



*Dipl.-Ing. Johannes Schäfer, Dipl.-Ing. Konrad Willms, Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen*

## **Pulsed submerged arc welding process in order to reduce the hydrogen input during the welding of high-strength fine-grained structural steels**

### **Postupak pulzirajućeg zavarivanja pod praškom u cilju smanjenja unosa vodonika pri zavarivanju finostrukturnih konstrukcionih čelika povišene čvrstoće**

**Originalni naučni rad / Original scientific paper**

**UDK / UDC: Weld World (2014) 58:491–497;**

**DOI 10.1007/s40194-014-0132-0**

**Rad primljen / Paper received:**

Oktobar 2015.

**Adresa / Author's :**

*Dipl.-Ing. Johannes Schäfer,*

*Dipl.-Ing. Konrad Willms,*

*Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen*

*Prevod izvornog rada na srpski jezik: Milica Antić, dipl.ing*

**Rad preuzet iz časopisa Welding and Cutting 14 (2015)**

**No.4 uz saglasnost autora.**

#### **Abstract**

The utilisation of high-strength fine-grained structural steels for applications in steel construction, vehicle construction and pipeline construction is increasing continuously. In addition to the substantial weight savings by reducing the wall thicknesses, the resource consumption and thus the production costs can be reduced considerably by utilising these steels in welded structures. One problem resulting from the use of a submerged arc welding process for such applications is the danger of hydrogen input, particularly due to the use of the welding fluxes. In this study, the decrease in the hydrogen input into the weld metal of high-strength fine-grained structural steels was investigated by using a submerged arc welding process in a pulse-modulated form of direct current. In this respect, it was possible to observe that the cavity is not formed up to its final size due to the constant change between a pulse condition and a basic condition within the basic phase. This results in a smaller cavity volume with a lower partial hydrogen pressure on average and thus also in a reduction in the contact area to hydrogen sources.

#### **1. Uvod**

Značaj finostrukturnih konstrukcionih čelika povišene čvrstoće u čeličnim konstrukcijama, konstrukcijama vozila i cevovoda kontinualno raste zbog uštede na težini. Međutim, korišćenje ovih čelika je povezano sa pogodnim procedurama spajanja kojima bi se mogao postići zahtevani kvalitet izrade uz

#### **Rezime**

Korišćenje finostrukturnih konstrukcionih čelika povišene čvrstoće za čelične konstrukcije, konstrukcije vozila i cevovoda kontinualno raste. Dodatno, osnovna ušteda na težini, smanjenjem debljine zida, potrošnje resursa i čak proizvodnih troškova može se značajno smanjiti korišćenjem ovih čelika u zavarenim konstrukcijama. Jedan problem koji može da se javi pri korišćenju postupka zavarivanja pod praškom za takve primene je opasnost od unosa vodonika, posebno zbog korišćenja praškova za zavarivanje. U ovoj studiji se istražuje smanjenje unosa vodonika u metal šava finostrukturnih konstrukcionih čelika povišene čvrstoće korišćenjem postupka zavarivanja pod zaštitom praška u impulsno-modulovanom obliku jednosmerne struje. Sa tog stanovišta moguće je postići to da se ne stvaraju šupljine njihove konačne veličine usled konstantne promene između pulzirajućih uslova i baznih uslova. Ovo rezultuje u manjoj zapremini sa nižim parcijalnim pritiskom vodonika od srednje vrednosti uz redukciju kontaktne površine izvora vodonika.

odgovarajuću ekonomičnost. Kao uspostavljeni postupak spajanja, trenutno je najviše korišćen postupak zavarivanja u zaštiti gasa (GMA). Bilo bi vredno težiti ka dostupnosti dodatnih procedura izrade s višim stopama brzina deponovanja i povećane pouzdanosti procesa. Uzimajući u obzir

