



ZAVARIVANJE I



ZAVARENE KONSTRUKCIJE WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 70 Vol. 70	Br. 2 No. 2	49-96 49-96	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2025. 2025.
--------------------	----------------	----------------	---------------------	------------------	----------------

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE ZAVARIVANJA U
SRBIJI I TEHNOLOŠKO-METALURŠKOG FAKULTETA
UNIVERZITETA U BEOGRADU

SERBIAN WELDING SOCIETY AND FACULTY OF TECHNOLOGY
AND METALLURGY OF THE UNIVERSITY OF BELGRADE
QUARTERLY REVIEW

PERIODIČNOST IZLAŽENJA – ČETIRI PUTA GODIŠNJE
PUBLISHED IN FOUR ISSUES ANNUALLY

IZDAVAČI / PUBLISHERS

**DUZS - Društvo za unapređivanje
zavarivanja u Srbiji**

Grčića Milenka 67, Beograd, Srbija

TMF - Tehnološko-metalurški fakultet

Univerziteta u Beogradu

Karnegijeva 4, Beograd, Srbija

Za izdavača / For Publisher

Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

UREĐIVAČKI ODBOR / PUBLISHING COUNCIL

Dr Vencislav Grabulov, dipl.ing, (predsednik)

Prof.dr Vukić Lazić, dipl.ing.

Doc.dr Ismar Hajro, dipl.ing. (BiH)

Prof.dr Darko Bajić, dipl.ing. (Crna Gora)

Prof. dr Dragoslav Dobraš, dipl.ing. (BiH, Republika Srpska)

Prof. dr Sveto Cvetkovski, dipl.ing. (Makedonija)

Doc. dr Tomaž Vuherer, dipl.ing. (Slovenija)

Prof. dr Ivan Samardžić, dipl.ing. (Hrvatska)

Dr Horia Dascau, dipl.ing. (Rumunija)

UREDNIŠTVO / EDITORIAL

Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief

Dr Zoran Odanović, dipl.ing.

duzs011@gmail.com, zoranodanovic@gmail.com

Tehnički urednici / Technical Editors

Branislav Lukić, dipl.ing

štampano izdanje / printed edition

Dr Bojan Gligorjević, dipl.ing

internet izdanje / online edition

Redakcijski odbor / Editorial Board

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Radomir Jovičić, dipl.ing.

Dr Srđan Bulatović, dipl.ing.

Dr Stefan Dikić, dipl.ing.

Mr Miloš Pavlović, dipl.ing.

REDAKCIJA I MARKETING / EDITORIAL OFFICE AND MARKETING

Vesna Jović

Grčića Milenka 67, I sprat
11000 Beograd

Tel / Fax + 381 (11) 2420-652
(10-16h)

duzs011@gmail.com

www.wwsjournal.org.rs



CIP - Каталогизacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije, Beograd
621.791

ZAVARIVANJE i zavarene konstrukcije : časopis Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji i Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu = Welding & welded structures : Serbian welding society and Faculty of Technology and metallurgy of the University of Belgrade quarterly review / glavni i odgovorni urednik Zoran Odanović. - Vol. 41, no. 1 (1996) - Beograd : DUZS - Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji : TMF - Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 1996- (Beograd : RIC grafičkog inženjerstva Tehnološkometalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu). - 29 cm

Tromesečno. - Je nastavak: Zavarivač = ISSN 0513-8523. - Drugo izdanje na drugom medijumu: Zavarivanje i zavarene konstrukcije (Online) = ISSN 3042-3163 ISSN 0354-7965 = Zavarivanje i zavarene konstrukcije COBISS.SR-ID 105396743

CENE I NARUŽBINA ZA 2025.

