etalon pred penetrantsko preiskavo, po nanosu penetranta ter po nanosu razvijalca

Radiografska kontrola:

Kot zadnja neporušitvena preiskava varilnega etalona je bila opravljena radiografska kontrola. Etalon je bil presevan z industrijskim rentgenskim aparatom. Film je bil razvit v temnici. Pri pregledu radiograma je bilo ugotovljeno, da ima zvar po celotni dolžini vključke žindre (*slika 30*). Vzorec za metalografski pregled zvara je bil odvzet na mestu vključka žindre. Radiografska kontrola je primer, da kljub pozitivni oceni vizualne in penetrantske kontrole zvarjeni spoj ni nujno kvalitetno izveden.



Slika 30: Radiogram

5.2.2 Natezni preizkus zvarjenega spoja

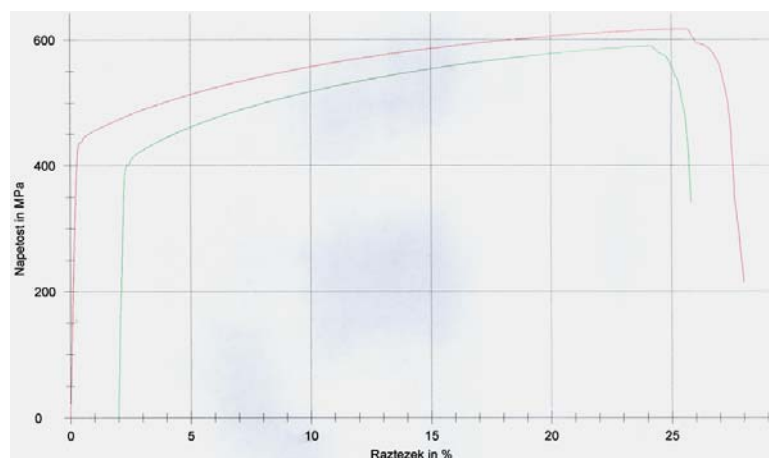
Opravljen je bil natezni preizkus dveh preizkušancev z vdrtimi boki. Rezultati nateznega preizkusa so podani v *preglednici 15*. Mesto pretrga je bilo v obeh primerih v področju zvara, vendar je natezna trdnost v obeh primerih občutno višja od minimalne dovoljene natezne trdnosti za jeklo 316 L, podane v *preglednici 3*. Natezni diagram je prikazan na *sliki 31*.

Preglednica 15: Rezultati nateznega preizkusa

<i>Vzorec</i>	F_{max} [N]	E [GPa]	σ_m [N/mm ²]	σ_{ys} [N/mm ²]	δ_5 [%]	Z [%]
1	87133,6	171,1	616,50	436,69	35,22	62,3
2	84991,8	183,9	589,65	401,34	35,72	64,8

Kjer pomeni:

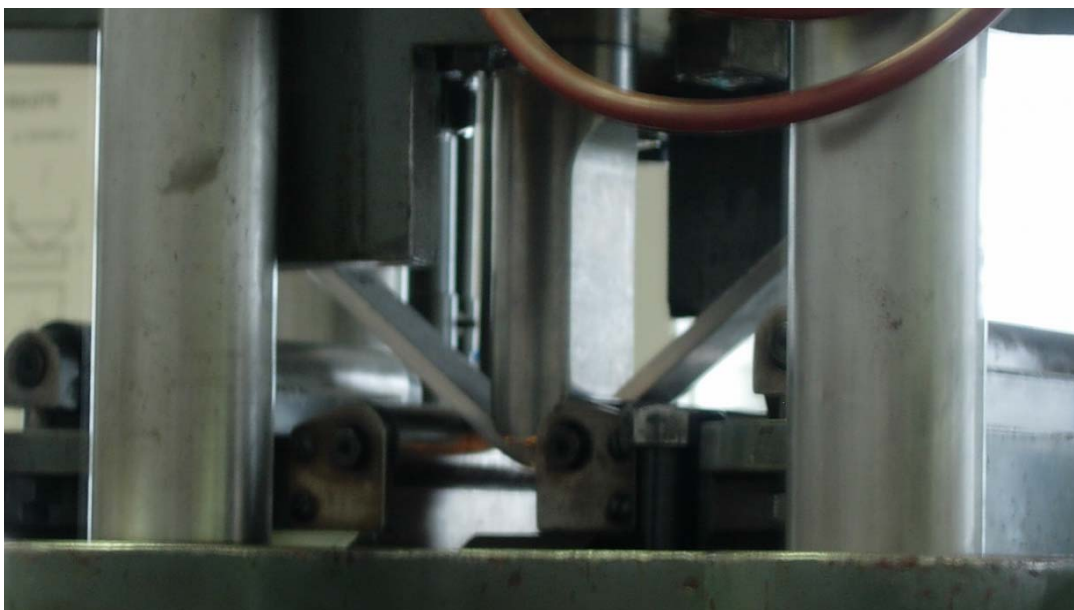
F_{max}	sila ob pretrgu
E	modul elastičnosti
σ_m	napetost tečenja
σ_{ys}	natezna trdnost
δ_5	raztezek
Z	kontrakcija