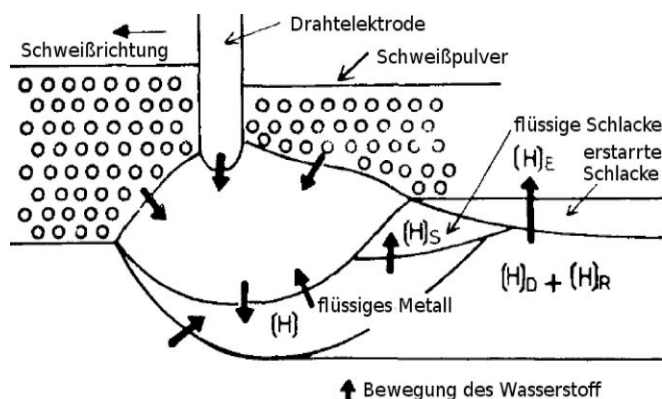


ove kriterijume, zavarivanje pod praškom je izuzetno pogodan proces jer pokazuje, ne samo lako rukovanje i vrlo visoku pouzdanost, već takođe i velike brzine deponovanja i širok opseg primene. Međutim, jedan nedostatak postupaka zavarivanja topljenjem, je uvek uzrokovan vodonikom, koji je ugrađen u metal šava i može da dovede do hladnih prslina posle zavarivanja. Dok zavarivanje finostrukturnih konstrukcionih čelika povišene čvrstoće predstavlja ekstremno povećanje opasnosti od nastanka prslina, samo postupci zavarivanja koji količinu ugrađenog vodonika mogu da održavaju na minimumu se mogu ovde koristiti. Međutim, veća količina apsorbiranog vodonika može da se očekuje u slučaju postupaka zavarivanja kod kojih postoje mineralne šljake, npr. zavarivanje u zaštiti praška (SA) ili ručnog elektrolučnog zavarivanja. Kako bi se ipak iskoristile prednosti EPP zavarivanja u slučaju ovih aplikacija, potrebno je preduzeti mere u vezi postupka kako bi se smanjila količina vodonika koji bi bio upijen u rastoplenu kupku, za vreme zavarivanja. Zato je jedna modifikacija postupka koja može da dovede do povećanja pouzdanosti tokom EPP zavarivanja finostrukturnih konstrukcionih čelika povišene čvrstoće, obuhvaćena projektom istraživanja koji je vodio i finansirao AiF na odeljenju za zavarivanje i spajanje "(ISF)" RWTH Univerziteta u Ahenu.

## 2. Cilj i primena

Ova modifikacija postupka je namenjena za korišćenje impulsno modulovane jednosmerne struje tokom EPP zavarivanja u cilju postizanja smanjenja zapremine šupljine i, kao rezultat toga, unosa vodonika u metal šava finostrukturnih konstrukcionih čelika povišene čvrstoće. Ovo je namenjeno za proširenje primenljivosti EPP zavarivanja sa velikom ekonomičnošću čak i kod čelika koji imaju napon tečenja od oko 690 MPa i

sada imaju posebno izraženu opasnost od nastanka prslina. Međutim, istovremeno, opasnosti od hladnih prslina i obim termičke obrade će biti smanjene, a mogućnost primene postupka za izvođenje zavarenih spojeva bez prslina se može proširiti na slučaj čelika sa nižom čvrstoćom. Prema tome, pouzdanost procesa tokom rada na čeličnim materijalima osetljivim na hladne prsline se može povećati korišćenjem modifikovanog zavarivanja pod praškom sa komparativno malim obimom angažovanja mašina i, u odnosu na ekonomičnost, može da se uradi alternativna tehnologija zavarivanja koja se može uporediti sa GMA postupkom zavarivanja koji pripada sadašnjem nivou znanja. Veličina šupljine ili njena zapremina uslovljena je, u slučaju EPP zavarivanja sa impulsno modulovanom jednosmernom strujom. U tom pogledu, šupljina u baznoj fazi nema mogućnost da bude stvorena do svoje konačne veličine, što dovodi do manje zapremine šupljine u preseku. Međutim, manja zapremina šupljine rezultuje u manjoj količini gasne mešavine u šupljini što, među drugim supstancama, uključuje i udeo vodonika. Kao dodatak ovim uticajima na vodonik, smanjenje zapremine takođe vodi direktnoj vezi uticaja na profil šupljine. I u ovom slučaju, kroz promene konstantne veličine dolazi do manje interakcije u procesima difuzije vodonika, u odnosu na prosečne vrednosti, sl.1. Upravo u slučaju zavarivanja pod praškom, prašak za zavarivanje posebno ima vrlo jak karakter higroskopnosti i pored odgovarajućih dodatnih sušenja. Prema tome, odgovarajući procesi difuzije mogu da počnu kroz kontaktnu površinu praška za zavarivanje i šupljine. Obe opisane uticajne promene tada dovode do mogućnosti postizanja smanjenja unosa vodonika korišćenjem modifikovanog postupka zavarivanja pod praškom.



Slika 1 • Model apsorpcije vodonika u metal šava tokom zavarivanja pod praškom [1].

Schweißrichtung	Welding direction	Pravac zavarivanja
Drahtelektrode	Wire electrode	Elektrodna žica
Schweißpulver	Welding flux	Prašak za zavarivanje
flüssige Schlacke	Liquid slag	Tečna troska
erstarre Schlacke	Solidified slag	Očvsila troska
flüssiges Metall	Liquid metal	Tečni metal
Bewegung des Wasserstoffs	Movement of hydrogen	Pomeranje vodonika