Cena pojedinačnog broja 1.150,00 dinara
Godišnja pretplata 3.520,00 dinara
Tekući račun: 325-950060002588-46

PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100
Account No. RS35325960160000041546
OTPVRS22 (VOJVOĐANSKA BANKA AD)
IBAN RS35325960160000041546

ŠTAMPA / PRINT

RIC grafičkog inženjerstva
Tehnološko-metalurški fakultet Beograd
Karnegijeva 4, Beograd
Tiraž / Circulation: 150

SADRŽAJ

CONTENTS



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

51

UTICAJ STEPENA ZAGREVANJA PRI
ELEKTROLUČNOM ZAVARIVANJU NA FORMIRANJE
STRUKTURE U ZONI UTICAJA TOPLOTE ZAVARENIH
SPOJEVA UGLJENIČNIH ČELIKA

THE IMPACT OF HEATING DEGREE DURING ARC
WELDING ON THE STRUCTURE FORMATION IN THE
HEAT AFFECTED ZONE OF WELDED JOINTS IN
CARBON STEELS

Oleksandr M. Savytskyi, Mykhailo M. Savytskyi, Darko Bajić



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

61

OSOBINE SPOJEVA ZAVARENIH IZMEĐU
NISKOUGLJENIČNIH I VISOKOLEGIRANIH ČELIKA

PROPERTIES OF WELDED JOINTS BETWEEN LOW-
ALLOYED AND HIGH-ALLOYED STEEL

Radomir Jovičić, Simon Sedmak, Mihajlo Arandelović, Dejan Jovičić, Jernej Markež, Danijel Pavlović



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

69

OTPORNOST NA HABANJE MAG OBLOŽENOG
27MnCrB5-2 OSNOVNOG MATERIJALA SA SG3
ČVRSTOM ŽICOM

WEAR RESISTANCE OF MAG CLADDED 27MnCrB5-2
BASE MATERIAL WITH THE SG3 SOLID WIRE

David Novak, Tomaž Vuherer



STANDARDIZACIJA I KVALITET

STANDARDIZATION & QUALITY

78

KVALIFIKACIJA I SERTIFIKACIJA IBR OSOBLJA
PREMA NOVOJ VERZIJI STANDARDA EN ISO 9712

QUALIFICATION AND CERTIFICATION OF NDT
PERSONNEL ACCORDING TO NEW EDITION OF THE
STANDARD EN ISO 9712

Miloš Jovanović



PRAKSA

PRACTICE

86

ISPITIVANJE ZAVARENIH SPOJEVA PRIMENOM
FMC/TFM ULTRAZVUČNE TEHNIKE

INSPECTION OF WELDED JOINTS USING THE
FMC/TFM ULTRASONIC TECHNIQUE

Zoran Nikolić, Veljko Nikolić



VESTI

NEWS

60

72. GODIŠNJA SKUPŠTINA DUZS
MARKETING

96



Oleksandr M. Savytskyi ^{1,a}, Mykhailo M. Savytskyi ^{1,b}, Darko Bajić ^{2,c}

UTICAJ STEPENA ZAGREVANJA PRI ELEKTROLUČNOM ZAVARIVANJU NA FORMIRANJE STRUKTURE U ZONI UTICAJA TOPLOTE ZAVARENIH SPOJEVA UGLJENIČNIH ČELIKA

THE IMPACT OF HEATING DEGREE DURING ARC WELDING ON THE STRUCTURE FORMATION IN THE HEAT AFFECTED ZONE OF WELDED JOINTS IN CARBON STEELS

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Avugst 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

April 2025.

Adresa autora / Author's address:

¹ E.O. Paton Electric Welding Institute, NAN Ukraina, 11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine

² University of Montenegro, University of Montenegro, Faculty of Mechanics Engineering, Džordža Vašingtona bb., 81000 Podgorica

Email / ORCID ID:

^a / 0000-0002-2605-9647

^b / 0000-0003-3175-4334

^c darko@ucg.ac.me / 0000-0001-7567-5959

Ključne reči: zona uticaja toplote (ZUT), termički ciklus, brzina zagrijavanja, struktura, krtoost

Keywords: heat affected zone (HAZ), thermal cycle, heating rate, structure, brittleness.

