



Muralimohan Cheepua, Jung Hyun Parkb, Hyo Jin Baekc, Sang Myung Chod

Improvement of hot cracking susceptibility and productivity using Super-TIG welding for 9% Nickel-steel

Poboljšanje osetljivosti na vruće prsline i produktivnost upotrebom Super-TIG zavarivanja čelika sa 9% nikla

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u okviru 72. IIV godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Jula 2019

Rad primljen / Paper received:

Maj 2020.

Ključne reči: Super-TIG zavarivanje, C-dodatni materijal, Vruće prsline, Čelik sa 9% nikla, FCAW

Abstract

9% Nickel steel has been widely used for storage of liquefied gases, oxygen, and nitrogen in competition with aluminium and austenitic alloys due to its low cost. The development of 9% nickel steel with low ductile-brittle transition temperatures reformed the LNG industry by extensive storage and transportation. In recent years, the demand for 9% nickel steel fuel tanks increasing due to the International Maritime Organization regulations on the reduction of sulphur oxides from 3.5% to 0.5%. Hence, the LNG fuel tanks made with 9% nickel steel became a major part of the international energy industry. However, the weldability, fabrication cost, and productivity of these steels are one of the major concerns for manufacturers. Flux cored arc welding (FCAW) process is the most commonly used joining method for 9% nickel steel with Hastelloy fillers. In FCAW, the loss of deposited metal due to inter pass cleaning by grinding action caused to a reduction in total productivity. Demands for higher production, low cost, better mechanical properties, and reliability are the main driving forces for new developments in this area. To achieve these, the most recently developed "Super-TIG Welding" with C-type filler was successfully applied to improve the 9% Nickel steel weldability, productivity and, mechanical and metallurgical properties of the butt welds. In Super-TIG welding, alloy 625 filler was used, which is cheaper and good weldability over the Hastelloy fillers. The weldability evaluation tests resulted in improved resistance to hot cracking susceptibility using Super-TIG welding. The mechanical properties of the Super-TIG welded joints performed better than the FCAW joints. Most importantly, the productivity of the welding

Adresa autora / Author's address:

Department of Materials System Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea
amuralicheepu@gmail.com, bjungsoug@naver.com, cvitx157@nate.com, dpnwcho@pknu.ac.kr

Keywords: Super-TIG Welding, C-Filler, Hot cracking, 9% Nickel steel, FCAW

Rezime

Čelik sa 9% nikla se široko koristi za skladištenje utečjenih gasova, kiseonika i azota u konkurenciji sa aluminijumom i austenitnim čelicima, zbog niske cene. Razvoj čelika sa 9% nikla sa niskim prelaznim temperaturama duktilno-krto, reformisao je TNG industriju obimnim skladištenjem i transportom. Poslednjih godina povećava se potražnja za rezervoarima za gorivo od čelika sa 9% nikla zbog propisa Međunarodne pomorske organizacije o smanjenju sumpornih oksida sa 3,5% na 0,5%. Stoga su rezervoari za TNG gorivo napravljeni od čelika sa 9% niklap ostali glavni deo međunarodne energetske industrije. Međutim, zavarivanje, trošak izrade i produktivnost ovih čelika predstavljaju jednu od glavnih briga proizvođača. Postupak zavarivanja punjenom žicom (FCAW) je najčešće korišćen način spajanja za čelik sa 9% nikla sa Hastelloy dodatnim materijalima. Kod FCAW, gubitak nanetog metala usled međučišćenja postupkom brušenja, uzrokuje smanjenje ukupne produktivnosti. Potražnja za većom proizvodnjom, niskim troškovima, boljim mehaničkim svojstvima i pouzdanošću su glavne pokretačke snage za nova dostignuća u ovoj oblasti. Da bi se ovo postiglo, nedavno razvijeno „Super-TIG zavarivanje“ sa C-tipom dodatnog materijala, uspešno je primenjeno za poboljšanje zavarivanja, produktivnosti i mehaničkih i metalurških karakteristika zavarivanja čelika sa 9% nikla. Pri Super-TIG zavarivanju korišćen je dodatni materijal od legure 625, što je jeftinije i postiće bolje zavarivanje u odnosu na Hastelloy dodatne materijale. Testovi za ocenjivanje zavarivanja rezultirali su poboljšanom otpornošću na vruće prsline pomoću Super-TIG zavarivanja. Mehaničke osobine Super-TIG zavarenih spojeva su bolje od