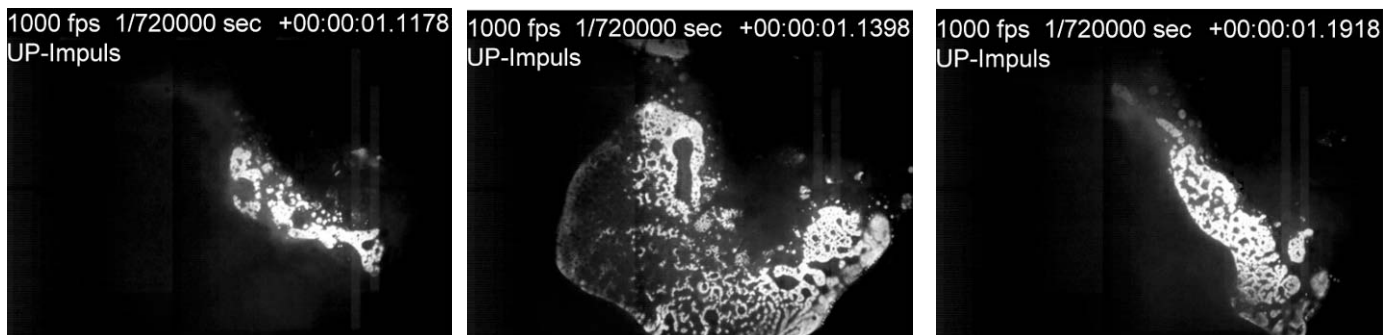
EPP postupak zavarivanja je modifikovan korišćenjem impulsno-modulisane jednosmerne struje kontrolom signala kvadratnih talasa. Preliminarna istraživanja prema [2] indikuju da epruvete zavarene naizmeničnom strujom kvadratnog talasa pokazuju manji udeo vodonika nego spojevi zavareni naizmeničnom strujom sinusnog talasa. Ispostavilo se da su sadržaji vodonika postignuti na ovaj način, manji za kurs kvadratnog talasa. Ovo se pripisuje izbegavanju skokova napona. Prema [2], dalje smanjenje sadržaja vodonika se postiže korišćenjem jednosmerne struje i uzrokovano je zahtevanim smanjenim naponom što rezultuje u manjem stepenu jonizacije vodonika. Kao drugo moguće objašnjenje, može se dodati da se veća zapremina troske topi potpuno tokom prolaza kroz negativni polutalas u slučaju naizmenične struje zavarivanja. Sa ovim nalazima, dole navedeni, ilustrovani rezultati zasnovani su na korišćenju impuls-modulovane jednosmerne struje kojima se ciljano utiče na promene šupljine koja nastaje između impulsa i osnovne faze. U bilo kojem slučaju, inertni karakter šupljina znači da se samo pri frekvenciji od 5 Hz i 20 Hz mogu pratiti električne karakteristike i na taj način osiguravati konstantne promene promenljivih. Još dok izvori struje za stvaranje impuls-modulovane jednosmerne struje nisu bili na raspolaganju na početku ovog projekta, analogno je korišćen longitudinalno regulisan izbor struje korišćen za EPP zavarivanje. U cilju implementacije modulacije impulsa, izvor struje za zavarivanje kontrolisan je spolja korišćenjem sistema National

Instruments® koji dopušta pulziranje šupljine unutar željenih frekvencija od 5 Hz do 20 Hz.

Materijal za ispitivanje koji je korišćen u ovom istraživanju je čelik S960 QL na čijoj su površini zavarivanja izvedena sa fluorid-baznim praškom za zavarivanje prema ISO 14174 - S A FB 1 55 AC klasa sadržaja vodonika od H3 i H5 kao i žice prema DIN EN ISO 26304-A - SZ3Ni2.5MoCr prečnika 2 mm i 4 mm.

### 3. Karakterizacija veličine šupljine

Korišćene su različite metode za dokazivanje uticaja koji modulacija impulsa vrši na veličinu šupljine. One se sastoje, ne samo od fotografija snimljenih velikom brzinom o ponašanju šupljine, već takođe merenjem pritiska unutar šupljine, koji su uzeti sinhrono kako bi se snimili kursevi struja / napon. Fotografije snimljene velikom brzinom EPP procesa uzete su paralelno i poprečno na pravac zavarivanja i razotkrile šupljine na različite načine. Za vizualizaciju upravno na smer zavarivanja, EPP -om zavarena površina uz ivicu čeličnih uzoraka fiksirana je diskom od kvarcnog stakla na svoju stranu, i na taj način se dozvoljava slobodan pogled na unutrašnjost šupljine, sl. 2. Mada ovo utiče na ponašanje u šupljini, relativno poređenje je moguće u različitim fazama impulsa. Tip prenosa metala može se takođe posmatrati ovom metodom. Korelacijom ovih kvalitativnih rezultata sa izmerenim vrednostima vodonika sa komparativnim parametrima zavarivanja, bilo je moguće proširiti razumevanje mehanizama apsorpcije vodonika u metal šava.



**Slika 2** • Faze impulsa u šupljini: bazni ka impulsu (levo), impuls (centar) i impuls ka baznom (desno); fotografija upravno na pravac zavarivanja.

