

Preiskave horizontalne stabilne tlačne posode za skladiščenje utekočinjenega naftnega plina

Examinations of a Horizontal Stable Pressure Vessel for Liquid Petrol Gas Storing

J. Vojvodič Gvardjančič¹, IMT Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1995-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1995-12-22

Opravljenе so bile preiskave za oceno uporabnosti tlačne posode prostornine 150 m³, ki bi jo naročnik želel uporabiti za skladiščenje propan butana. Po predpisih se za izdelavo take tlačne posode zahteva jeklo z najmanjšo natezno trdnostjo 400 MPa, mejo plastičnosti 260 MPa in udarno žilavostjo Charpy-V 28 J pri temperaturi -20°C. Naročnik je predložil pomanjkljivo tehnično dokumentacijo, pri vizualni kontroli pa smo odkrili tudi večje korozijske poškodbe na plašču posode. Zato je Inštitut za kovinske materiale in tehnologije predložil sanacijo tlačne posode in vse potrebne preiskave za dokaz uporabnosti tlačne posode za utekočinjeni naftni plin.

Ključne besede: tlačna posoda, utekočinjeni naftni plin, statična presoja plašča in podnice

Tests for applicability of pressure vessel of volume 150 m³ for liquid petrol gas storing has been performed. According to regulations, a steel with tensile strength at least 400 MPa, yield stress 260 MPa, and impact toughness Charpy-V 28 J at temperature -20°C, is required. The technical documentation submitted by the client is insufficient. By visual control, we have observed bigger corrosion damages on the pressure vessel wall. Therefore, Institute of metals and technology suggested the improvement of pressure vessel together with all necessary tests for proving applicability of the vessel for liquid petrol gas.

Key words: pressure vessel, liquid petrol gas deposition, static estimation of pressure vessel wall and bottom

1 Uvod

Tlačne posode so konstrukcije za shranjevanje in prenos različnih snovi pri različnih temperaturah in različnih obremenitvah. Zahtevajo poznavanje analizičnih metod za določitev napetosti, razumevanje najbolj pogostih pojavov, ki vodijo do poškodb ter poznavanje pomena dobljenih rezultatov za izbor materialov in njihovo vedenje glede na okolje.

Uporaba tlačnih posod v vedno bolj zahtevnih temperaturnih in obremenitvenih razmerah zahteva posebne analitične in eksperimentalne metode za določanje napetosti v materialu. Razvoj novih tehnologij pa je privedel tudi do večjega povpraševanja, ne le po materialih odpornih proti krhkemu lomu, temveč tudi po tistih s povišano trajno mejo lezenja, trajno dinamično trdnostjo, večjo odpornostjo proti koroziji, manjšo občutljivostjo na nevtronsko sevanje in podobno.

Na osnovi navedenega ugotavljamo, da so tako predhodne raziskave v zvezi z izbiro materiala, projektiranje in izdelava tlačnih posod kot tudi kontrola izdelave ter redni pregledi multidisciplinarnega značaja.

2 Teoretični del

Klasični način izbiranja materiala in izračun napetosti pri projektiranju tlačnih posod, ki je tudi upoštevan v večini predpisov, upošteva Hookov zakon in osnovne natezne karakteristike materiala. Pri tem načinu je upoštevana precejšnja plastična rezerva.

Veliko število nepričakovanih lomov tlačnih posod pri povsem normalnih projektnih obremenitvah pa je privedlo do novega koncepta projektiranja tlačnih posod na osnovi prehodne temperature. V tem primeru projektant predpiše za izbrano jeklo minimalno zahtevano žilavost in prehodno temperaturo, ki jo določamo z različnimi preskusi (Charpy, DWT, DWTT...). Poleg žilavosti pa se za zahtevne konstrukcije upošteva tudi sposobnost zaustavitve razpoke, kar se določa z Robertsonovim preskusom, eksplozijskim preskusom in podobno. Seveda pa ima tudi ta način projektiranja pomanjkljivosti, saj upošteva le nevarnost pojavljanja krhkega loma.

Tem pomanjkljivostim se v veliki meri izognemo z uporabo takšnih preiskovalnih metod, s katerimi se ne zavarujemo le proti krhkemu lomu ampak tudi proti utrujanju, lezenju, radiacijskim poškodbam, vodikovi krhkosti in napetostni koroziji.

