

## IZRADA ZAVARENIH POSUDA ZA SKLADIŠTENJE PRIRODNOG PLINA

### PRODUCTION WELDED VESSELS FOR STORAGE OF NATURAL GAS

**Aleksandar M. SAVITSKIY<sup>1)</sup>, Darko R. BAJIĆ<sup>2)</sup>, E. M. SAVICKAJA<sup>1)</sup>, S. I. PRITULA<sup>1)</sup>,  
Mikhail M. SAVITSKIY<sup>1)</sup>**

**Ključne riječi:** posuda visokog pritiska, prirodni plin, ATIG zavarivanje

**Key words:** high-pressure vessels, natural gas, ATIG welding

**Sažetak:** U ovom radu obrađuje se problematika izrade čeličnih posuda pod pritiskom za prirodni plin, koji se koristi u automobilskoj industriji. Kako ovaj plin karakterizira mala gustoća, u cilju obezbjeđenja potrebne autonomnosti autotransporta, plin je neophodno održavati na visokom tlaku (20 MPa). Pri tom, posuda pod tlakom kao rezervoar pogonskog goriva, treba biti lagana, kompaktna, pouzdana i jeftina. Primjenom ATIG zavarivanja i naknadne obrade šava, postiže se homogenost zavarenih spojeva, a novi metod kontrole kvaliteta povećava pouzdanost. Korištenje posebno izabranih materijala za ojačanje omotača smanjuje se masa i dobija se pouzdana posuda pod pritiskom, čiji je odnos mase i korisne zapremine <0,65 kg/l. Za realizaciju ovih rješenja razvijena je specifična i nestandardna montažno-zavarivačka oprema, a takođe i tehnološka šema proizvodnje. Na ovim osnovama može se organizirati proizvodnja posuda visokog tlaka za automobilsku tehniku, mobilne rezervoare za transport plina morskim, riječnim i željezničkim putem.

**Abstract:** This work will deal with problems of producing steel vessel under pressure for natural gas, which using in the automotive industry. As this gas is, characterize by low density, in order to secure the necessary autonomy motor, gas is necessary to sustain the high pressure (20 MPa). This vessel, under pressure, as the propulsion tank of fuel, should be light, compact, reliable, and cheap. Using ATIG welding and subsequent processing bevel groove regained homogeneity of weld, and a new method of controlling the quality of increasing reliability. Use of specially selected materials for strengthening of envelope reduces the mass and get a reliable container under pressure, whose ratio mass and useful volume is less than 0,65 kg/l. For the realization of these solutions, is developed specific and non-standard montage welding equipment and technological scheme production. On this basis, it can be to organize the production of vessels of high pressure for automotive systems, mobile reservoirs for the transportation of gas by sea, railway and river road.

---

<sup>1)</sup> Institut elektrolučnog zavarivanja E. O. Paton Kijev, Ukraina

<sup>2)</sup> Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Podgorica, Crna Gora