Izraziti uticaji na veličinu šupljine odgovaraju kursu impulsa i uočeni su u ispitivanom opsegu frekvencija između 5 Hz i 20 Hz, sl. 2. U tom smislu, šupljina je, u delu odvojenom od diska od kvarcnog stakla gotovo u potpunosti u osnovnoj fazi. Dakle, nije bilo prepoznatljivih šupljina na vreme. Međutim, povećanje u veličini šupljine do ukupnog stvaranja u fazi impulsa, je ponovo uspostavljeno tokom prelaska u fazu impulsa. Osim

toga, odvajanje kapljica u šupljini u kojoj se kapljice uglavnom prenose u rastopljenju kupku preko diska od kvarcnog stakla je takođe prepoznatljiv u vidljivim fazama. Iz testova izvršenih na različitim frekvencijama impulsa, frekvencija od 15 Hz je ustanovljena kao optimalna za uticaj na veličinu šupljine.

Kao dodatak ovom istraživanju, proces EPP je takođe praćen video zapisom paralelno na pravac



zavarivanja. Metoda opisana u [3] je primenjena u ovom slučaju. Ovom metodom, zavarivanje je sprovedeno prema keramičkoj cevi koja je umetnuta u žleb za svrhe fiksiranja. U momentu kada se šupljina stvara veza sa keramičkom cevi, odgovarajuća tehnologija velikih brzina nudi mogućnost uzimanja fotografija u cilju posmatranja procesa u šupljini, sl. 3. Međutim, za vreme izvođenja testa, slab kontra pritisak uvek mora da postoji u keramičkoj cevi prema šupljini jer bi mešavina gasova inače pobegla iz šupljine u

keramičke cevi i na taj način izazvala nestabilno ponašanje procesa. U svakom slučaju, kontra pritisak, za koji je korišćen argon, ne sme prelaziti određenu vrednost, jer bi uvedeni gas u suprotnom, izazvao protok u šupljinu i uvećao ga ili doveo do opšteg uticaja na proces zavarivanja. Kada su izvedeni testovi žicom prečnika od 2 mm, za protok od 5 l / min se ispostavilo da je optimalna vrednost za gas pomoću keramičke cevi unutrašnjeg prečnika 8 mm.

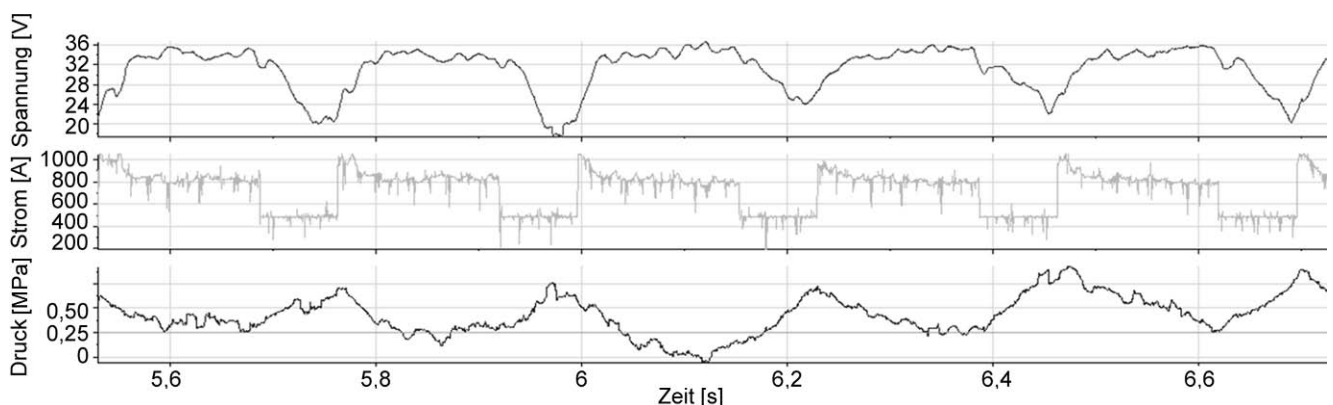


**Slika 3** • Faze impulsa u šupljini: bazni ka impulsu (levo), impuls (centar) i impuls ka baznom (desno); fotografija paralelno sa pravcem zavarivanja

Prilikom analize fotografija snimljenih velikom brzinom, izrazita promena u stubu luka uočena je u zavisnosti od kursa impulsa. Na primer, bio je jasno sužen u formiranju osnovne faze, sl. 3 vrh, a manje kapljice su se odvajale sa žičane elektrode. U fazi impulsa, kapljice su odvajale u kapima većeg prečnika. sl. 3 centar, uz stvaranje znatno šireg luka, jer je primenjen napon veći nego u osnovnoj fazi. Uz primenjene metode, bilo je moguće dokazati da značajan uticaj na veličinu šupljine može biti izvršen sa modulacijom impulsa tokom procesa zavarivanja u zaštiti praška.