¹ Dr. Jelena VOJVODIČ GWARDJANČIČ
Inštitut za kovinske materiale tehnologije
1000 Ljubljana, Lepi pot 11

Geometrijskih oblik tlačnih posod je veliko. Osnovna oblika je cilindrična lupina, katere togost določimo z razmerjem polmera lupine in njene debeline. Tlačne posode so obremenjene s pritiskom, upoštevati pa moramo tudi maso konstrukcije in maso ter vpliv medija, vpliv vetra in potresa, zemeljski pritisk, delno polnjenje in praznjenje, temperaturne in udarne obremenitve, vpliv časovne deformabilnosti materiala in obremenitve, ki so posledica tehnološke izdelave konstrukcije (zaostale napetosti).

Poleg tega so v materialu vedno diskontinuitete, katerih stabilnost v močno obremenjenih konstrukcijah določa prav žilavost osnovnega materiala. Podatke o napakah v materialu dobimo z neporušnimi preiskavami, kot so ultrazvočne preiskave ali radiografija.

Z mehaniko loma lahko določimo tudi vpliv napak na globalno varnost tlačne posode ter za nosilnost kritično razmerje med razpokami, napetostmi in lastnostmi materiala. Seveda pa moramo poznati tako velikost kot tudi orientacijo razpok, pri napetostih pa moramo upoštevati koncentracije ob priključkih in zaostale napetosti. Kritično velikost razpoke lahko izračunamo, ko poznamo nivo napetosti in lastnosti materiala. Določila lomne mehanike so upoštevana tudi v predpisih ASME Boiler and Pressure Vessel Code III in XI ter angleških predpisih BS PD.6493. Faktor intenzitete napetosti K je sestavljen iz dveh členov, prvi rezultira iz membranske napetosti, drugi pa iz upogibne, tako da dobimo izraz:

$$K = \frac{\sqrt{\pi a}}{Q} (M_m \sigma_m + M_u \sigma_u) \quad (1)$$

Izraz (1) uporabljamo za površinske napake, ki sežejo do globine a , ali za notranje napake, ki so prečne dimenzije $2a$; kalibracijske krivulje za faktorje M_m in M_u pa so podane v predpisih za različna razmerja globine in dolžine napake ter različna razmerja globine napake in debeline stene konstrukcije.

Dimenzioniranje zahtevnih tlačnih posod izvajamo z računalniškimi programi na osnovi metode končnih elementov, kot so ANSYS, COSMOS, NISSA ..., ali specialnimi programi za analizo osnosimetričnih in prizmatičnih, poljubno podprtih lupin. S tako analizo izračunamo napetosti tudi v področju priključkov, z globalno analizo pa določamo delež posameznih obtežnih primerov. Končni rezultat oziroma merodajni obtežni primer nam poda lokalna analiza. Računski programi vsebujejo več tipov končnih elementov, kot so gredni element prostorskega okvira, element za cevi in lupine, robni element, subparametrični element... Programi omogočajo statično in dinamično analizo. Za izračun priključkov ne obstajajo natančne analitične rešitve, pač pa priporočila^{1,2}. Za enostavne tlačne posode pa je osnova za dimenzioniranje še vedno kar kotlovska formula, s katero izračunamo membranske napetosti v cilindrični lupini.

Debelino plašča tlačne posode (s) brez odprtini lahko izračunamo z izrazom³:

$$s = \frac{D_s p}{20 \frac{R_p}{S} v + p} + c_1 + c_2, \quad (2)$$

kjer pomeni D_s zunanji nazivni premer tlačne posode v mm, p delovni tlak v barih, R_p napetost tečenja pri obratovalni temperaturi v MPa, S stopnja varnosti, v koeficient zvara plašča⁴, c_1 dodatek odstopanja debeline pločevine⁵ in c_2 korozijski dodatek⁵. Dimenzioniranje plašča z odprtinami pa izvedemo z izrazi, navedenimi v literaturi^{3,4}.

Debelino podnice tlačne posode (t) določimo z izrazom⁶:

$$s = \frac{D_s p}{40 \frac{R_p}{S} v} \beta + c_1 + c_2, \quad (3)$$

kjer pomeni D_s zunanji premer podnice v mm, p delovni tlak v barih, R_p napetost tečenja pri obratovalni temperaturi v MPa, S stopnja varnosti, v koeficient zvara podnice⁴, c_1 dodatek odstopanja debeline pločevine⁵ in c_2 korozijski dodatek⁵. Obliko podnice določimo na osnovi izrazov^{7,8}.