## 1. UVOD

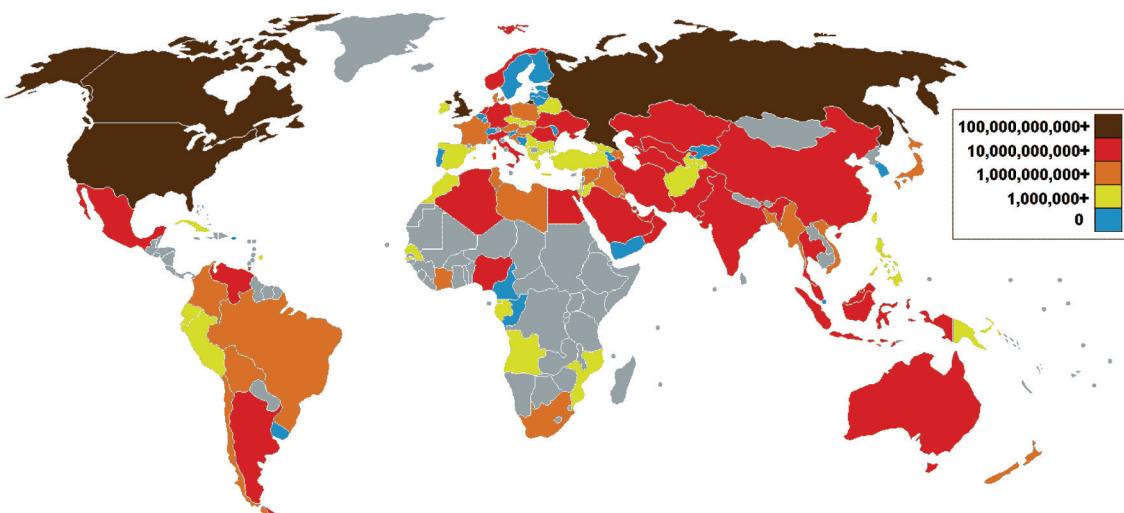
Svjetski autopark broji oko 900 milijuna transportnih jedinica [1]. Više od polovine koristi naftu kao pogonsko gorivo i predstavljaju glavni izvor emisije štetnih plinova u atmosferu (~70 %). Pored toga, tendencija rasta potrebe za naftom i naftnim derivatima i rast broja autotransportnih jedinica, zahtijeva neophodnost pronalaženja i korištenja novih pogonskih goriva. Kao moguće rješenje ovog problema, najčešće se spominje biogorivo, što je nerealno, jer se na taj način smanjuje baza za ishranu čovjeka, a i vodonična energija još uvijek nije rentabilna. Prema tome, najadekvatnija zamjena za naftu kao pogonskog goriva je prirodni plin.

Prirodni plin kao mješavina plinskih ugljovodika sa dominacijom metana, predstavlja izuzetno vrijednu energetsku i kemijsku sirovину koja posjeduje ekološke prednosti u odnosu na konvencionalna goriva. Prirodni gas je skoro idealno gorivo, lako se miješa sa zrakom, ima veliku brzinu sagorijevanja bez dima, čadi i čvrstih ostataka, te prema tome ne zagaduje okolinu.

Prognoze pokazuju da zalihe plina nadmašuju zalihe nafte. Istovremeno, dva puta se smanjuje emisija štetnih plinova u atmosferu - oksida azota i ugljika, a takođe i aromatičnih ugljovodika [2, 3].

Prirodno plin je približno dva puta lakši od zraka i posjeduje malu gustoću. Zbog toga, neophodno ga je održavati pod visokim tlakom. U svjetskoj nauci i praksi sve veća pažnja posvećuje se razradi i proizvodnji tehničkih sredstava i tehnologija za korištenje prirodnog plina kao kvalitetnog i pouzdanog pogonskog goriva. Poseban naglasak se stavlja na kvalitet i pouzdanost posuda visokog tlaka i njihovoj eksploataciji u uslovima intenzivnih cikličnih naprezanja.

Trenutno se javlja problem obezbjedenja potrebnih rezervi prirodnog plina naseljenih mesta koja su udaljena od postojećih plinovoda. Jedan od mogućih rješenja i postupaka prevazilaženja ovog problema je dostava gasa mobilnim cisternama cestovnim, željezničkim ili vodenim transportom.



Slika 1. Producija zemnog plina u m<sup>3</sup> godišnje

Činjenica je da su zalihe prirodnog plina neravnomjerno raspoređeni na planeti (slika 1) [4]. Zbog toga, pitanje transporta većih količina plina stalno je aktualno pitanje. Ovo je poslužilo kao stimulans za razvijanje takvih konstrukcija – specijalno napravljenih tankera za

prevoz prirodnog plina. Pri tom, na rastojanju od 500÷2000 morske milje ekonomski je najisplatljivije prevoziti prirodni plin komprimiran na tlaku 20÷32 MPa.

U budućnosti će postojati potreba za projektiranjem i prizvodnjom posuda visokog tlaka različitih kapaciteta i dimenzija za eksploraciju u uslovima cikličnog naprezanja unutrašnjim pritiskom. To su, prije svega, posude malog kapaciteta za automobilsku industriju, srednjeg kapaciteta za mobilne cisterne i cisterne velikog kapaciteta za transport željeznicom.

## 2. MODELI REZERVOARA PRIRODNOG GASA

U svjetskoj praksi, kao rezervoar pogonskog goriva za automobile, koriste se posude tri tipa:

- metalne,
- kompozitne i
- kombinirane.