Rezime

U radu se pokazuje da stepen zagrijavanja termičkog ciklusa zavarivanja utiče na proces formiranja strukture metala u zoni uticaja toplote (ZUT) zavarenih spojeva ugljeničnih čelika. U fazi zagrijavanja formiraju se metalna zrna i određuju se njihove veličine. Ovdje, kako je $\alpha \rightarrow \gamma$ transformacija završena, određuju se: nivo homogenosti austenita, njegova otpornost pri hlađenju i period inercije raspada, od čega zavisi kinetika strukturnih transformacija u fazi hlađenja. Dakle, formiranje metalne strukture ZUT-a počinje u fazi zagrijavanja u međukritičnom intervalu Ac_1 – Ac_3 . Faza hlađenja završava ovaj proces raspadom austenita. Razmatran je uticaj brzina zagrijavanja na proces formiranja strukture u metalu ZUT-a. Pokazuje se da sa povećanjem brzine zagrijavanja zavarenog spoja, pozitivan učinak na kinetiku raspada prehladenog austenita postepeno raste, uprkos negativnom uticaju povećanja brzine hlađenja. Shodno tome, pokazuje se da faza zagrijavanja termičkog ciklusa zavarivanja ima dominantan uticaj na kinetiku formiranja metalne strukture u ZUT-u zavarenih spojeva.

Abstract

The study demonstrates that the degree of heating in the welding thermal cycle affects the process of metal structure formation in the heat affected zone (HAZ) of welded joints in carbon steels. During the heating phase, metal grains are formed, and their sizes are determined. Here, as the $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation is completed, the level of austenite homogeneity, its resistance during cooling, and the inertia period of decomposition are determined, which influence the kinetics of structural transformations in the cooling phase. Thus, the formation of the metal structure in the HAZ begins during the heating phase, within the intercritical interval Ac_1 – Ac_3 . The cooling phase completes this process with the decomposition of austenite. The impact of heating rates on the structure formation process in the metal is considered. It is shown that with the increase in the heating rate of the welded joint, the positive effect on the kinetics of the supercooled austenite decomposition gradually increases, despite the negative impact of the increased cooling rate. Accordingly, it is shown that the heating phase of the welding thermal cycle has a dominant influence on the kinetics of metal structure formation in the HAZ of welded joints.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine



1. Uvod

Glavni faktor koji određuje svojstva ugljeničnih čelika i njihovih zavarenih spojeva je struktura metala. Zona uticaja toplote (ZUT) je dio zavarenog spoja koji je tokom procesa zavarivanja podvrgnut lokalnom visokotemperaturnom uticaju. Pod uticajem termičkog ciklusa zavarivanja u ZUT-u se javljaju strukturne promjene koje određuju njegovu strukturu i svojstva na makro i mikro nivou [1–3]. Struktura određuje sklonost zavarenog spoja ka povećanju krtosti i formiranju hladnih prslina, koje se povećavaju proporcionalno sa povećanjem sadržaja ugljenika u čelicima. Otpornost na krtost raste proporcionalno sa smanjenjem veličine metalnog zrna [1, 2].

Minimalna žilavost, plastičnost i maksimalna sklonost nastajanju hladnih prslina manifestuju se u slučaju formiranja martenzitne mikrostrukture u ZUT-u, što je posledica zakaljivosti (ojačavanja) metala. Perlitna mikrostruktura obezbjeđuje maksimalnu žilavost, plastičnost i otpornost na pojavu prslina. Beinitna mikrostruktura je u pogledu žilavosti i plastičnosti intermedijatna, a istovremeno osigurava visok nivo otpornosti na pojavu prslina [1, 3].

Da bi se obezbijedila visoka otpornost metala ZUT-u na krtost, neophodno je da se u njemu formira sitnozrna mikrostruktura. Za povećanje njegove otpornosti protiv formiranja hladnih prslina, neophodno je stvoriti uslove za odvijanje beinitne i perlitne transformacije, ne dozvoljavajući formiranje martenzitne strukture.

U procesu zagrijavanja i hlađenja metal ZUT-a prolazi kroz nekoliko transformacija. U fazi zagrijavanja u temperaturnom intervalu Ac_1 – Ac_3 osnovna (polazna) struktura se transformiše u austenitnu [3]. Nakon prekoračenja ovog temperaturnog intervala, razvija se proces rasta zrna. Temperaturna oblast iznad Ac_1 – Ac_3 naziva se interval rasta austenitnog zrna i homogenizacije austenita [1–3]. Što je ovaj interval viši i što je duže vrijeme zadržavanja metala u njemu, to je krupnije austenitno zrno i veći je stepen homogenizacije austenita [1,3]. Brzina rasta austenitnog zrna se povećava srazmjerno povećanju ovog intervala prema zoni visokih temperatura.