3 Eksperimentalni del

Po predpisu JUS H.Z2.600/1991 se za izdelavo horizontalnega zvarjenega rezervoarja za propan butan zahteva kvaliteta osnovnega materiala z najmanjšo natezno trdnostjo 400 MPa, napetostjo tečenja 260 MPa in udarno žilavostjo Charpy-V po JUS C.A4.025 najmanj 28 J pri temperaturi -20°C . Investitor ni predložil potrebnih potrdil o kvaliteti vgrajenega materiala, zato smo na tlačni posodi, prikazani na **sliki 1** predložili naslednje kontrole:

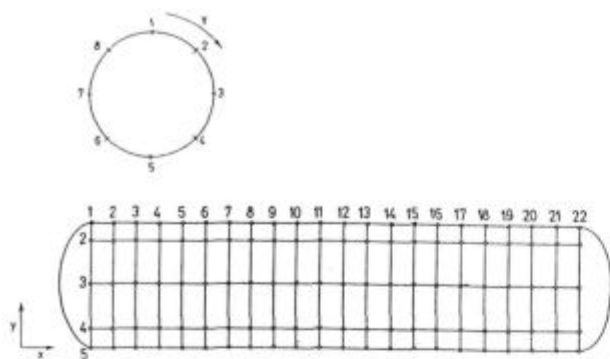
- pregled atestno tehnične dokumentacije
- vizualni pregled
- merjenje debeline vgrajenih pločevin
- metalografske preiskave poškodovanih mest
- odvzem vzorcev za določitev žilavosti po Charpyju, ter vzorcev za natezni preizkus
- statično presojno plašča in podnice z upoštevanjem izmerjenih vrednosti.

Na tlačni posodi smo označili mrežo z 22 merskimi mesti po dolžini in 8 merskimi mesti po obodu⁹, kar prikazuje **slika 2**. Na označenih mestih smo merili debelino z ultrazvočnim merilnikom debeline Panametrics 26 DL. Pri izmerjenih večjih odstopanjih od predvidene debeline pločevine smo področje dodatno ultrazvočno preiskali. Dodatne meritve smo opravili po celotnem obodu plašča posode v prečnih smereh, označenih s 3,4,5,6 in 7.

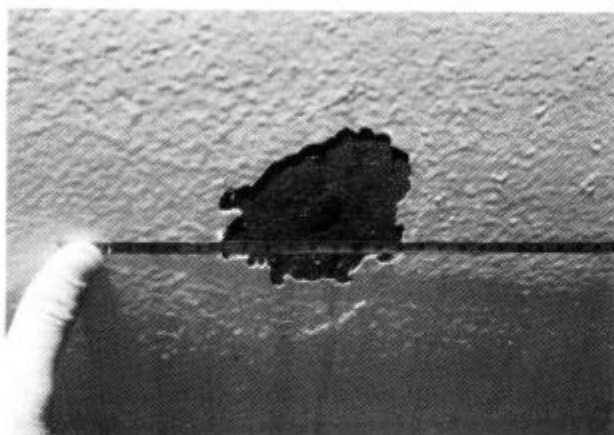
Tlačna posoda je bila sveže prebarvana, vendar smo pod nanosom barve ugotovili korozijske poškodbe v obliki izboklin ali v obliki odluščenih mest. Na odluščenih mestih smo na površini posode opazili tanke zavaljane luskinke. Luskinke, odluščeno s površine, smo pregledali v optičnem mikroskopu (obrus) in v elektronskem mikroanalizatorju opredelili nekovinske vključke v luskinke. **Slika 3** prikazuje mesto odvzema preiskane zavaljane luskinke na površini tlačne posode, **slika 4** pa izboklino pod odluščeno barvo na površini tlačne posode.



Slika 1: Horizontalna stabilna tlačna posoda prostornine 150 m³
Figure 1: Horizontal stable pressure vessel of volume 150 m³



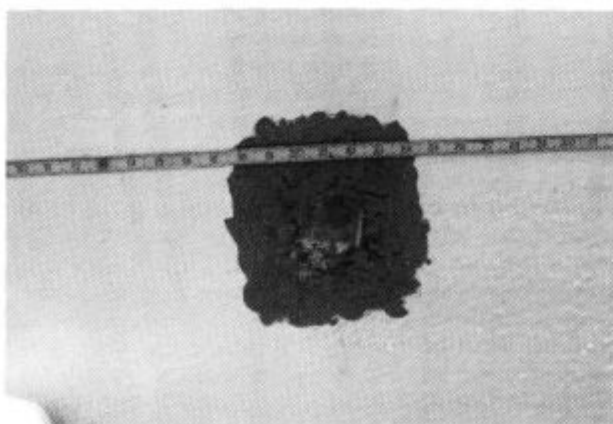
Slika 2: Merna mesta na tlačni posodi
Figure 2: Measuring points of the pressure vessel