Upotrebljiva vrijednost rezervoara ocjenjuje se na osnovu odnosa mase i korisne zapremine posude –  $M/V$  (kg/l). Što je ovaj odnos manji, to je njihova upotrebljiva vrijednost veća i obratno.

Posude koje se proizvode od metala, izrađuju se od bešavnih cijevi, i ovakve posude imaju najmanji odnos  $M/V$ . Ukoliko su izrađeni od legiranih čelika, ovaj odnos je 0,9÷1,2 kg/l, a od ugljeničnih čelika je 1,8÷2,0 kg/l. Jedan od problema koji se javlja pri proizvodnji ovakvih posuda predstavlja nedostatak kvalitetnih bešavnih cijevi. Iz tog razloga, u Poljskoj i Italiji ovakve posude prizvode se primjenom tehnologije dubokog izvlačenja.

Kompozitne posude imaju najmanji odnos  $M/V$  – 0,26÷0,3 kg/l i predstavljaju kompaktnu cjelinu ojačanu namotajima vlakana stakla ili drugim sličnim vlaknima. Ovom tehnikom proizvode se posude u SAD, Kanadi i u još nekoliko zemalja. Za njihovu proizvodnju neophodna je skupa oprema male produktivnosti i skupi materijali, što sve zajedno povećava cijenu za litar nosivosti ovakvih balona za 12÷25 US\$.

Kombinovane posude imaju čeličnu ili aluminijumsku konstrukciju koja je ojačana namotajima kompozitnih materijala. Odnos  $M/V$  kod ovih posuda zavisi od vrste osnovnog materijala i oblika namotaja. Ukoliko je namotavanje cilindričnog dijela konstrukcije tzv. "larva" odnos je 0,5÷0,9 kg/l, a pri prstenastom odnos je 0,6÷0,7 kg/l.

Tehnologija izrade metalnih posuda pod pritiskom razlikuje se od proizvođača do proizvođača. U principu, za izradu omotača koriste se bešavne cijevi. Kod mnogih proizvođača javlja se problem kvaliteta izrade bešavne cijevi. Samo mali broj zemalja u svijetu raspolaže sa neophodnom opremom za proizvodnju visokokvalitetnih bešavnih cijevi. Ovo je osnovni razlog visoke cijene ovih proizvoda. Istovremeno, može se konstatovati, veliki broj posuda pod pritiskom tipa gasovoda izrađeno je primjenom postuka zavarivanja veoma davno i pouzdano se eksploratišu u raznim oblastima privrede.

## 3. TEHNIKA I TEHNOLOGIJA IZRADE POSUDA MALE TEŽINE

Uvažavajući sve prethodno prezentirane probleme, predložena je nova koncepcija proizvodnje posuda visokog pritiska. Omotač posude dobija se poduznim zavarivanjem valjanog lima (sl. 2).

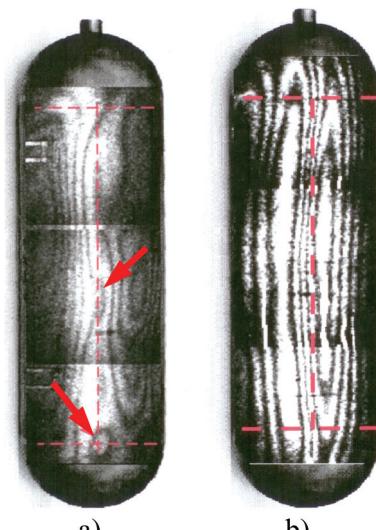
Danca se prosijecaju iz limova istog materijala i zavariju se s omotačem. Na jednom od danaca privaruju se usadnik za montažu ventila.