U fazi hlađenja dolazi do transformacije austenita. Ova transformacija se može odvijati u tri temperaturne oblasti: difuzionoj (perlitna), intermedijatnoj (beinitna) i bezdifuzionoj (martenzitna) [3]. Rezultat ovih transformacija su adekvatne strukture. U prvom slučaju se formiraju ferit i perlit različitih disperznosti i u različitim

odnosima. U drugom slučaju se formira beinit, a u trećem martenzit. Ako $\alpha \rightarrow \gamma$ transformacija obuhvata nekoliko oblasti, kao rezultat imamo da se u metalu formiraju mješovite strukture i njegova svojstva su određena procentualnim odnosom faza.

Zbog toga je zadatak zavarivača da formira takve temperaturne uslove zagrijavanja i hlađenja u ZUT-u kako bi se ograničio rast austenitnog zrna i povećala vjerovatnoća razvoja difuzione i intermedijatne transformacije pothlađenog austenita pri djelimičnom ili potpunom potiskivanju bezdifuzione transformacije. U cilju rješavanja ovog zadatka, zavarivač teži da obezbijedi u ZUT-u termički ciklus blizak idealnom [1].

2. Analiza dosadašnjih istraživanja

Idealni termički ciklus treba da obezbijedi minimalno vrijeme zadržavanja metala u temperaturnoj oblasti rasta zrna i usporeno hlađenje u temperaturnoj oblasti perlitne i beinitne transformacije, tj. formirati uslove bliske izotermnom hlađenju.

U realnim uslovima, pri elektroolučnom zavarivanju, nije moguće obezbijediti idealan, ili njemu blizak, termički ciklus samo promjenom parametara režima zavarivanja. U smislu kontrole uslova zagrijavanja i hlađenja metala, elektrolučno zavarivanje je značajno inferiornije od procesa termičke obrade. Pri zavarivanju ne postoji mogućnost ograničavanja maksimalne temperature zagrijavanja metala. U okološavnoj zoni ona postiže vrijednost blisku temperaturi topljenja. Takođe, ne postoji mogućnost regulisanja uslova hlađenja metala i njegovog zadržavanja u potrebnim temperaturnim intervalima.

Dužina zadržavanja metala na temperaturama višim od Ac_3 , kao i brzina hlađenja, određuju pogonsku energiju zavarivanja [4]:

$$\frac{q}{v} = \frac{I \cdot U \cdot \eta}{v} \quad (1)$$

gdje je: q , (J) – efektivna toplotna snaga električnog luka; v , (cm/min) – brzina zavarivanja; I , (A) – struja zavarivanja; U , (V) – napon električnog luka; η – efektivni koeficijent korisnog dejstva električnog luka.

Da bi se skratilo vrijeme zadržavanja metala u temperaturnoj oblasti porasta zrna neophodno je smanjiti pogonsku energiju (q/v), a za usporeno hlađenje istu povećati. Ovu kontradiktornost je nemoguće riješiti bez dodatnih tehnoloških tehnika.



Stoga zavarivači primenjuju zavarivanje sa minimalnim unosom toplote [1, 2]. To osigurava minimalno vrijeme zadržavanja metala u temperaturnom intervalu rasta zrna i usporava hlađenje.

Poznato je nekoliko oblika zagrijavanja: preventivno (prije zavarivanja), prateće (u procesu zavarivanja) i naknadno (posle zavarivanja) [1, 2].

Uočava se intenzivan rast austenitnog zrna sve dok se toplotna energija unosi u metal [5]. Ovaj proces je povezan sa fazom zagrijavanja. Stoga je naknadno zagrijavanje svakako pozitivno jer ne utiče na fazu zagrijavanja, već samo usporava hlađenje.