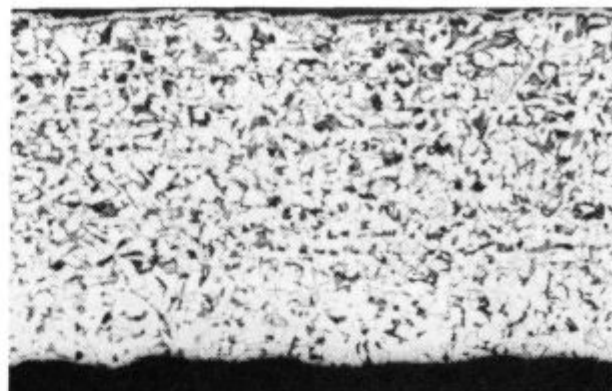
Slika 3: Mesto na zunanji površini tlačne posode, kjer je bila odstranjena zavaljana luska
Figure 3: The place on the outer surface of pressure vessel, where the rolled metal lusk was removed

4 Rezultati in diskusija

Luskino, pod katero vizualno ni bilo zaznati vpliva korozije, smo natančneje analizirali. Ugotovili smo⁹, da ima jeklo ustrezno feritno perlitno mikrostrukturo, kar prikazuje **slika 5**. Na nejedkani luski se opazijo nizi drobnih nekovinskih vključkov, ki so po sestavi sulfidi in oksidi. Na notranji

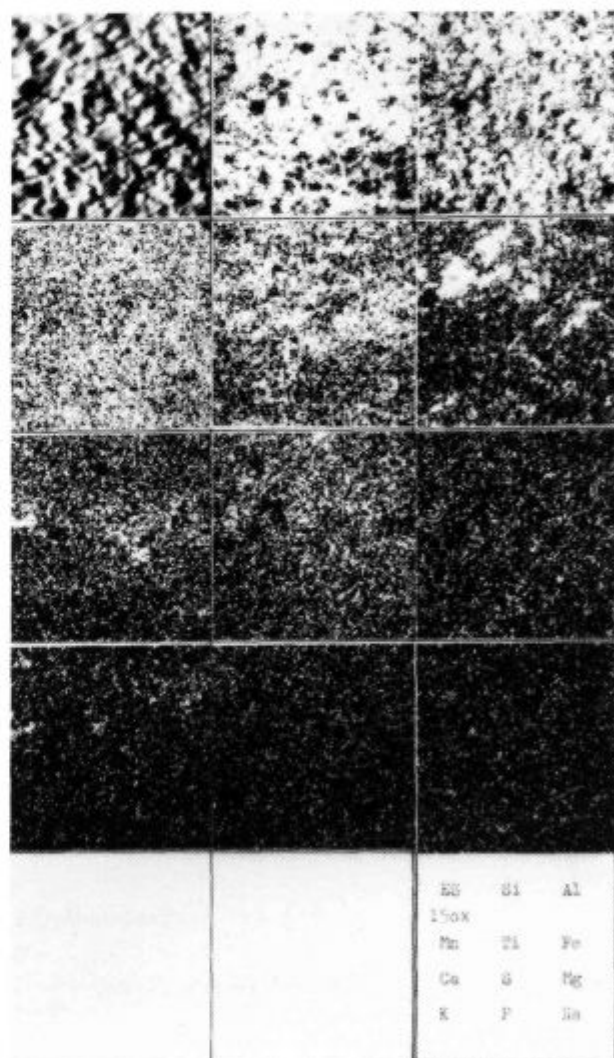


Slika 4: Izboklina na zunanji površini tlačne posode
Figure 4: Convexity on the outer surface of the pressure vessel



Slika 5: Mikrostruktura luske (100 x)
Figure 5: Microstructure of metal lusk (100 x)

površini luske se opazijo nekovinski vključki, ki so s površine deloma odpadli. Te vključke smo analizirali v elektronskem mikroanalizatorju. Elektronska slika in specifični rentgenski



Slika 6: Elektronska slika in specifični rentgenski posnetki elementov nekovinskih vključkov