Osim metode vizuelnog pregleda, sprovedena su merenja pritiska kako bi se karakterisale promene veličine šupljine. U tom smislu, šupljina je probodena pomoću cevi od kvarcnog stakla prečnika od 2 mm i postavljena je paralelno prema

pravcu zavarivanja. Druga cev od kvarcnog stakla je povezana sa senzorom pritiska, koji koristi piezoelektrični elemenat za merenje pritiska. Sinhrono snimanje električnih promenljivih u procesu zavarivanja omogućava povezivanje kurseva struja / napon sa kursom pritiska, sl. 4. Jasna razlika u pritiscima za vreme osnovne i impuls faze je ovde ustanovljena. U svakom slučaju, uočeno je blago vremenski vezano povezivanje u profilu pritiska u odnosu na snimljene kurseve napona i struje, ali to bi se moglo pripisati odgovarajućem mrtvim vremenima u stvaranju pritiska. Osim toga, zaključeno je iz kursa variranja pritiska, da postoji zavisnost od modulacije impulsa tako da je parcijalni pritisak vodonika bio niži u preseku.



**Slika 4** • Napon luka, jačina struje i profile pritiska kod pulzirajuće šupljine

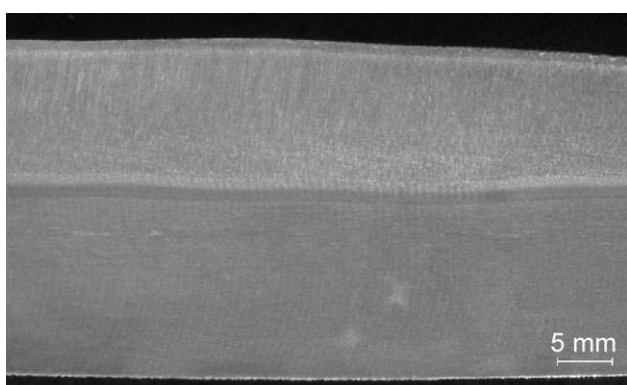


#### 4. Površina i višeslojni šavovi

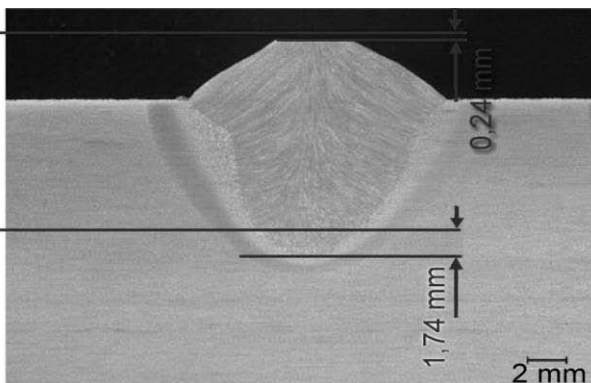
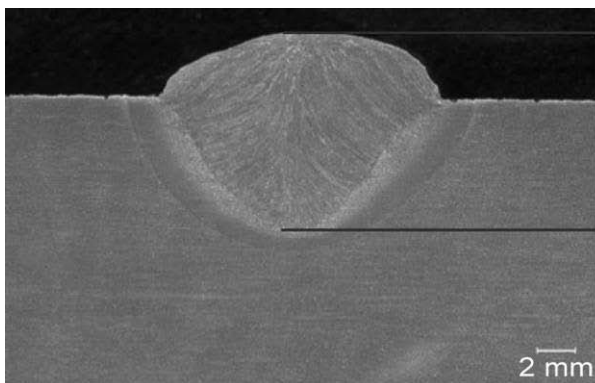
Na makropresecima (u poprečnom i uzdužnom pravcu na šav), površinski šavovi izvedeni pulzirajućim EPP postupkom nisu pokazali bilo kakvu neregularnost vezanu za profil uvarivanja. Ubedljivo svojstvo podužnih preseka je konstantan profil preseka, sl. 5 vrh, koji ne pokazuje bilo kakvu приметnu karakteristiku u poređenju sa šavovima izvedenim konstantnom jednosmernom strujom. Slični dobri rezultati su dobijeni i u slučaju višeslojnih šavova koji su izvedeni žicom prečnika 4 mm, sl. 5 dno, a čiji su koreni zavari takođe

izvedeni sa smanjenom unetom energijom po jedinici dužine preko pulzirajućeg zavarivanja pod praškom.

Nasuprot tome, moguće je zapaziti oblike koji odstupaju od tipičnog paraboličnog tipa šava i blago smanjenje uvarivanja u poređenju sa poprečnim presecima kroz uzorak, koji je zavaren impulsnim modulom jednosmerne struje i konstantnom jednosmernom strujom, sl. 6. U skoro identičnom bliskom ZUT u odnosu na dimenzije površine, ustanovljeno je identično nadvišenje šava u svim slučajevima.



**Slika 5** • Podužni presek šava zavarenog pod praškom sa impulsno modulovanom jednosmernom strujom (levo) i poprečni presek šava kod višeslojnog zavarivanja pod praškom sa impulsno modulovanom jednosmernom strujom (desno).