dramatically improved by Super-TIG welding. Super-TIG welding is capable of producing higher feeding rates with clean beads. Therefore, the alloy 625 C-Filler and avoidance of inter pass cleaning in Super-TIG welding resulting in increased productivity. The newly developed Super-TIG welding achieved many things to obtain satisfactory products in the recent welding industry.

1. Introduction

In recent years, the demand for liquified petroleum gas (LPG) and liquified natural gas (LNG) is continuously increasing for the avoidance of environmental pollution. There are different types of LNG carriers developed for transportation and storage across the countries. According to the International Maritime Organization (IMO), LNG carriers classified into two types, such as independent and membrane types [1]. The 9% Ni steel was initially developed by the International Nickel Company (INC) in 1942. At the first time, 9% Ni steels had applied to the liquid oxygen tanks in the year of 1952, and then it has been used most commonly for the inner walls of LNG fuel tanks ever since as ferritic grade steel for sub-critical temperature applications [2].

Moreover, 9% Ni steel proved to have enhanced notch toughness at liquid nitrogen temperature and to provide a sturdy welded vessel at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ without any heat treatment methods after welding. The excellent of high strength and toughness properties obtained due to the alloying addition of 9% Ni as a primary source of steel. These steels mainly used in connection with the transportation and storage of LNG [3]. The fabrication of these steels raised more significant issues to get defect free joints. Even though it is continuously using for the construction of LNG vessels and its demand does not fall because of their excellent fatigue strength and toughness. The steels of 9% Ni is extensive uses in the vessels as an inner wall of the fuel and storage tank owing to the outstanding fracture toughness at the cryogenic environment of $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]. Therefore, the inner wall of the 9% Ni directly contacted with the LNG. The LNG tank constructed only with welded structures. However, the formation of weld defects such as pores, lack of fusion, undercuts, and inclusions can significantly deteriorate the fracture strength of the welded structures. The evaluation of heat affected zone (HAZ) properties of the variety of steels by experimental and simulation methods, impact tests, and metallurgical characterization investigations performed. The identification of the 9% Ni steels

FCAW spojeva. Ono što je najvažnije, produktivnost zavarivanja dramatično je poboljšana Super-TIG zavarivanjem. Super-TIG zavarivanje može stvoriti veće brzine dodavanja sa čistim zavarima. Stoga legura od 625 C-dodatni materijal i izbegavanje međučišćenja kod Super-TIG zavarivanja rezultuje povećanom produktivnošću. Novorazvijeno Super-TIG zavarivanje postiglo je mnoge stvari kako bi dobilo zadovoljavajuće proizvode u sadašnjoj industriji zavarivanja.

1. Uvod

Poslednjih godina potražnja za tečnim naftnim gasom (TNG) i tečnim prirodnim gasom (TPG) kontinuirano raste kako bi se izbeglo zagađenje životne sredine. Postoje različiti tipovi snabdevanja razvijeni za transport i skladištenje TPG širom zemalja. Prema Međunarodnoj pomorskoj organizaciji (IMO), prevoznici za TPG klasifikovani su u dve vrste, kao što su nezavisni i membranski tip [1]. Čelik 9% Ni je inicijalno razvila Međunarodna kompanija nikla (INC) 1942. godine. Prvo se čelik sa 9% Ni nanosio na rezervoare za tečni kiseonik 1952. godine, a zatim se najčešće koristil za unutrašnje zidove rezervoara za gorivo TPG još od feritne klase čelika za primenu na kritičnim temperaturama [2].

