

Hayato Baba, Tetsuo Era, Tomoyuki Ueyama  
Manabu Tanaka

ISSN 0044-1902  
UDK 621.182  
621.791.75

## RAZVOJ VISOKOUČINSKOG ZAVARIVANJA ČELIKA ZA DEBELE LIMOVE PRIMJENOM ZAKOPANOG ELEKTRIČNOG LUKA VELIKE STRUJE

### Ključne riječi:

- zakopani luk
- duboka penetracija
- "D-Arc"
- stabilizacija

### Key words:

- buried arc
- deep penetration
- "D-Arc"
- stabilization

### Schlüsselwörter:

- vergrabener Lichtbogen
- bessere Penetration
- "D-Arc"
- Stabilisation

### Adresa autora (Author's address):

Hayato Baba, Tetsuo Era,  
Tomoyuki Ueyama  
Welding Products Division,  
DAIHEN Corporation  
Japan  
Manabu Tanaka  
Joining and Welding Research Institute,  
University, Japan

### Primljeno (Received):

2017-08-10

### Prihvaćeno (Accepted):

2017-08-31

### Prethodno priopćenje

Zakopani električni luk (engl. *Buried arc*) je općenito poznat kao jedan od fenomena ponašanja električnog luka pri kojem je električni luk zajedno s vrhom rastaljene žice postavljen ispod razine površine rastaljenog metala zavara. S obzirom na to da je izvor topline postavljen dublje u odnosu na konvencionalan električni luk, može se postići veća penetracija, što ovaj modalitet električnog luka čini prikladnim za zavarivanje debljih materijala. U ovom radu je predstavljen sustav za zavarivanje "D-Arc" koji koristi zakopani luk te su dani primjeri primjene na različitim oblicima spojeva.

### Preliminary note

#### DEVELOPMENT OF HIGH EFFICIENCY WELDING FOR THICK PLATE STEEL USING STABILIZED HIGH CURRENT BURIED ARC

The buried arc phenomenon is conventionally known as one of arc phenomena in gas shielded arc welding in which an arc is generated with the wire tip position being deeper than the molten metal surface. Since heat input by the arc is applied to a deeper portion of the base material than the usual arc phenomenon, very deep penetration can be obtained. In this article welding system based on buried arc called "D-Arc" is presented with results of application on different weld joint types.

### Vorläufige Mitteilung

#### DIE ENTWICKLUNG DER HOCHEFFEKTIVEN SCHWEIß PROZEDUR FÜR DICKE STÄHL MIT STABILISIERTEN VERGRABENEN HOCHSTROMBOGEN

Der vergrabene Lichtbogen (engl. *Buried arc*) ist generell bekannt als ein Phänomen wobei der Lichtbogen beim Schweißen, zusammen mit der Elektroden spitze, sich unterhalb der Ebene des Schmelzmetalls befindet. Dabei kann man eine bessere Penetration erschaffen und deshalb ist so ein Prinzip für dickere Stahlbleche besser geeignet. In dieser Arbeit ist das Schweißsystem „D-Arc“, der den vergrabenen Lichtbogen benutzt, beschrieben und an mehreren Verbindungen als Beispiel gezeigt.

## 1. UVOD

Razvoj inverterskih izvora struje za zavarivanje omogućio je nove alternative pri kontroli procesa zavarivanja. U ovom članku predstavljen je stabilizirani zakopani električni luk kao primjer inovativne kontrole procesa zavarivanja te razvoj visokoučinskog zavarivanja čeličnih limova većih debljina.

Zakopani električni luk (engl. *Buried arc*) općenito je poznat kao jedan od fenomena ponašanja električnog luka te postoje primjeri u zavarivačkoj literaturi [1]. Iako nije precizirana jasna definicija, podrazumijeva se da je to fenomen pri kojem je električni luk zajedno s vrhom rastaljene žice postavljen ispod razine površine rastaljenog metala zavara, kao što je prikazano na slikama 1. i 2. Vidljivo je, s obzirom na to da je izvor topline postavljen dublje u odnosu na konvencionalan električni luk, kako se može postići veća penetracije, što ovaj modalitet električnog luka čini prikladnim za zavarivanje debljih materijala.