Oblak danca omogućava da se, u poređenju s omotačem, smanje radni naponi dva puta. Na taj način, potrebno je izvršiti ojačanje samo cilindričnog dijela (omotača) posude. Ojačanje omotača se postiže namotavanjem materijala (tanka vlakna), čija je gustoća i do približno četiri

puta manje od gustoće čelika. Na ovaj način postiže se smanjenje mase posude 40÷45 % u odnosu na dosadašnje konstrukcijsko rješenje. Zatezanjem vlakana u procesu namotavanja može u omotaču posude izazvati napon sabijanja i anulirati lokalne koncentracije naprezanja usled zatezanja (slika 3a i 3b). Na slici je dat prikaz iskrivljjenje interferentnih površina kod posude prije (sl. 3a) i nakon ojačanja omotača vlknima (sl. 3b), dobijeno primjenom metode elektronske širografije [5]. Da se primijetiti da iskrivljjenje interferentnih površina na mjestu postojanja koncentratora (naznačeno strelicama) iščezava nakon namotavanja vlakana. Po našem mišljenju, glavni razlog je to što se nakon formiranja obloge od kampozitnog materijala čvrstoća na zamor balona povećava 3÷4 puta.



Slika 2. Zavareni omotač i polusferična danca balona za automobil



Slika 3. Širogrami posude: a) do namotavanja vlakana; b) nakon namotavanja vlakana



Slika 4. Lake kombinirane posude

Kombinovane posude (slika 4) sa tijelom od zavarenog čelika visoke čvrstoće [6] imaju sledeće tehničke karakteristike:

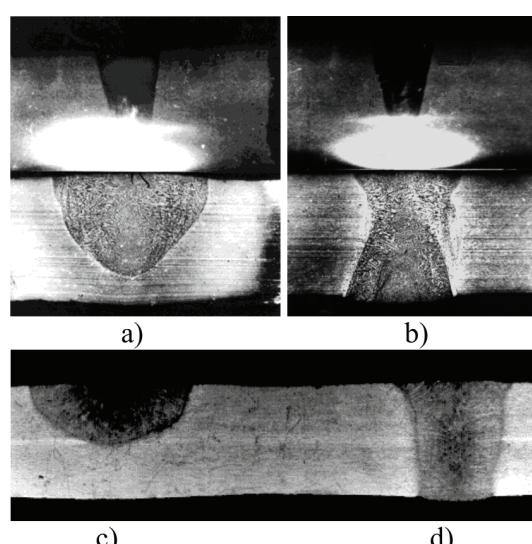
- radni pritisak 20 MPa;
- koeficijent stepena sigurnosti >2,6;

- odnosa mase i korisne zapremine posude –  $M/V < 0,65 \text{ kg/l}$
- eksploatacijski rok 15 godina;
- inspekcijski rok 3 godine.

Certificirane posude pod tlakom koji su proizvedene u Kijevu, eksploatiraju se u Ukrajini više od dvije godine. Trenutno, na bazi ove konstrukcije proizvode se novi tipovi kombiniranih posuda srednje i velike zapremine polumjera do 350 mm za njihovo korištenje u teretnom transportu i za prijevoz prirodnog plina do potrošača. Neki od primjera njihovog korištenja dani su na slici 5.



Slika 5. Primjena posuda kod autobusa u gradskog prevozu putnika a) i za prevoz prirodnog gasa do potrošača b)



Slika 6. Forma i struktura zavarenih spojeva pri zavarivanju bez aktivatora (a i c)  
 i sa aktivatorom (b i d)

Jedan od ključnih segmenata tehnološkog procesa proizvodnje zavarenih posuda pod pritiskom je tehnologija zavarivanja. Kako se za izradu ovih posuda koriste tanki čelični limovi, u cilju osiguranja stabilnosti mase i pouzdanosti konstrukcije, tehnologija mora da osigura istu čvrstoću metala šava i osnovnog metala. Za zavarivanje se koristi ATIG postupak zavarivanja [7], koji omogućuje zavarivanje u jednom prolazu čelika debljine do 10÷12 mm, bez zazora između stranica žljeba i bez dodatne elektrodne žice. Ovo se postiže uvođenjem u zonu zavarivanja specijalno pripremljenog topitelja (aktivatora). Djelovanje topitelja se ogleda u

tome što dolazi do sažimanja električnog luka, povećava se koncentracija zagrijavanja i pritisak električnog luka na kupku zavara (slika 6).