Slika 31: Natezni diagram

5.2.3 Upogibni preizkus zvarjenega spoja

Z upogibnim preizkusom so bili preizkušeni 4 vzorci in sicer 2 vzorca za preizkušanje korenske strani zvara in 2 preizkušanca za preizkušanje temenske strani zvara. Upogibni preizkus je bil izveden s trnom premera 30 mm ter razmakov med podporami 50 mm kot to prikazuje *slika 32*. Pri upogibnem preizkusu določamo kot upogiba, ki ga prenese zvar, ne da bi pri tem prišlo do kakršnihkoli razpok na preizkušani strani zvara.



Slika 32: Upogibni preizkus

Slika 33 prikazuje upogibne preizkušance po opravljenem preizkusu.



Slika 33: Upogibni preizkušanci (2 temenska in 2 korenska) po preizkusu

Rezultati upogibnega preizkusa so podani v *preglednici 16*.

Preglednica 16: Rezultati upogibnega preizkusa zvarjenega spoja

<i>Oznaka preizkušanca</i>	<i>Predmet preizkusa</i>	<i>Kot upogiba</i>	<i>Rezultat upogiba</i>
1 T	teme zvara	180 °	brez razpok
2 T	teme zvara	180 °	brez razpok
3 K	koren zvara	180 °	brez razpok
4 K	koren zvara	180 °	brez razpok

Iz rezultatov je razvidno, da so vsi štirje preizkušanci dosegli maksimalno vrednost (180 °) in pri tem ostali brez razpok.

5.2.4 Preizkus udarne žilavosti

Za preizkus udarne žilavosti zvara na Charpy-jevem kladivu so bili prav tako kot za preizkus udarne žilavosti osnovnega materiala izdelani trije preizkušanci z „V“ zarezo. Tudi v tem primeru preizkušanci niso bili standardnih dimenzij, zato je bila po merjenju potrebna korekcija glede površine prelomne ploskve. Preizkus je bil izveden pri temperaturi +20 °C. Rezultati merjenja udarne žilavosti zvara so podani v *preglednici 17*.

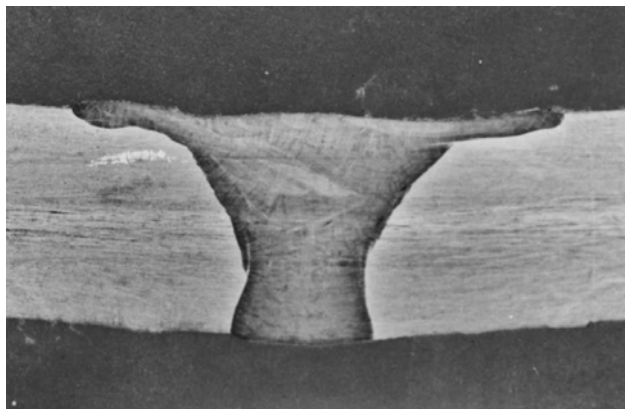
Preglednica 17: Rezultati merjenja udarne žilavosti zvara po Charpy-ju

<i>Oznaka preizkušanca</i>	<i>Temperatura preizkušanja [°C]</i>	<i>Žilavost [J]</i>
VAR 4	+20	52
VAR 5	+20	103
VAR 6	+20	100

Žilavost vzorca z oznako VAR 4 je zaradi vključka žindre nekoliko nižja od žilavosti preostalih dveh preizkušancev, vendar je kljub temu dobra.