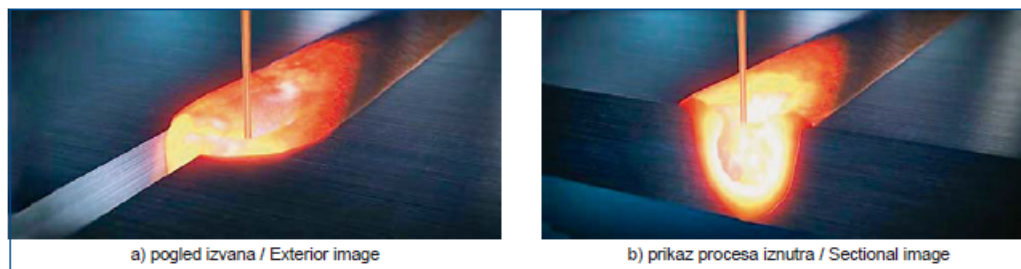
Za zavarivanje debelih limova u praksi se primjenjuju razni postupci poput elektro-lučnog zavarivanja pod praškom ili troskom, elektroplinskog zavarivanja, zavarivanja trenjem i sl. Posebno su dobro istraženi zavarivanje laserom te hibridni postupci [2-6]. Drugi visokoučinski postupak je zavarivanje plazmom [7] kojim se može postići zavarivanje sučeljenog spoja punom penetracijom u jednom prolazu primjenom tzv. ključanice. Primjena plazme za debele limove je tako-

đer istražena [8,9]. Svi ovi postupci vrlo su učinkoviti te je moguće ostvariti dobru kvalitetu zavara na debelim materijalima, ali imaju puno ograničenja poput položaja i smjera zavarivanja, oblika pripreme itd.

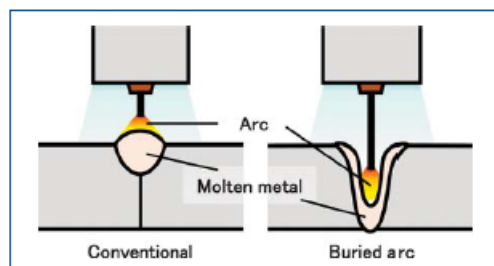
S druge strane, MAG postupak je relativno prilagodljiv te se uvodi kada nabrojani visokoučinski postupci zbog svojih ograničenja ne mogu biti primijenjeni. Međutim, za zavarivanje debelih limova MAG nije dovoljno učinkovit, pri čemu se mogu navesti tri glavna razloga:

- potrebno je zavarivanje u više prolaza
- potrebna je velika količina dodatnog materijala (zbog pripreme)
- deformacije komada su vrlo velike.

Kao učinkovito rješenje navodi se povećanje količine nataljenog metala po prolazu ili smanjenje kuta otvora žlijeba [10]. Međutim, i dalje ostaje problem "plitke" penetracije zbog čega priprema mora biti po čitavoj debljini materijala uz povećani kut otvora žlijeba. To rezultira povećanom potrošnjom žice te posljedično i većim deformacijama. Svi ovi nedostaci mogu se ukloniti primjenom zakopanog luka u MAG postupku, uz postizanje učinkovitog procesa i kvalitetnog zavarenog spoja. Međutim, zakopani luk je podložan nestabilnom ponašanju i povremenoj pojavi kratkih spojeva tako da je stabilizacija samog procesa vrlo zahtjevana, posebno u području jakih struja. Zbog toga i ograničenja u primjeni, zakopani luk nije u prošlosti često upotrebljavan u proizvodnji.