**Slika 6** • Levo – poprečni presek šava zavarenog pod praškom sa impulsno modulovanom jednosmernom strujom (širina šava: 14.22 mm; nadvišenje šava: 3.77 mm; dubina uvarivanja: 7.33 mm; površina šava 102.18 mm<sup>2</sup>; površina ZUT: 52.34 mm<sup>2</sup>)  
Desno - presek šava zavarenog pod praškom sa konstantnom jednosmernom strujom (širina šava: 12.72 mm; nadvišenje šava: 3.53 mm; dubina uvarivanja: 9.07 mm; površina šava: 96.83 mm<sup>2</sup>; površina ZUT: 52.84 mm<sup>2</sup>).

#### 5. Analiza vodonika

Vezivanje atomarnog vodonika po greškama rešetke igra esencijalnu ulogu u nastajanju hladnih prslina. Ovo se može objasniti činjenicom, da lokalno kritična koncentracija vodonika koja inicira prsline usled dekohezije, jedino može biti uzrokovana nagomilavanjem na greškama [4]. U tom smislu, pravi se razlika između reverzibilne i ireverzibilne klopke. Reverzibilne klopke, npr dislokacije, vrše uticaj na mehanička svojstva

metalnih materijala usled vezanog vodonika koji može biti otpušten plastičnom deformacijom i potom ponovo dostupan u rešeci u difundovanom obliku. Nepovratne klopke, npr nekoherentni talozi i granice zrna (nazivaju se "šantovi"), vezuju vodonik na takav način da to nije bitno za obogaćivanje u zonama u kojima se može pojaviti dekohezioni efekat [4; 5].

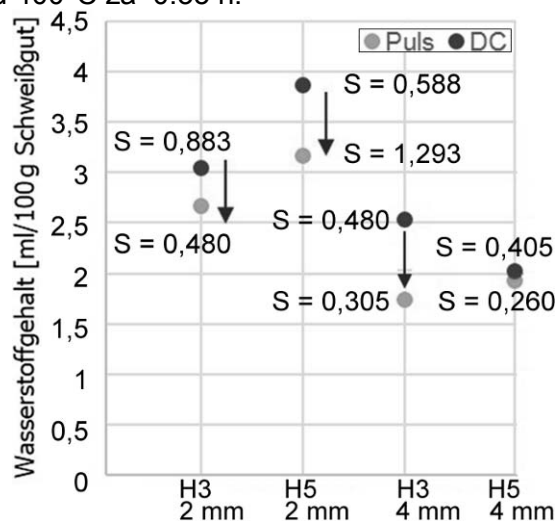
Dok se reverzibilne klopke i "šantovi" mogu razlikovati samo uz pomoć primene obimnih mernih



tehnologija, samo razlikovanje rastvorenog i difundovanog vodonika je uobičajeno u tehnologiji zavarivanja. Vodonik koji je rastvoren u rešeci, nije vezan za klopke u rešeci na ispitnoj temperaturi i zato može slobodno da se širi, označen je kao difundovani. Sadržaj zaostalog vodonika u metalu šava se može odrediti preko merenja širenja ili određivanja fizičkih osobina. Procedure za merenje širenja su zasnovane na merenju zapremine gasa koji nastaje u ispitnom komadu. U tom smislu, se otkriva ukupna zapremina korišćenjem živine metode ili promenom termičke provodljivosti protoka gasa korišćenjem metode vruće ekstrakcije nosećeg gasa.

Sadržaj difundovanog vodonika je jedan od faktora koji uzrokuju prsline. U okviru sveukupnog izvođenja ispitivanja, on je zato određen preko vruće ekstrakcije nosećeg gasa prema DIN EN ISO 3690. Za sprovođenje ispitivanja, svi ambijentni uslovi su identični (ambijentna temperatura: 20°C) a epruvete sa C oblikom su uvek birane dok je sadržaj difundovanog vodonika meren na ispitnoj temperaturi od 400°C za 0.35 h.

Srednja vrednost sa tri epruvete koje su zavarene identično podešenim parametrima je ustanovljena iz statističkih razloga. Vezano za to, sprovedena su upoređenja između zavarenih spojeva sa konstantnom jednosmernom strujom i zavarenih spojeva sa impulsno modulovanom jednosmernom strujom, uzimajući u obzir identičnu energiju po jedinici dužine i održavanje identične brzine dodavanja žice kao i identične brzine zavarivanja. U kombinaciji dve elektrodne žice sa prečnicima 2 mm i 4 mm sa praškovima za zavarivanje klasa sadržaja vodonika H3 i H5, smanjenje sadržaja difundovanog vodonika je bilo zapaženo pri razmatranju srednjih vrednosti merenja u svakom slučaju specificiranog standardnog odstupanja pri korišćenju pulzirajućeg zavarivanja pod praškom, sl. 7. Saglasno informacijama proizođača, korišćeni praškovi za zavarivanje su bili sušeni na 320°C u trajanju od 150 min. Izabrana je učestanost od 15 Hz za modulaciju impulsa, jer je pri njoj utvrđen najveći uticaj na veličinu šupljine.