Štaviše, pokazalo se da čelik sa 9% Ni ima poboljšanu zareznu žilavost na pri temperaturi tečnog azota i daje čvrst zavareni sud na $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez ikakvih metoda termičke obrade nakon zavarivanja. Izvrsna svojstva visoke čvrstoće i žilavosti koja su dobijena legiranjem sa 9% Ni iz primarnog čelika. Ovi čelici uglavnom se koriste u vezi s transportom i skladištenjem TPG [3]. Izrada ovih čelika pokrenula je značajnije probleme da se dobiju spojevi bez grešaka, lako se kontinuirano koristi za izgradnju posuda za TPG, njegova potražnja ne opada zbog odlične čvrstoće i žilavosti. Čelici od 9% Ni su u širokoj upotrebi u posudama kao unutrašnji zid rezervoara za gorivo i zahvaljujući izuzetnoj žilavosti loma u kriogenom okruženju od $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]. Stoga je unutrašnji zid čelika sa 9% Ni u direktnom kontaktu sa TPG. Rezervoar za TPG je konstruisan samo kao zavarena konstrukcija. Međutim, nastanak oštećenja zavara kao što su pore, nedostatak stapanja, zajeda i uključaka, može značajno pogoršati čvrstoću na lom zavarenih konstrukcija. Sprovedena su procenjivanja svojstava zona pod uticajem toplote raznovrsnih čelika, eksperimentalnim i simulacionim metodama, ispitivanjima udara i metalurškom karakterizacijom. Identifikovano je da čelik sa 9% Ni ima visok nivo udarnih svojstava na niskim temperaturama, što se zahvaljujući finostrukturnom strukturuom niki-ferita opušta



have a high level of low-temperature notch impact properties, which owes to the fine-grained structure of the nickel-ferrite is relaxed from the embrittled carbide networks. However, the weldability of 9% Ni steel is excellent, when the proper filler materials used for welding. Moreover, this steel is not susceptible to cracking and exhibits the low amount or almost no degradation of weld properties by the influence of heat input during welding. The maximum allowable heat input for manual welding suggested that is about 3 kJ/mm and the range of inter-pass temperature is 100-150 °C. The cooling rate is a critical factor for these heat treated steels to determine the final microstructure of the weld and HAZ regions. The effect of heat input has many effects on the formation of HAZ toughness and differs widely, which indicates the change in the fine microstructure of the HAZ [5, 6].

Other than these process-related problems, the selection of proper filler material is a crucial factor in obtaining high strength joints without any problems. However, there are no proper filler materials developed for this material. The filler materials are selected based on the base material composition that is similar, but not identical to the substrate composition. The most commonly used welding consumables for welding of 9% Ni steel are high Ni alloys such as the Hastelloy and Inconel materials. Even though the mechanical strength of the filler materials is lower than that of the 9% Ni steel, the fractures are ductile and are same at the cryogenic temperatures; it is due to their full austenitic phase [7]. There are different grades of filler materials are recommended for welding of 9% Ni steel such as flux cored arc welding (FCAW), shielded metal arc welding (SMAW), and gas metal arc welding (GMAW), gas tungsten arc welding (GTAW) and submerged arc welding (SAW). The using of FCAW wires for the welding of LNG tanks which are the made of 9% Ni steel has limitation due to the tight control of welding parameters in a narrow range is needed to avoid the formation of hot cracks. Most of the FCAW wires were producing with Hastelloy, which are usually using for welding of 9% Ni steel.

As per the above discussion, the welding of 9% Ni steels is for the construction of LNG fuel tanks usually welded with Ni-Mo or Ni-Cr filler materials. Because of this, the total cost of the welded structures of 9% Ni steel is high compared to the other materials. Some of the studies recommended to reduce the price of the welded structures using the same composition of filler materials, but using these the control of heat input is challenging. The using of higher heat inputs caused the reduction in

iz krtih karbidnih mreža. Međutim, zavarljivost čelika sa 9% Ni je odlična, kada se kprise odgovarajući dodatni materijali. Štaviše, ovaj čelik nije podložan prslinama i pokazuje malu ili gotovo nikakvu degradaciju svojstava usled unosa toplote tokom zavarivanja. Predloženi maksimalni dozvoljeni unos toplote za ručno zavarivanje je oko 3 kJ / mm, a raspon međuslojne temperature je 100-150 °C. Brzina hlađenja je kritični faktor za ove termički obrađene čelike za određivanje konačne mikrostrukture šava i ZUT. Učinak unosa toplote ima brojne efekte na žilavosti ZUT i široko se razlikuje, što ukazuje na promenu fine mikrostrukture ZUT [5, 6].