Slika 1. Prikaz zakopanog luka  
Figure 1. CG image of buried arc

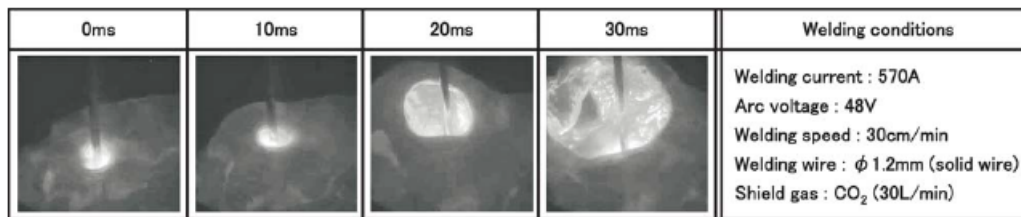


Slika 2. Shematski prikaz zakopanog luka  
Figure 2. Schematic image of arc phenomena

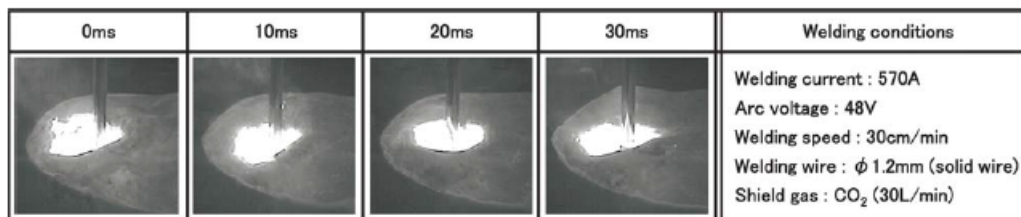
U posljednje vrijeme načinjena su istraživanja na području tehnika stabilizacije zakopanog luka [11] pri struji od 300 A i jednoprolaznom zavarivanju na limu debljine 10 mm [12]. Autori ovog članka nastavili su s istraživanjima na stabilizaciji zakopanog luka pri struji višoj od 500 A te većim debljinama pa je razvijen visokoučinkoviti sustav nazvan «D-Arc».

## 2. STABILIZACIJA ZAKOPANOG LUKA VISOKE STRUJE

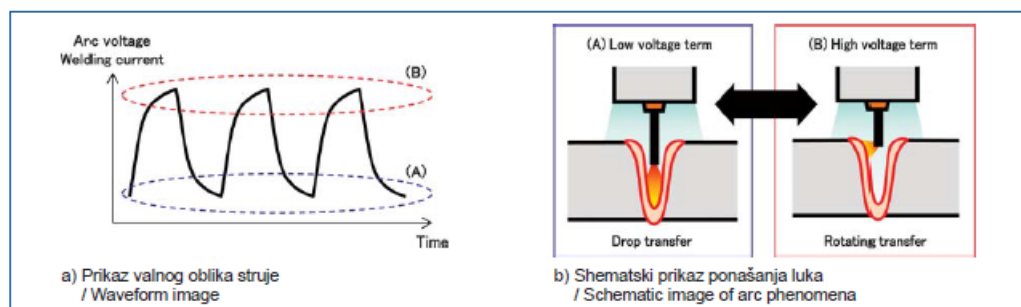
Na slici 3. prikazani su rezultati snimanja zakopanog luka pri strujama višim od 500 A, pri čemu je korišten



Slika 3. Nestabilno ponašanje zakopanog luka  
Figure 3. HSV observation result of unstable buried arc



Slika 4. Ponašanje stabiliziranoga zakopanog luka pomoću niskofrekventno modulirane kontrole napona  
Figure 4. HSV observation result of stable buried arc with low-frequency modulated voltage control



Slika 5. Mehanizam stabilizacije zakopanog luka pomoću niskofrekventno modulirane kontrole napona  
Figure 5. Arc stabilization mechanism in low-frequency modulated voltage control

izvor struje s ravnom značajkom (CV). Otvaranje šupljine unutar rastaljenog metala (nazvanog zakopani prostor) prilično je nestabilno i pokazuje intenzivno gibanje taline. Pretpostavlja se da je uzrok ovakvog ponašanja u ponavljajućem ciklusu, kako slijedi:

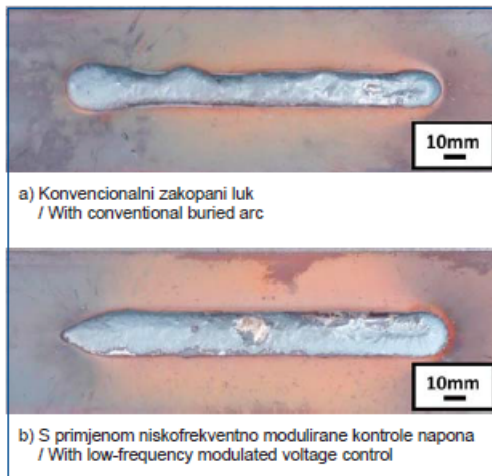
- 1) rastaljeni metal na bočnom zidu zakopanog prostora se približava žici
- 2) da bi se održala duljina luka dolazi do porasta struje
- 3) sile u luku rastu u dubljem dijelu taline te dolazi do brzog širenja otvora.

Drugim riječima, smatra se da zakopani luk postaje nestabilan u području visoke struje, ako nema odgovarajućeg tlaka na rastaljeni metal bočnog zida zakopanog prostora, što je posebno naglašeno blizu površine taline.

Zbog toga je razvijen valni oblik struje koji kontinuirano pridržava rastaljeni zid zakopanog prostora uz cikličko ponavljanje vrijednosti struje i napona. Takav valni oblik je u biti niskofrekventno modulirana kontrola napona kojim se periodično mijenja oblik izlaznog napona [13]. Zakopani luk s takvom vrstom kontrole prikazan je na slici 4., dok je na slici 5. prikazan mehanizam stabilizacije.

Na slici 5.a prikazan je valni oblik struje i napona pri niskofrekventno moduliranoj kontroli napona. Namješteni napon se mijenja frekvencijom 100 Hz, pri čemu se također mijenja i struja ovisno o opterećenju na sekundarnoj strani izvora struje za zavarivanje. Slika 5.b prikazuje ponašanje luka označeno isprekidanom linijom (A) i (B) na slici 5.a. Isprekidana linija (A) prikazuje područje niskog, a linija (B) visokog napona. U

području (A) žica je postavljena dublje u talinu, pri čemu se tali dno šupljine, a prijenos metala je u obliku kapljice. S druge strane, u području (B), vrh elektrode je postavljen relativno pliće, pri čemu se luk uspostavlja na zidove šupljine. Rastaljeni metal na zidnoj stijenci zakopanog prostora je potisnut od strane luka, pri čemu se održava rotirajući luk. Kombinacijom ova dva načina rada ponašanje luka i taline se stabilizira, kako je prikazano na slici 4., dok se na slici 6. vidi poboljšani izgled zavara.



Slika 6. Usporedba izgleda zavara  
Figure 6. Comparison result of bead appearance

### 3. RAZVOJ SUSTAVA ZA ZAVARIVANJE ZAKOPANIM LUKOM VISOKIM STRUJAMA

#### 3.1. Konfiguracija sustava

Na temelju informacija i znanja iz opisanog istraživanja razvijen je robotizirani sustav "D-Arc" prikazan na slici 7.

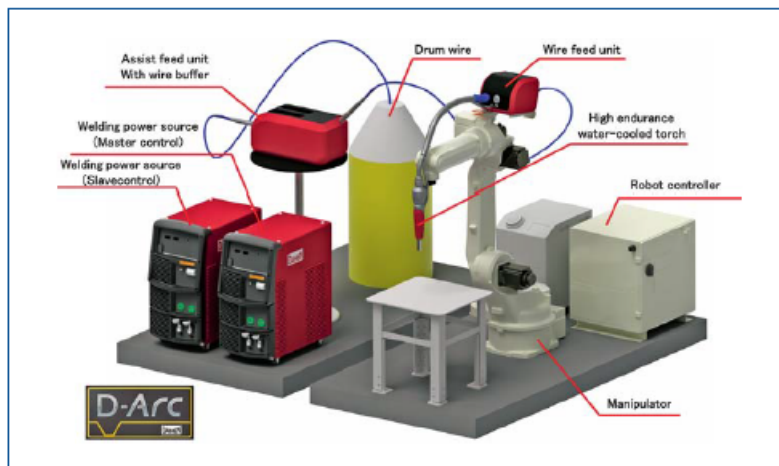
Sustav uz robot čine dva izvora struje za zavarivanje koji maksimalno mogu isporučiti struju do 1000 A, pri čemu je na glavni izvor struje spojeno modularno niskofrekventno upravljanje naponom kako bi se izračunala trenutna struja, ovisno o odgovarajućem nagibu vanjske značajke. Dodavač žice s maksimalnom brzinom dodavanja žice od 100 m/min smješten je na tijelu robota i spojen zajedno s međuspremnikom žice. Pištolj za zavarivanje je hlađen vodom i izrađen aditivnom 3D tehnologijom na bazi bakrene legure te je moguće opterećenje od 650 A pri 100 % intermitenciji.