Tradicionalno, formiranje mikrostrukture u ugljeničnim čelicima tokom procesa zavarivanja i termičke obrade povezano je sa fazom njegovog hlađenja. O tome svjedoči činjenica da svi izotermički i termokinetički dijagrami razgradnje pothlađenog austenita odražavaju samo procese u fazi hlađenja metala i ne uzimaju u obzir fazu njegovog zagrijavanja [6, 7]. Radovi posvećeni izučavanju fenomena formiranja strukture pri zavarivanju ugljeničnih čelika pokazuju da su procesi formiranja strukture povezani sa fazom zagrijavanja zavarenih spojeva [8–12].

U skladu sa ovim radovima, sve preporuke za kontrolu formiranja mikrostrukture metala tokom termičke obrade tiču se samo promjene intenziteta njegovog hlađenja u odnosu na kritičnu brzinu [3] i, po potrebi, dodatnog otpuštanja različitog stepena. Prilikom zavarivanja, radi poboljšanja strukture zavarenih spojeva čelika koji su podložni zakaljivosti, preporučuje se i usporavanje hlađenja njegovim zagrijavanjem i naknadnom toplotnom obradom.

Međutim, ako se proces formiranja strukture posmatra u kompleksu na makro- i mikro- nivoima, jasno je da on počinje u ZUT-u u fazi zagrijavanja, gdje se formira makrostruktura. To bi također trebalo uticati na kinetiku formiranja mikrostrukture.

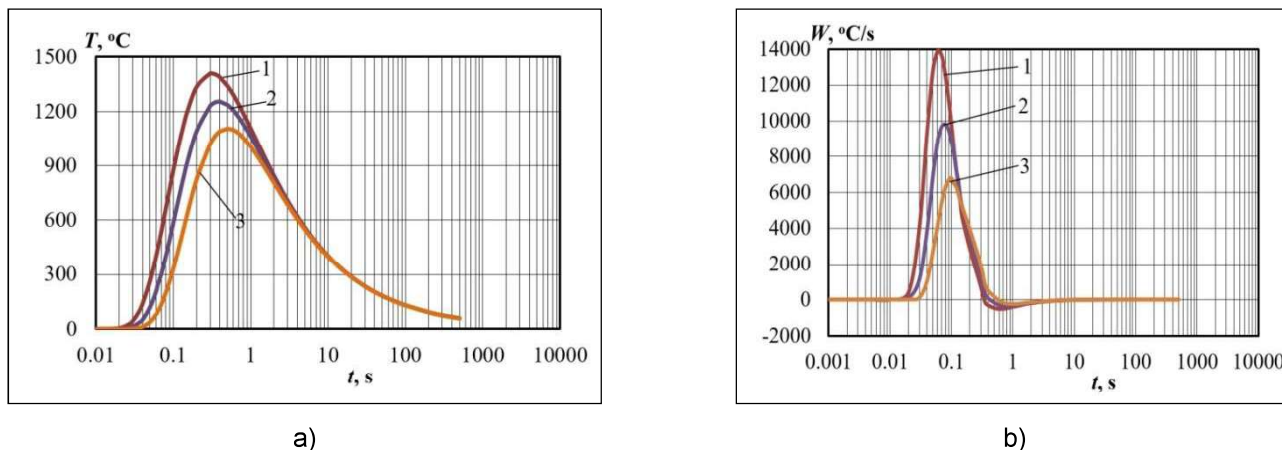
Poznato je da se kinetika razgradnje austenita određena periodom inertnosti transformacije (period inkubacije) i brzinom hlađenja [3]. Što je duži period inertnosti, to mora biti niža brzina hlađenja kako bi se spriječila martenzitna transformacija. Zauzvrat, period inertnosti zavisi od nivoa homogenosti austenita. Što je veći nivo homogenosti austenita, duži je period inertnosti razgradnje. Nivo homogenosti je određen veličinom temperaturnog opsega rasta austenitnog zrna i homogenizacije austenita, kao i vremenom zadržavanja metala u njemu, što zajedno predstavlja fazu zagrijavanja, čiji se uticaj na kinetiku formiranja mikrostrukture u ZUT-u ne uzima u obzir.