**Slika 7.** Merenje vodonika u šavovima izvedenim zavarivanjem pod praškom sa impulsnom (15 Hz) i konstantnom jednosmernom strujom sa različitim dodatnim materijalima i praškovima za zavarivanje ( $s$  - standardno odstupanje).

Wasserstoffgehalt	Hydrogen content	Sadržaj vodonika
Schweißgut	Weld metal	Metal šava

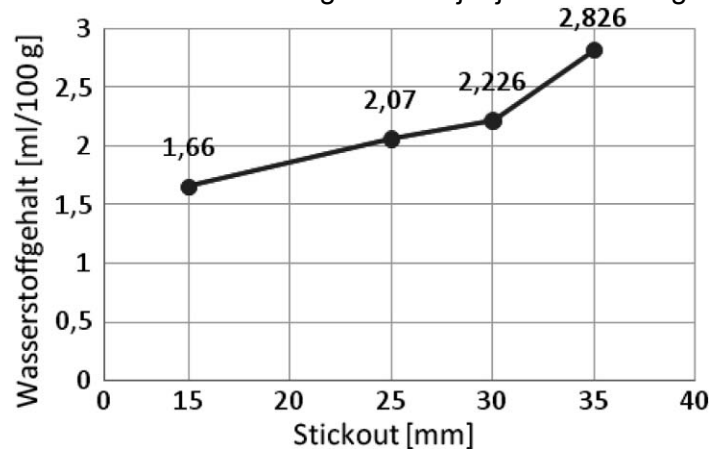
Mada su površinski šavovi proizvedeni konstantnom jednosmernom strujom, već pokazali sadržaj difundovanog vodonika unutar granica koje je dao proizvođač praška (maks. 3 ml ili 5 ml / 100 g čistog metala šava), ovo bi se moglo minimizirati čak i više, korišćenjem procesa pulzirajućeg zavarivanja pod praškom. S obzirom na ovo, može se dodati, da pored drugih faktora, utiče i veličina šupljine. Međutim, uticaji veličine šupljine na sadržaj vodonika (istraživanja su fokusirana na njihovo istraživanje), ekstra parametri

(npr. vremenski zavisni unos toplote i temperature tečne kupke) takođe pokazuju uticaj. Već na sl. 3, moguće je prepoznati sužavanje luka usled manje unete energije u baznoj fazi. Ovo sugeriše o manjem unosu vodonika. Šta više, dodatna ispitivanja su pokazala promenu temperature tečne kupke. U tom slučaju, podstaknuta na taj način, ispitivanja su fokusirana na promene energije između dva uslova (pulzirajući i bazni uslovi) sa ciljem istraživanja uticaja na veličinu šupljine.



Dalja razmatranja su orijentisana na promenu slobodnog kraja žice tokom ispitivanja uz korišćenje žice prečnika 2 mm i praška za zavarivanje klase vodonika H3. Gornji limit od 3 ml / 100 g

propisanog za prašak za zavarivanje je uvek sastavljen u odnosu na to. Ovde je smanjenje sadržaja difundovanog vodonika postignuto smanjenjem slobodnog kraja žice, sl. 8.



**Slika 8** • Uticaji promena slobodnog kraja žice na sadržaj difundovanog vodonika

U tom slučaju, visina praška je održavana na 25 mm kod svih ispitivanja u saglasnosti sa standardom. Međutim, ovo zapažanje je u suptotnosti sa nalazima za MAG-MIG zavarivanje kod kojeg je smanjenje sadržaja vodonika, objašnjeno povećanjem slobodnog kraja žice usled otporskog zagrevanja žice. Shodno tome, pad u unosu vodonika kao rezultat kraćeg slobodnog kraja žice može se dodati nekolicini faktora u slučaju procesa pulzirajućeg zavarivanja pod praškom. Ovde je ustanovljen kao primarni razlog, to što je manja veličina šupljine pri smanjenju slobodnog kraja žice. U odnosu na to, zapažena je dodatna promena u stubu luka pri smanjenju slobodnog kraja žice.

## 6. Perspektiva

Korišćenje konstrukcionih fino-zrnih čelika povišene čvrstoće za primene na čeličnim konstrukcijama, vozilima i cevovodima je stalno u porastu iz razloga smanjenja težine. Korišćenje zavarivanja pod zaštitom praška na ovom polju vodi ka opasnosti od unosa vodonika u metal šava. U cilju neutralisanja ove opasnosti, zavarivanje pod praškom sa impulsnom modulacijom je bilo korišćeno u cilju uticanja na veličinu šupljine. U odnosu na ovo, šupljina se nije stvorila do njene konačne veličine usled konstantne promene između impulsnog i baznog uslova. Ovo je rezultovalo u manjoj zapremini šupljine sa prosečno manjim parcijalnim pritiskom, u manjoj zakrivljenosti površini šupljine i čak smanjenju kontakta sa izvorima vodonika.