#### 3.2. Usporedba zavarenih spojeva načinjenih sustavom "D-Arc" i konvencionalnim MAG postupkom

Na slici 8. prikazana je usporedba sučeljenog zavara debljine 19 mm, načinjenog primjenom sustava "D-Arc" i konvencionalnim MAG zavarivanjem u više prolaza. Dodatni materijal je puna žica debljine 1,4 mm klasificiran kao JIS YGW11 (AWS ER 70-S, EN G 42 3 C G0).

Pri konvencionalnom MAG zavarivanju potrebno je 6 prolaza, dok se sustavom "D-Arc" postiže puna penetracija u samo jednom prolazu, što dokazuje višestruku učinkovitost.

Otvor žlijeba od 35° s visinom grla žlijeba od 0 mm, primijenjen za "D-Arc", baziran je na standardima



Slika 7. Konfiguracija visokoučinkovitoga robotiziranog sustava za zavarivanje "D-Arc"  
Figure 7. Configuration image of the new high efficiency welding system "D-Arc"



JARAS 1012 (WES 8703):2004 i JARAS 1013 (WES8704):2004. Površina žlijeba smanjena sa 123,5 mm<sup>2</sup> na 38,5 mm<sup>2</sup>, što odgovara jednoj trećini konvencionalne pripreme. Kutna deformacija kod sustava "D-Arc" smanjena je sa 7° na 1°, što čini samo 1/7 u odnosu na klasičnu pripremu. Dodatno, mehanička svojstva spoja su dobra [14], što potvrđuje kvalitetu zavara uz visoku učinkovitost.

#### 4. PRIMJERI PRIMJENE SUSTAVA "D-ARC"

Primjeri zavarenih spojeva načinjenih sustavom "D-Arc" prikazani su na slikama 9. – 11. Slika 9. prikazuje primjer zavarivanja sučeljenog spoja debljine 19 mm i otvorom žlijeba 25 mm, bez razmaka na keramičku podlogu. Postignut je dobar izgled zavara sa strane lica i korijena. Slika 10. prikazuje primjer zavarivanja sučeljenog spoja debljine 35 mm uz X-pripremu i visinu grla žlijeba 13 mm. Zavarivanje je provedeno obostrano u vodoravnom položaju. S obzirom na to da je primijenjena veća visina grla žlijeba moguća je veća penetracija bez opasnosti od progaranja te je izbjegnuta primjena podloška.

Na slici 11. prikazan je primjer pune penetracije na T spoju, bez dodatne pripreme i bez razmaka. Zavarivanje je provedeno s obje strane u vodoravnom polo-

žaju uz okretanje radnoga komada. Uz ovakvu pripremu izbjegnut je rizik od progaranja.