5.2.5 Meritev mikrotrdot

Na vzorcu prikazanem na *sliki 34* je bila opravljena meritev mikrotrdot (HV 300).



Slika 34: Makroposnetek zvarjenega spoja

V *preglednici 18* so podani rezultati meritev mikrotrdot na temenski strani zvarjenega spoja. Trdote so bile merjene na razdalji 50 μm .

Preglednica 18: Rezultati meritve mikrotrdot (HV 300) na temenski strani zvara

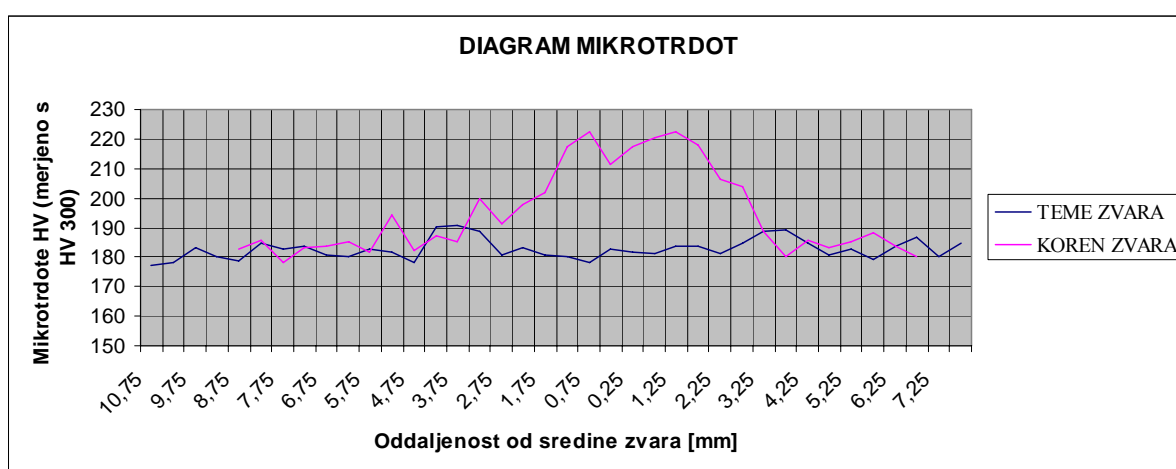
<i>Osnovni material – levo</i>													
177,4	178,0	183,0	180,0	178,9	184,6	182,6	183,9	180,6	180,0	182,6	181,9	178,0	
<i>TVP</i>			<i>Var</i>										
190,1	190,9	188,7	180,6	183,2	180,6	180,0	178,0	182,6	181,9	181,3	183,9	183,9	
<i>Var</i>		<i>TVP</i>			<i>Osnovni material - desno</i>								
181,3	184,6	188,7	189,4	184,6	180,6	182,6	179,3	183,9	186,6	180,0	184,6		

V *preglednici 19* so podani rezultati meritev mikro trdot na korenski strani zvarjenega spoja. Trdote so bile merjene na razdalji 50 μm .

Preglednica 19: Rezultati meritve mikrotrdot (HV 300) na korenski strani zvara

<i>Osnovni material – levo</i>										
182,6	185,8	178,0	183,2	183,9	185,3	181,5	194,4	182,2	187,3	185,1
<i>TVP</i>			<i>Var</i>							
199,6	191,5	198,0	201,8	217,3	222,5	211,4	217,3	220,6	222,5	218,1
<i>TVP</i>			<i>Osnovni material - desno</i>							
206,5	203,9	188,7	180,0	185,9	183,2	185,3	188,0	183,9	180,0	

Povprečna izmerjena vrednost v osnovnem materialu je 180 HV, v toplotno vplivnem področju (TVP) je 193 HV, v varu pa je 196 HV. Ker povprečna izmerjena vrednost v toplotno vplivnem področju ni več kot 30 % večja od povprečne izmerjene vrednosti v osnovnem materialu, so trdote zvara ustrezne. *Slika 35* prikazuje diagram mikrotrdot iz osnovnega materiala preko zvarnega spoja.