Vizuelno zapažanje je izvedeno korišćenjem fotografija snimljenih velikim brzinama, paralelno i upravno na pravac zavarivanja i poslužilo je za dokazivanje naizmenične veličine šupljine. Šta više, bilo je moguće ustanoviti optimalnu frekvenciju

impulsa koja dopušta maksimum uticaja na veličinu šupljine. Kao dodatak, pritisak unutar šupljine je takođe meren. Ovde je bilo moguće obezbediti niži pritisak u baznoj fazi nego u fazi impulsa a takođe i u proseku, nego u slučaju zavarivanja sa konstantnom jednosmernom strujom. Zbog toga se može očekivati smanjeni parcijalni pritisak vodonika u šupljini.

Na osnovu makropreseka, površinski šavovi napravljeni procesom pulzirajućeg zavarivanja pod praškom, pokazuju dovoljne i konstantne profile uvarivanja. S tim u vezi, razmatranja poprečnih preseka indikuju izmenjenu raspodelu u poređenju sa zavarivanjem konvencionalnom jednosmernom strujom. Šta više, dodatni višeslojni šavovi na limu debljine 25 mm su pokazali dobru primenu procesa pulzirajućeg zavarivanja pod praškom pri spajanju spojeva.

Ustanovljene vrednosti vodonika u šavovima izvedenim postupkom pulzirajućeg procesa zavarivanja u poređenju sa šavovima sa konstantnom jednosmernom strujom, pokazuju da se može očekivati smanjenje sadržaja difundovanog vodonika sa ovom novom varijantom procesa zavarivanja, tako da se polje primene ove tehnologije zavarivanja čak može proširiti i na fino-zrne konstrukcione čelike povišene čvrstoće.



## Literatura

[1] Tsuboi, J., and H. Terashima: The Behavior of Hydrogen in Arc Welding (Report 4): Hydrogen dissolution into submerged arc weld metal. Journal of the Japan Welding Society 42 (1973), No. 6, pp. 544/53.

[2] Thier, H., u. C. Eisenbeis: Wasserstoffgehalt – Reproduzierbarkeit und Bestimmung bei UP-Schweißungen. Schw. Schn. 47 (1995), H. 11, S. 906/13.

[3] Franz, U.: Vorgänge in der Kaverne beim UP-Schweißen. Diss., TU Magdeburg. Magdeburg 1965.

[4] Klose, K. H., u. S. Beyer: Wasserstoffversprödungsanfälligkeit hochfester Werkstoffzustände. Materialwissenschaft u. Werkstofftechnik 23 (1992), H. 8, S. 274/82.

[5] Pressouyre, G. M.: Trap theory of hydrogen embrittlement. Acta Metallurgica 28 (1980), No. 7, pp. 895/911.



**Dipl.-Ing. Johannes Schäfer** studirao na mašinskom fakultetu sa naprednim predmetom Inženjering izrade pri RWTH univerziteta u Ahenu. Od februara 2012, radi kao naučni saradnik u delu za elektrolučno zavarivanje u Institutu za zavarivanje i spajanje pri univerzitetu u Ahenu. Tokom 2013, on je kvalifikovana kao IWE posle kursa u SLV Duisburg.



**Dipl.-Ing. Konrad Willms** studirao na mašinskom fakultetu sa specijalizacijom na inženjeringu projektvanja, na univerzitetu primenjenih nauka u Ahenu. On je rukovodilac dela za elektrolučno zavarivanje u Institutu za zavarivanje i spajanje (ISF) pri RWTH univerziteta u Ahenu.



**Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen** studirao na mašinskom fakultetu pri RWTH Univerziteta u Ahenu i završio je studije kao Dipl.-Ing. 1990. Zatim je radio kao naučni saradnik u Institutu za zavarivanje pri RWTH univerziteta u Ahenu gde je stekao titulu Dr.-Ing. 1995. Bio je zaposlen kao Senior Engineer u Institutu za zavarivanje pri RWTH univerziteta u Ahenu od 1995 do 2000 i bio je rukovodilac Odeljenja za spajanje i ispitivanje u istraživačkom centru Jülich od 2000. Tokom 2007, imenovan je za Univerzitetskog profesora u Institutu za zavarivanje i spajanje pri RWTH univerziteta u Ahenu kao i za direktora instituta sa istim nazivom.

IGF projekat IGF 17.351 N / DVS broj 03.105 istraživačke asocijacije "Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf" je bio, na osnovu odluke nemačkog Bundestaga, promovisan od strane nemačkog ministarstva za ekonomske poslove i energiju preko federacije industrijskih istraživačkih asocijacija (AiF) unutar okvira programa za promociju industrijskog istraživanja i razvoja spajanja (IGF).