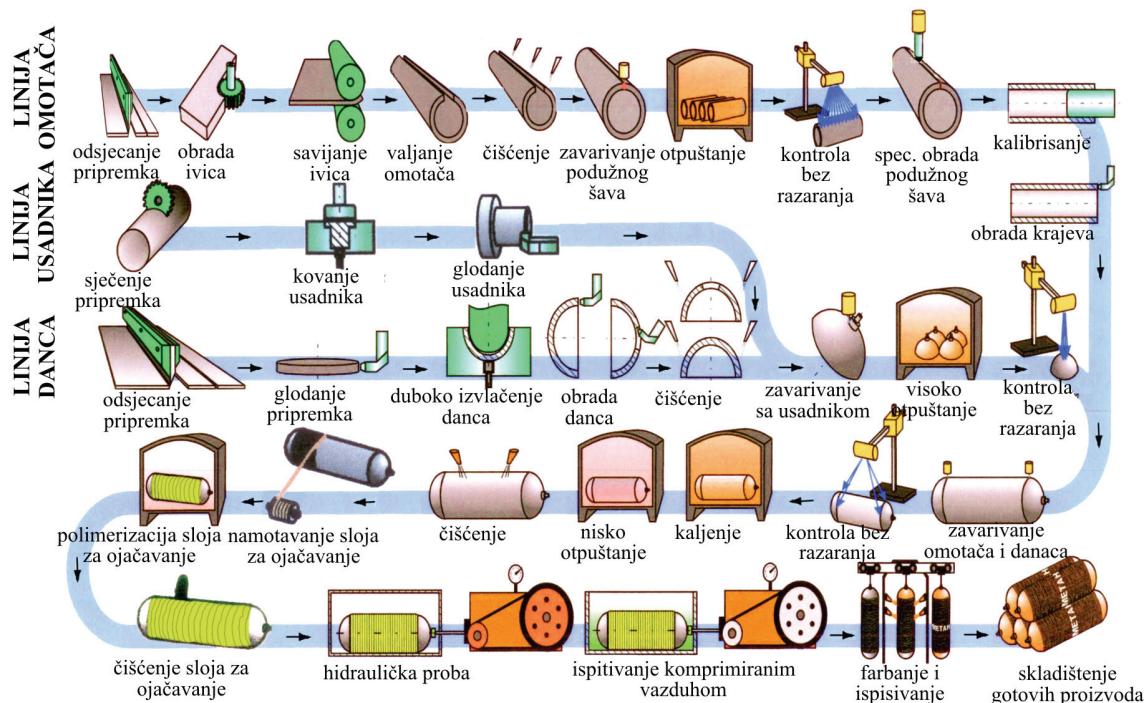
Za izradu posuda, kao osnovni materijal koristi se čelik sa sadržajem ugljika  $0,2 \div 0,5\%$ , zatezne čvrstoće  $800 \div 2000$  MPa. Mehaničke osobine metala šava su na nivou karakteristika OM. Režimi zavarivanja posuda pod pritiskom dat je u tabeli 1.

Tabela 1. Režimi zavarivanja posuda pod pritiskom

Debljina materijala	Struja zavarivanja $I$ , A	Napon $U$ , V	Brzina zavarivanja $V$ , m/h	Zaštitna atmosfera (argon), l/h
5,0	180	9	9	9
3,0	130	9	12	10

Primjenom konvencionalnog TIG postupka zavarivanja, pri konstantnoj brzini zavarivanja i protoku zaštitne atmosfere, vrijednost struje zavarivanja i napona neophodno je uvećati za  $1,7 \div 2$  puta. Ovi podaci se baziraju na eksperimentima izvedenim u cilju dobijanja potvrde opravdanosti primjene ATIG postupka zavarivanja.

U poređenju s konvencionalnim TIG postupkom zavarivanja, primjenom ATIG postupka postiže se: povećanje dubine provarivanja čelika  $1,5 \div 3$  puta, smanjuje se širina šava, sitnokristalna dezorjentisana struktura metala šava, a po pokazateljima čvrstoće, plastičnosti i žilavosti zavareni spojevi ne zaostaju za osnovnim metalom.