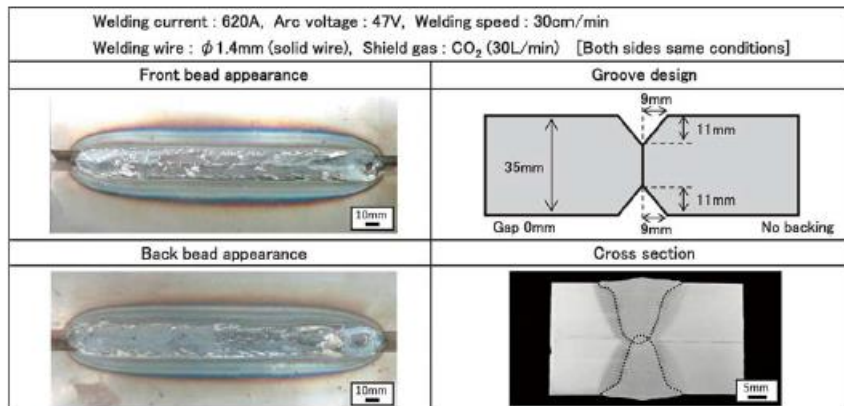
Ovi primjeri pokazuju da je primjena sustava "D-Arc" raznolika i za očekivati je u budućnosti proširenje vrsta i oblika spojeva.

	Conventional	D-Arc
	Welding current : 300A Arc voltage : 30V Welding speed : 30cm/min Welding wire : $\phi$ 1.4mm (solid wire) Shield gas : CO <sub>2</sub> (30L/min)	Welding current : 620A Arc voltage : 44V Welding speed : 30cm/min Welding wire : $\phi$ 1.4mm (solid wire) Shield gas : CO <sub>2</sub> (30L/min)
Groove shape	 Gap 4mm, Steel backing	 Gap 1mm, Copper backing
Cross section		
Number of Pass	6 passes	1 pass
Groove area	123.5 mm <sup>2</sup>	38.5 mm <sup>2</sup>
Angular distortion	7°	1°

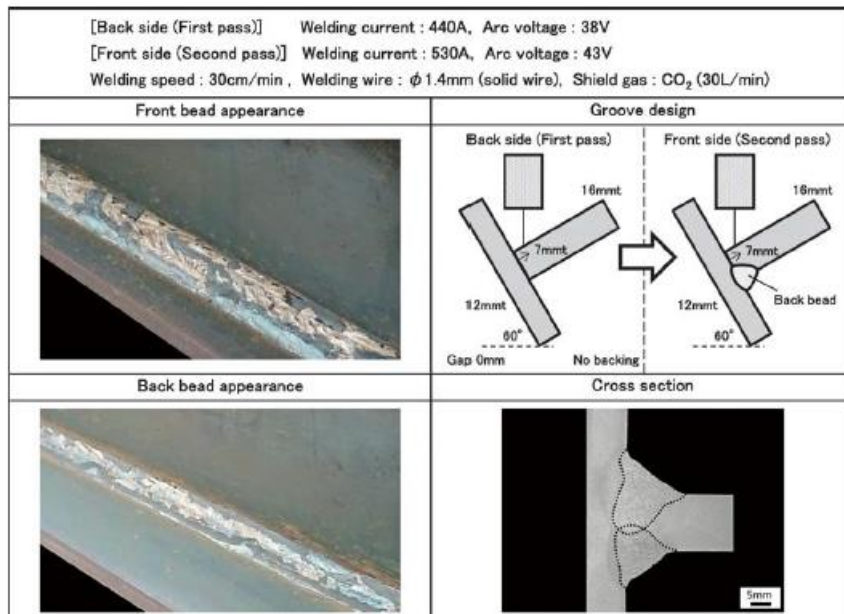
Slika 8. Usporedba presjeka zavara načinjenih konvencionalnom i "D-Arc" tehnologijom  
Figure 8. Comparison result of the cross section between the multi-layer welding and "D-Arc"

Welding current : 580A, Arc voltage : 48V, Welding speed : 24cm/min Welding wire : $\phi$ 1.4mm (solid wire), Shield gas : CO <sub>2</sub> (30L/min)	
Front bead appearance 	Groove design  Gap 0mm Ceramic backing
Back bead appearance 	Cross section 

Slika 9. Primjer sučeljenog zavara debljine 19 mm uz primjenu keramičkog podloška  
Figure 9. Example of butt welded joint with plate thickness of 19 mm using ceramic backing



Slika 10. Primjer sučelnog spoja na limu debljine 35 mm  
 Figure 10. Example of butt welded joint with plate thickness of 35 mm