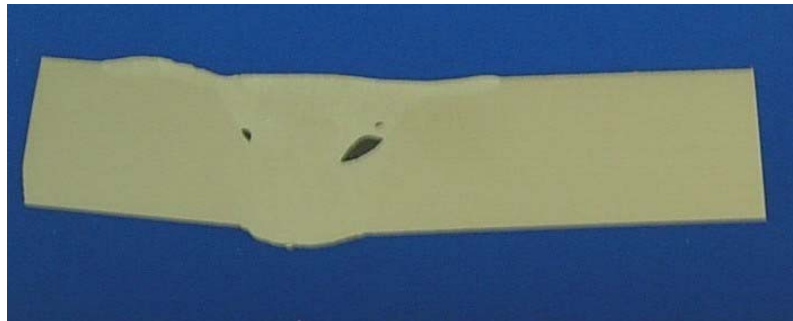


Slika 35: Diagram mikrotrdot

5.2.6 Metalografski pregled zvarjenega spoja

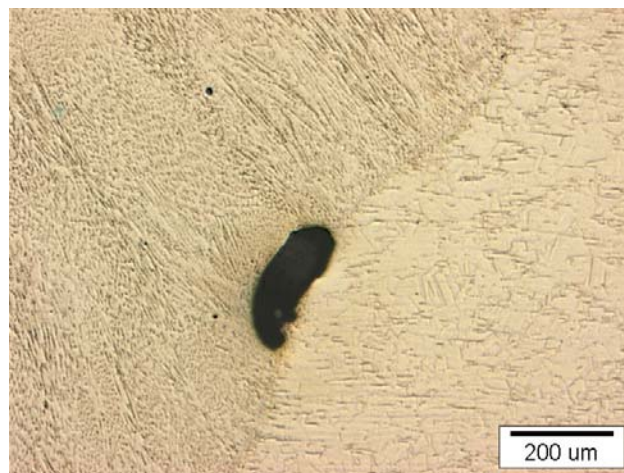
Na mestu, kjer je bil z radiografsko kontrolo odkrit vključek žlindre, je bil odvzet vzorec za metalografski pregled zvarjenega spoja. *Slika 36* prikazuje makro posnetek zvarjenega spoja

z vključki žindre. Žindra je nekovinski vključek materiala, ki nastane kot posledica slabega čiščenja površine posameznih varkov.



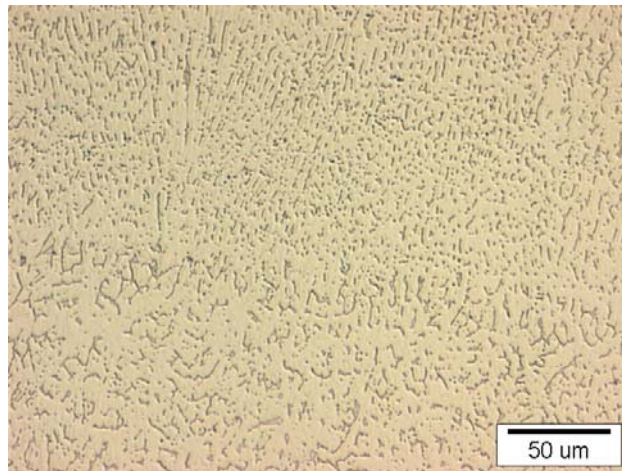
Slika 36: Vzorec za metalografski pregled zvarjenega spoja

Mikrostruktura toplotno vplivnega področja in osnovnega materiala sestoji iz avstenita in δ -ferita (*slika 37*), le da je delež δ -ferita v toplotno vplivnem področju nekoliko večji kot v nepregretem osnovnem materialu.



Slika 37: Meja med varom in toplotno vplivnim področjem z vključkom žindre

Mikrostruktura vara prav tako sestoji iz avstenita in δ -ferita, kar je razvidno iz *slike 38*. Tudi delež δ -ferita je večji kot v osnovnem materialu in toplotno vplivnem področju, kar je pravilno, saj le-ta pri strjevanju preprečuje nastanek mikroporoznosti vara.