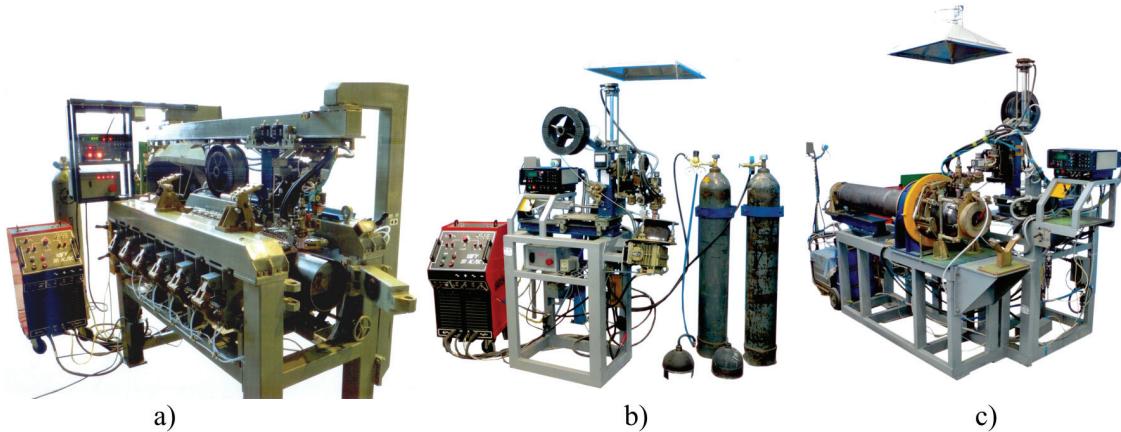


Slika 7. Tehnološka šema izrade laktih kombinovanih zavarenih posuda pod pritiskom

Na bazi ATIG postupka zavarivanja razrađena je tehnologija i tehnološka šema po operacionom razmještaju opreme. Šema pruža mogućnost rasporeda tehnološke opreme u tri međusobno povezana linije (slika 7).

Za realizaciju ATIG postupka zavarivanja, konstruirana je adekvatna nestandardna

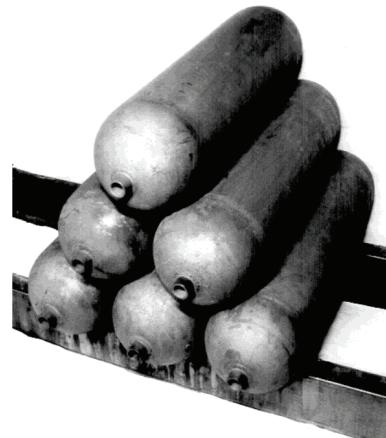
oprema (slika 8) koja sadrži opremu za realizaciju podužnog šava omotača, pripajanje i zavarivanje danca sa usadnikom i omotača sa dancima. Ovaj tehnološki kompleks (tehnologija + oprema) osigurava pripajanje i zavarivanje elemenata za zazorom stranica ne većim od 10 % debljine čelika, zavarene šavove s glatkim prelazima prema osnovnom metalu na nivou šava prve kategorije, a po mehaničkim karakteristikama na nivou osnovnog metala.



Slika 8. Uređaji za zavarivanje podužnog šava omotača a), pripajanje i zavarivanje danca sa usadnikom b) i omotača sa dancima c)

Na slici 9 prikazane su posude pod pritskom koje se primjenjuju kod putničkih automobila, a proizvedeni su primjenom ove tehnologije. Posude sa povećanom visinom i bez promjene prečnika istih, moguće je proizvesti na istoj opremi bez bilo kakvih izmjena. Ovakve posude se koriste za autobuse i druga prometna sredstva u cestovnom transportu roba.

Istovremeno, pri transportu komprimiranog plina na velike udaljenosti, kako pokazuju proračuni, neophodno je kontruirati specijalne sustave opremljene verikalno ili horizontalno postavljenim posudama (slika 10) nosivosti  $20\div30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Kod ovih konstrukcija, odnos mase i korisne zapremine posude izražene koeficijentom  $M/V=0,6\div0,7$  je izuzetno povoljan, pa je iste moguće realizirati s mnogo manjim troškovima nego pri gradnji cjevovoda.