Pored ovih problema koji se tiču postupka, izbor odgovarajućeg dodatnog, presudan je faktor u dobijanju spojeva visoke čvrstoće bez ikakvih problema. Međutim, za ovaj materijal nisu razvijeni odgovarajući dodatni materijali. Dodatni materijali su izabrani na osnovu sastava osnovnog materijala koji je sličan, ali nije identičan sastavu osnove. Najčešće korišćeni dodatni materijal za zavarivanje čelika sa 9% Ni, su legure sa visokim sadržajem Ni kao što su Hastelloy i Inconel. Iako je mehanička čvrstoća dodatnog materijala manja nego kod čelika sa 9% Ni čelika, lomovi su duktilni i isti su na kriogenim temperaturama; to je zbog njihove potpune austenitne faze [7]. Preporučuju se različite vrste dodatnih materijala za zavarivanje čelika sa 9% Ni, kao što su zavarivanje punjenom žicom (FCAW), obloženom elektrodom (SMAW) i elektrolučno zavarivanje u zaštiti gasa (GMAW), zavarivanje netopivom elektrodom od volframa u zaštiti gasa (GTAW) i zavarivanje pod praškom (SAW). Upotreba punjenih žica za FCAW za zavarivanje rezervoara za TPG koji se izrađuju od čelika sa 9% Ni ima ograničenja zbog oskudne kontrole parametara zavarivanja u uskom rasponu, kako bi se izbeglo stvaranje vrućih prslina. Većina FCAW žica se proizvodi od Hastelloya koji se obično koriste za zavarivanje čelika sa 9% Ni.

Prema gornjoj diskusiji, zavarivanje čelika sa 9% Ni namenjeno je za izradu rezervoara za TPG gorivo, obično zavarenih sa Ni-Mo ili Ni-Cr dodatnim materijalima. Zbog toga su ukupni troškovi zavarenih konstrukcija od čelika sa 9% Ni, visoki u poređenju s drugim materijalima. Neke studije preporučuju da se smanje cene zavarenih konstrukcija koristeći isti sastav dodatnih materijala, ali upotrebom ovih materijala, kontrola unosa toplote postaje izazov. Upotreba većih unosa toplote uzrokovala je smanjenje žilavosti metala šava. Može biti povezana sa zadržanom mikrostrukturom austenita u metalu šava. Međutim, kontrola unosa toplote u



the toughness of the weld metal. It may be related to the retained austenite microstructure in the weld metal. However, the control of heat input in the conventional welding process of FCAW and GTAW is difficult due to the higher requirements of deposition rates. To make it easier the control of heat input rate with respect to deposition rate "Super-TIG" welding process has been investigated. Super-TIG welding is a newly developed TIG/GTAW welding process with the using of C-Filler instead of circular filler. The Super-TIG welding was invented in 2013 by Sang-Myung Cho, Super-TIG Welding Co. Ltd. Korea [8-10]. Super-TIG welding applied successfully to various applications such as wire arc additive manufacturing, thick plate welding of Ni-based alloys, stainless steel alloys, pipe welding, overlay clad welds with high deposition and with moderate heat inputs. The feature of Super-TIG welding is high productivity compared to conventional TIG/GTAW welding processes [11].

The present investigation aims to enhance the productivity of the welded structures of 9% Ni steel using Super-TIG welding. In addition to this, the problem of hot cracks in the weld metal minimized with the deposition of clean weld metal and reduction of low-temperature inclusions generation by Super-TIG welding. If Super-TIG welding applied to 9% Ni steel, it could adopt low-cost Inconel filler instead of expensive Hastelloy, which is using for FCAW. Moreover, the productivity of Super-TIG welding determined over the FCAW. The Fisco hot crack tests were conducted to evaluate the hot crack in the Super-TIG and FCAW weld metal. The superior welds without hot cracks and high production rate obtained by using a newly developed process of Super-TIG welding.