Slika 11. Primjer pune penetracije T spoja debljine lima 16 mm  
 Figure 11. Example of full penetration T joint with plate thickness of 16 mm

## 5. ZAKLJUČCI

Primjena zakopanog luka pri MAG zavarivanju u zaštiti 100 % CO<sub>2</sub> uz primjenu pune žice moguća je uz korištenje novorazvijenoga valnog oblika struje za stabilizaciju procesa. Novi sustav za visokoučinsko zavarivanje "D-Arc" karakterizira sljedeće:

- 1) novorazvijena niskofrekventno modulirana kontrola napona postiže stabilan zakopani luk s dobrim izgledom zavara i dubokom penetracijom
- 2) visokoučinski sustav "D-Arc" omogućuje zavarivanje nelegiranih čelika debljine 19 mm u jednom prolazu
- 3) moguće su razne primjene poput postizanja pune penetracije prilikom obostranog zavarivanja na limu 35 mm i na T spoju debljine 16 mm.



LITERATURA

- [1] Japan Welding Society (2005) Advanced Welding & Joining Technologies. SANPO PUBLICATIONS: 48. (in Japanese)
- [2] J.K. Kristensen (2009) Thick Plate CO<sub>2</sub>-Laser Based Hybrid Welding of Structural Steels. Welding in the World Volume 53 Issue 1: 48-57.
- [3] Steve Shi et al. (2007) Laser and hybrid laser-MAG welding of steel structures for shipbuilding. International Forum on Welding Technologies in Shipping Industry held in Shanghai on 16-18 June 2007.
- [4] Eakkachai Wainsiruk (2015) Oblique laser irradiation technique for vertical welding of thick steel plates employing hot-wire laser welding. Quarterly Journal of the Japan Welding Society Vol. 33 No.4: 326-331.
- [5] Ruoyang Li et al. (2014) A study of narrow gap laser welding for thick plates using the multi-layer and multi-pass method. Optics & Laser Technology Volume 64, Dec: 172-183.
- [6] Y Shimokusu et al. (2003) Application of pulse-modulated high-power YAG laser to welding of heavy plates. Welding International Volume 17 Issue 7: 534-540.
- [7] G. Zeng. (1989) Plasma arc welding principle and application. Welding and Cutting Vol.9 No.1: 38-44.
- [8] X. R. Li et al. (2012) Double stage plasma arc pipe welding process. Welding Journal Vol. 91:346-353.
- [9] J. S. Shih et al. (2012) Multi-objective process optimization of pulsed plasma arc welding SS400 steel pipe with foamed aluminum liner. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. Vol.6 No.2: 222-235.
- [12] Masatoshi Murayama et al. (2015) Narrow Gap Gas Metal Arc (GMA) Welding Technologies. JFE TECHNICAL REPORT 20 (Mar.): 147-153. (in Japanese)
- [11] Noriyuki Muraoka et al. (2015) Effect of Power Output Modulation on Weld Profile in CO<sub>2</sub> Welding. Preprints of the National Meeting of JWS 2015s: 134-135. (in Japanese)
- [12] Hirota Adachi et al. (2006) Metal Transfer Phenomena in High-current MAG Welding. Preprints of the National Meeting of JWS 2006f: 112-113. (in Japanese)
- [13] Hayato Baba et al. (2016) Study on arc stabilization for high current buried arc – Development of GMA welding system with ultra-high wire feed rate (first report) - . Preprints of the National Meeting of JWS 2016s: 170-171. (in Japanese)
- [14] Hayato baba (2016) Thick plate welding by "D-Arc welding" using high current buried arc. Welding technology Vol. 64 No. 9: 78-82. (in Japanese)

Production, design, maintenance and servicing of equipment and devices in the process, food, pharmaceutical and chemical industries.

**TOMO VARGA**

TOMO VARGA d.o.o., Croatia, Zagreb, Cmojezerska 20, separated section Ravnice 4, 49 210 Zabok  
 Mob. +385 91 3451-303, Fax. +38549249-100, E-mail: mario.bozic@tomovarga.hr, tomovarga@tomovarga.hr