Slika 38: Mikrostruktura vara

Na šestih mestih je bila izvedena tudi meritev δ -ferita v varu. Rezultati meritev so razvidni iz preglednice 20.

Preglednica 20: Vsebnost δ -ferita v varu

<i>Vsebnost δ-ferita v varu v %</i>					
8,1	6,7	8,4	8,3	6,8	6,8

5.3 Vizualna kontrola zvarov

Obseg vizualne kontrole opravljene na rezervoarju:

- kontrola priprave zvarnega spoja z merilnikom geometrije,
- zvari strehe,
- radialni in vertikalni zvari prvega ovoja rezervoarja,
- kotni zvar med dnom in plaščem z zunanje strani.

Pri vizualni kontroli omenjenih mest ni bilo opaženih nepravilnosti. *Slika 39* prikazuje kontrolo priprave vertikalnega zvarnega spoja z merilnikom geometrije zvarov.



Slika 39: Kontrola priprave zvarnega spoja

5.4 Penetrantska kontrola zvarov

Penetrantska kontrola zvarjenih spojev je bila izvedena v skladu s pogoji navedenimi v točki 3.2.2.2. Pregledani so bili vsi zvari priključkov na plašč rezervoarja in streho kot je to določeno v projektu. Pregledana mesta so bila brez indikacij in kot taka sprejemljiva.

5.5 Radiografska kontrola zvarov

Plan radiografske kontrole zvarnih spojev plašča rezervoarja je bil pripravljen v skladu s standardom API 650. Na osnovi plana kontrole je bilo za presevanje določenih 47 mest na zvarjenih spojih. Kontrola je bila izvedena na vseh 47 mestih. Pet radiogramov je bilo ocenjenih negativno in določenih za popravilo. Po popravilu zvarnih spojev so bila ta mesta ponovno presevana in radiogrami ocenjeni pozitivno. Kvaliteta radiogramov je bila v skladu s kriteriji za ovrednotenje radiogramov podanimi v točki 3.2.2.3. Na posnete radiograme ni bilo pripomb.

5.6 Kontrola tesnosti zvarov

Kontrola tesnosti zvarov je bila izvedena z vakuumsko tehniko. Preizkušeni so bili vsi zvarni spoji strehe rezervoarja ter vsi zvarni spoji dna rezervoarja. Na zvarnih spojih strehe rezervoarja sta bili najdeni dve netesni mesti, na zvarnih spojih dna rezervoarja pa je bilo najdenih devet netesnih mest. Ugotovljena netesna mesta so bila popravljena in ponovno pregledana. Pri ponovnem pregledu popravljenih zvarnih spojev ni bilo ugotovljenih netesnosti.

5.7 Dimenzijska kontrola rezervoarja

Dimenzijska kontrola rezervoarja je obsegala kontrolo vertikalnosti plašča rezervoarja in meritev odstopanja od popolne okroglosti. V področju vertikalnih zvarnih spojev pa so bile izvedene tudi meritve s šablono dolžine 100 cm, katere ukrivljenost ustreza polmeru rezervoarja, kar prikazuje *slika 40*.



Slika 40: Dimenzijska kontrola rezervoarja

Izmerjena lokalna odstopanja so bila maksimalno 2 mm in so v skladu s projektnimi zahtevami (*preglednica 8*). Maksimalno vertikalno odstopanje plašča na vrhu rezervoarja znaša 10 mm in je manjše od predpisane vrednosti v projektu (± 80 mm). Maksimalno odstopanje radija rezervoarja na višini 300 mm od dna rezervoarja znaša 20 mm, kar je v dopustnih mejah podanih v *preglednici 9*.

5.8 Hidrostatični preizkus

Hidrostatični preizkus je bil opravljen v naslednjem vrstnem redu:

- polnjenje rezervoarja do 1/3 - pretok vode je bil 100 m³/h,
- izvedba 1. meritve,
- polnjenje rezervoarja do 2/3,
- izvedba 2. meritve,
- polnjenje do maksimalne višine 8,0m,
- izvedba 3. meritve,
- rezervoar je bil pod polno obremenitvijo 24 h,
- izvedba 4. meritve,
- praznjenje rezervoarja do 1/2 – hitrost izpusta je bila 300 mm/h,
- izvedba 5. meritve,
- praznjenje do izpraznitve v rezervoarju,
- izvedba 6. meritve.