2. Experimental Procedure

In the present study, the base material of 9% Ni steel with a thickness of 20 mm used for butt welding and Fisco hot crack tests. The joint design for butt welding prepared with the groove angle of 60°, the width of plates is 300 mm, the root gap between plates is 3 mm, and a length of plates is 600 mm. Fig. 1 shows the butt joint configuration and macrostructure of the final welded joint. The back side of the weld such as root weld was deposited on the groove which was applied a process of air gouging. The joints were made using of Super-TIG welding with a Alloy 625 C-Filler (Super-TIG welding Co. Ltd. Korea) with a shielding gas of Ar+7%H₂. The deposition completed for welding within 6 passes on the front side and 2 passes on the backside.

konvencionalnom postupku zavarivanja FCAW i GTAW je teška zbog većih zahteva brzina deponovanja. Da bi se olakšala kontrola brzine unosa toplote u odnosu na brzinu deponovanja, ispitan je „Super-TIG“ postupak zavarivanja. Super-TIG zavarivanje je novorazvijeni TIG / GTAW postupak zavarivanja sa korišćenjem C-dodatnog materijala umesto kružnog dodatnog materijala. Zavarivanje Super-TIG izumeo je 2013. Sang-Miung Cho, kompanija Super-TIG Welding Co. Ltd. Korea [8-10]. Super-TIG zavarivanje uspešno se primenjuje u raznim primenama kao što su aditivna proizvodnja elektrolučnim zavarivanjem žicom, debelih ploča od legura na bazi Ni, nehdajućeg čelika, zavarivanje cevi, izardi plakatura sa velikim brzinama deponovanja i sa umerenim unosom toplote. Karakteristika Super-TIG zavarivanja je visoka produktivnost u poređenju sa konvencionalnim postupcima zavarivanja TIG / GTAW [11].

Cilj ovog istraživanja je povećanje produktivnost zavarenih konstrukcija od čelika sa 9% Ni koristeći Super-TIG zavarivanje. Pored toga, problem vrućih prslina u metalu šava, sveden je na minimum problem sa deponovanjem čistog metala šava i smanjenjem stvaranja niskotemperaturnih uključaka. Ako bi se Super-TIG zavarivanje primenjivalo na čelik sa 9% Ni, umesto skupog Hastelloy-a, koji se koristi za FCAW, mogao bi da se koristi jeftiniji Inconel. Štaviše, produktivnost Super-TIG zavarivanja određena je kao veća od FCAW. Srovedeni su Fisco testovi kako bi se procenile vruće prsline u metalu šava izvedenih postupcima Super-TIG i FCAW. Vrhunsko zavarivanje bez vrućih prslina i visoke proizvodne stope dobijene su korišćenjem novorazvijenog postupka zavarivanja Super-TIG.

2. Eksperimentalni postupak

U ovoj studiji, osnovni materijal čelik sa 9% Ni, debljine 20 mm koristi se za sučeono zavarivanje i Fisco test na vruće prsline. Dizajn spojeva za sučeono zavarivanje pripremljen je sa uglom žljeba od 60°, širina ploča je 300 mm, razmak između ploča je 3 mm, a dužina ploča 600 mm. Sl. 1 prikazuje konfiguraciju sučeonog spoja i makrostrukturu konačnog zavarenog spoja. Na konra stranu šava, kao koreni zavar napravljen je žlijeb koji je primijenjen postupkom žljebljenja vazduhom. Spojevi su napravljeni korišćenjem Super-TIG zavarivanja sa leguom 625 C-dodatnim materijalom (Super-TIG zavarivanje Co. Ltd. Koreja) sa zaštitnim gasom Ar + 7% H₂. Nanošenje je završeno zavarivanjem u 6 prolaza na prednjoj strani i 2 prolaza na kontra strani.

-Kraj 1. dela NASTAVAK U SLEDEĆEM BROJU