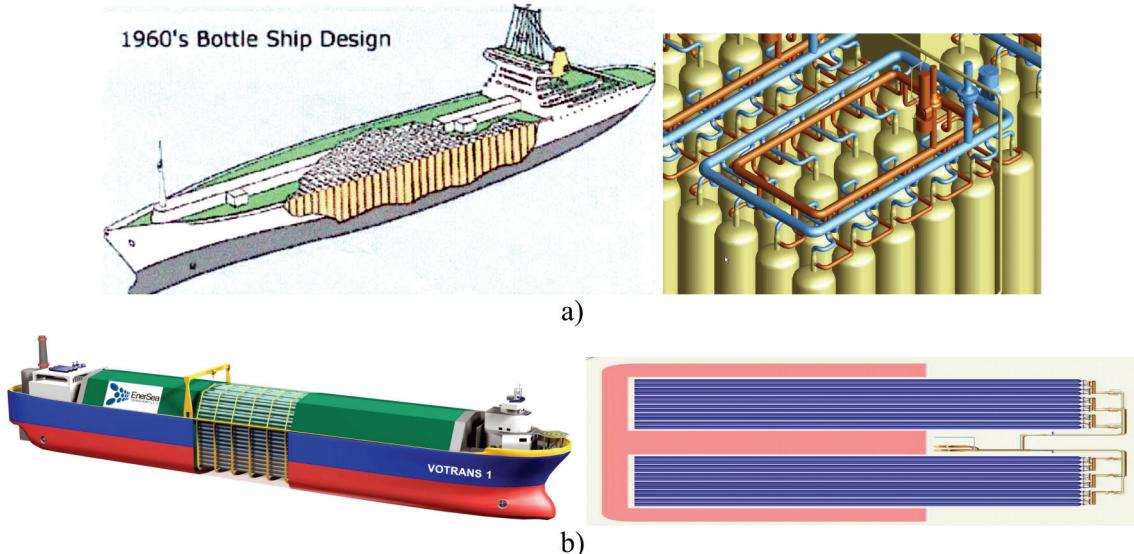
Slika 9. Posude zavarene ATIG tehnologijom

#### 4. ZAKLJUČAK

Dobijeni rezultati omogućili su razradu i primjenu novijih ekonomičnijih tehnologija zavarivanja (ATIG) pri izradi tankozidnih omotača od martenzitnih čelika visoke čvrstoće i posuda visokog pritiska od perlitnih i martenzitnih čelika.

Naponska stabilnost uslijed smanjenja debljine zida omotača posude postiže se njegovim ojačanjem koristeći tehniku namotavanja tankih vlakana gustine i do četri puta manje od gustine čelika. Na taj način, postiže se konstrukcija znatno manje težine.

Primjenom metode elektronske širografije precizno se detektiraju mjesta postojanja koncentratora, a istovremeno, ovom metodom ispitivanja bez razaranja, potvrđuje se efekat ojačanja omotača (iščezavaju zakrivljene interferentne površine).



Slika 10. Varijante bezkontejnetskih komponenti tankera prirodnog plina: a) vertikalni položaj posuda i b) horizontalni položaj posuda

## 5. LITERATURA

- [1] K. Matsuyama. Trend of automobile vehicles and tye joining technologies.Riv. Ital.Soldature. 2007. N5. s. 683- 693.
- [2] И. Н. Карп, Д. А. Егер, Ю. А. Зарубин и др. Состояние и перспективы развития нефтегазового комплекса Украины. Киев. Наукова Думка. 2006 . 303с.
- [3] <http://www.rgf.bg.ac.rs>
- [4] <http://sr.wikipedia.org>
- [5] Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Савицкая и др. Электронная ширография – новый метод диагностики материалов и конструкций. В мире неразрушающего контроля. 2003. 04. с.67-69.
- [6] Б. Е. Патон, М. М. Савицкий, Г. В. Кузьменко. Перспективы применения высокопрочных среднелегированных сталей в сварных баллонах высокого давления. Автомат. сварка 1994 03. с4-9.
- [7] A. M. Savitskiy, E. M. Savitckaja, M. M. Savitsky, D. Bajic. Aktivation of physically-chemical process on welding in protection of shilding gases, 21.Savjetovanje sa međunarodnim učešćem. ZAVARIVANJE-2008, Subotica, 04.06.2007, Serbia, CD-rom.