Meritve in kontrole na posameznih nivojih polnjenja in praznjenja so obsegale:

- kontrolo nepropustnosti,
- kontrolo trdnosti plašča,
- meritev vertikalnosti.

Med hidrostatičnim preizkusom ni bilo ugotovljenih netesnih mest in nedopustnih deformacij plašča rezervoarja.

6.0 ZAKLJUČEK

Za projektiranje, gradnjo ter kontrolo izdelave in montaže nadzemnih jeklenih rezervoarjev se poleg že uveljavljenih standardov API 650, DIN 18800-4 in BS 2654 čedalje bolj uporabljajo standardi EUROCODE.

Za rezervoar RF-8 v katerem bo skladiščena fosforna kislina je bilo za vse dele konstrukcije (dno, plašč in streha) izbrano avstenitno nerjavno jeklo 316 L. Za to jeklo je značilno, da ima dobre korozijske lastnosti in dobro žilavost.

S kontrolo izdelave se je pričelo v obratu izvajalca del Naftne Strojne, kjer je bila izvedena dimenzijska kontrola pločevin. Za preverjanje ustreznosti postopka varjenja je Nafta Strojna izdelala varilni etalon, ki je bil pregledan z neporušitvenimi metodami in nato še s porušitvenimi metodami. Vizualna kontrola in kontrola s penetranti sta bili pozitivno ocenjeni, medtem ko so bili z radiografsko kontrolo odkriti vključki žindre v varu. Napake v zvarjenem spoju pa niso bistveno vplivale na mehanske lastnosti zvarjenega spoja. Opravljen je bil tudi metalografski pregled zvarjenega spoja iz katerega je razvidno, da mikrostruktura vara ter toplotno vplivnega področja ustreza kemični sestavi jekla.

Kontrola montaže rezervoarja je obsegala neporušitvene preiskave zvarjenih spojev, kontrolo geometrije rezervoarja ter hidrostatični preizkus. Z vizualno ter penetrantsko kontrolo ni bilo opaženih nepravilnosti na preverjenih zvarnih spojih, medtem ko je bilo z radiografsko kontrolo odkritih 5 mest za popravilo, s kontrolo tesnosti zvarov pa 11. Dimenzijska odstopanja geometrije rezervoarja so bila v skladu s standardom ENV 1993-1-6. S hidrostatičnim preizkusom se je preverjala nepropustnost in trdnost plašča rezervoarja, izvedena pa je bila tudi meritev vertikalnosti. Z omenjenim preizkusom ni bilo ugotovljenih netesnih mest in nedopustnih deformacij plašča rezervoarja.

7.0 VIRI

European Prestandard ENV 1993-1-6: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-6: General rules – Supplementary rules for shell structures.

API Standard 650: Welded steel tanks for oil storage.

SIST EN 14015:2005: Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above.

Pravilnik o tehničnih ukrepih in pogojih za montažo jeklenih konstrukcij, Ur. list SFRJ št. 29/1970.

Beg, D. 1999. Projektiranje jeklenih konstrukcij po evropskem predstandardu ENV 1993-1-1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 219 str.

Vojvodič Tuma, J. 2002. Mehanske lastnosti kovin. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 273 str.

Dulmin, D. 2003. Dimenzioniranje jeklenih rezervoarjev. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 115 str.

Gorenc, B. 2003. Račun jeklenih rezervoarjev po standardu ENV 1993-1-6. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 178 str.

Gorup, I. 2005. Analiza sodobnih metod dimenzioniranja jeklenih rezervoarjev po standardih Evrokod. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 134 str.

Vehovar, L. 1991. Korozija kovin in korozijsko preskušanje. Ljubljana, Samozaložba: 390 str.

Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 350 str.

Berdajs, A., Žitnik, D. 2006. Gradbeniški priročnik, Ponatis 3. predelane in razširjene izdaje. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 560 str.