Figure 6: Electron image (ES) and specific X-ray images of nonmetallic inclusions

posnetki sestavnih elementov nekovinskih vključkov je prikazana na **sliki 6**. Vsebnost elementov na specifičnih rentgenskih posnetkih je sorazmerna gostoti belih pik. Vključki so oksidnega tipa in vsebujejo veliko silicija, aluminija in mangana. Kalcija, magnezija, žvepla, kalija, fosforja in natrija je zelo malo oziroma so prisotni le v sledovih. Nekovinski vključki ustrezajo po sestavi livnemu prašku iz procesa konti litja slabov. Železo na posnetkih izhaja iz ozadja (osnova je jeklo), titan pa iz antikorozijske zaščite. To zaščito smo opazili na notranji površini luske tudi pri pregledu z binokularnim mikroskopom. To kaže, da je protikorozijska zaščita že pri barvanju deloma penetrirala v razpoko pod luskino. Ker ne poznamo Charpyjeve udarne žilavosti, ne moremo s korelacijskimi enačbami niti približno določiti lomne žilavosti K_{IC} ter na tej osnovi opredeliti nevarnosti, ki jo morda predstavljajo odkrite planarne diskontinuitete. V obravnavanem primeru so pa luskine tanke, debelina plašča pa večja od zahtevane po projektu, zato te luskine najbrž ne predstavljajo nesprejemljive napake.

Pri merjenju debeline stene rezervoarja smo ugotovili, da je za posamična odstopanja od predvidene debeline lahko vzrok tudi zavaljanost pločevine, kar bo potrebno natančneje opredeliti z odvzemom vzorcev pločevine.

Izmerjena debelina plašča pa v splošnem dosega od 16,20 mm do 17,88 mm in je večja od debeline po projektu, ki je 15 mm.

5 Sklep

Iz izmerjene trdote lahko dokaj natančno določimo trdnost jekla ter z uporabo primerne konservativnega merila ocenimo tudi napetost tečenja jekla, nikakor pa ne moremo iz znane trdote niti iz znane mikrostrukture sklepati o zahtevani udarni žilavosti jekla in o temperaturi prehoda iz žilavega v krhko stanje. Šele ko poznamo tudi Charpyjevo udarno žilavost, lahko s korelacijskimi enačbami približno določimo lomno žilavost K_{IC} ter na tej osnovi opredelimo nevarnost, ki jo morda predstavljajo odkrite planarne diskontinuitete. Zaradi tega je odvzem vzorcev materiala iz takšnih tlačnih posod nu-

jen, opravljeni ustrezni mehanski preizkusi pa so temeljni pogoj za oceno varnosti objekta.

6 Literatura

- ¹ *British Standard 5500*, Appendix G, 1994
- ² *Welding Research Council Bulletin 107*, Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings, 1965
- ³ Posude pod pritiskom, Cilindrični i kuglasti omotači izloženi unutrašnjim pritiskom-proračun, *JUS M. E2*. 253, UDK 621.642-983/-988.001.24, 1991
- ⁴ *JUS M. E2*. 256, Posude pod pritiskom, Izrezi u cilindrima, konusima i kuglama izloženim unutrašnjem pritisku, UDK 621.642-986/988, 1991
- ⁵ Posude pod pritiskom. Proračun delova pod pritiskom. Opšti zahtevi, *JUS M. E2*. 250, UDK 621.642-983/-988.001.24, 1991
- ⁶ Posude pod pritiskom. Danca izložena unutrašnjem ili spoljašnjem pritisku. Proračun, *JUS M. E2*. 252, UDK 621.642-983/-988.001.24, 1991
- ⁷ *JUS M. E0*. 020, Termoeenergetske naprave in tlačne posode, Plitva dna, Oblika in mere, 1980
- ⁸ *JUS M. E0*. 021, Termoeenergetske naprave in tlačne posode, Globoka dna, Oblika in mere, 1980
- ⁹ J. Vojvodič Gvardjančič, B. Hertl, D. Kmetič, Stokovna ocena horizontalnega zvarjenega rezervoarja za propan butan prostornine 150 m³, *Poročilo Inštituta za kovinske materiale in tehnologije*, 11/95, 1995
- ¹⁰ J. F. Harvey, P. E., *Theory and Design of Pressure Vessels*, Van Nostrand reinhold Company Inc., 1980
- ¹¹ *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Section XI., Nuclear Power Plant Components
- ¹² *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Section III., Article A-4000, Material Properties
- ¹³ W. S. Pellini, AWS Adams Lecture, Principles of Fracture Safe Design, *Welding Journal Research Supplement*, Part I. - march 1971, 91S-109S, Part II. - april 1971, 147S-162S, 1971
- ¹⁴ J. Vojvodič Gvardjančič, B. Ule, S. Ažman, Fracture Toughness of Fine Grained microalloyed Steels at Nil Ductility temperature, *The 3rd European Conference on Advanced Materials and Processes*, C. 364, Pariz, 1993
- ¹⁵ *PVRC Recommendations on Toughness Requirements for Ferritic Materials*, PVRC Ad Hoc Group on Toughness Requirements, WRC, Bulletin, 175, 1972