Pri zavarivanju ugljeničnih čelika krstost ZUT-a i pojava hladnih prslina u njemu se može izbjeći formiranjem fino-zrnastih struktura koje su rezultat razgradnje austenita u difuzionom i intermedijatnom području. Ovo se može postići kontrolisanjem kinetike strukturnih transformacija tokom zagrijavanja i hlađenja metala ZUT-a u procesu njegovog zavarivanja. Da bi se to postiglo, potrebno je znati kakav uticaj imaju faze zagrijavanja i hlađenja termičkog ciklusa zavarivanja na strukturne transformacije i čiji je uticaj dominantan.

Uticaj stepena hlađenja na kinetiku formiranja mikrostrukture metala ZUT-a je prilično temeljito proučen i ogleda se u smanjenju temperatura $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacije sa povećanjem brzina hlađenja. Stoga je cilj ovog rada identifikacija prirode i stepena uticaja faze zagrijavanja termičkog ciklusa zavarivanja na kinetiku strukturnih transformacija u ZUT-u.

3. Analiza rezultata

Na slici 1 su prikazani termički ciklusi u ZUT-u s maksimalnim temperaturama 1400 °C, 1250 °C i 1100 °C pri jednoprolaznom zavarivanju čelika 30XГCA (GOST) debljine 3.5 mm sa pogonskom energijom od 2162 J/cm. Krive odražavaju trenutne brzine zagrijavanja i hlađenja metala. Hemijski sastav konstrukcionog hrom-silicijum-mangan čelika 30XГCA dat je u tabeli 1.



Slika 1. Termičko stanje ZUT-a zavarenog spoja konstrukcionog čelika 30XГСА (GOST): 1 – $T_{max} = 1400$ °C, 2 – $T_{max} = 1250$ °C, 3 – $T_{max} = 1100$ °C; a) termički ciklus zavarivanja, b) trenutne brzine zagrijavanja i hlađenja.

Figure 1. Thermal conditions in the heat-affected zone (HAZ) of a welded joint made of structural steel 30KhGSA (GOST): 1 – $T_{max} = 1400$ °C, 2 – $T_{max} = 1250$ °C, 3 – $T_{max} = 1100$ °C; (a) welding thermal cycle, (b) instantaneous heating and cooling rates.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika 30XГСА (GOST) [13]

Table 1. Chemical composition of 30KhGSA steel (GOST) [13]

Maseni udio elemenata, %							
C	Cr	Mn	Si	Ni	Cu	P	S
0.28 – 0.34	0.80 – 1.10	0.80 – 1.10	0.90 – 1.20	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.025	≤ 0.025

Kada se uporede krive naznačenih termičkih ciklusa (slika 1a) i krive koje odražavaju trenutne brzine promjene temperature u njima (slika 1b), jasno je da su brzine zagrijavanja metala nešto veće od brzina hlađenja. Osim toga, pojavljuje se zakonitost na koju zavarivači nisu obratili pažnju. Kad se metal zagrije, razlika između temperatura susjednih termičkih ciklusa se postepeno povećava do maksimalnih 150 °C. Zatim, sa hlađenjem ova razlika opada, dok se na temperaturama ispod 900 °C spajaju sva tri termička ciklusa (slika 1a). Brzine hlađenja na temperaturama ispod 900 °C su skoro iste za sva tri termička ciklusa. Dakle, glavna razlika između termičkih ciklusa i brzina promjene njihovih temperatura se pojavljuje u fazi zagrijavanja. U fazi hlađenja ispod 900 °C se izjednačavaju temperature termičkih ciklusa i njihove brzine hlađenja.

Važnost ove zakonitosti leži u činjenici da se temperature ispod 900 °C odnose na oblast razgradnje pothlađenog austenita. Čak i za ugljenični čelik s minimalnim sadržajem ugljenika, temperaturni prag A_{r3} , ispod kojeg se može razviti $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacija, dostiže 835 °C u izotermičkim uslovima, a kako se sadržaj ugljenika i legirajućih

elemenata u čeliku povećava, tako se i ovaj temperaturni prag smanjuje [13]. U uslovima kontinualnog hlađenja, A_{r3} temperaturni prag se još više smanjuje. Na primjer, za čelik 30XГСА, temperatura A_{r3} u izotermičkim uslovima je 705 °C [13], a uz kontinualno hlađenje opada za 20–40 °C, pa je njena vrijednost u intervalu 685–665 °C [7].

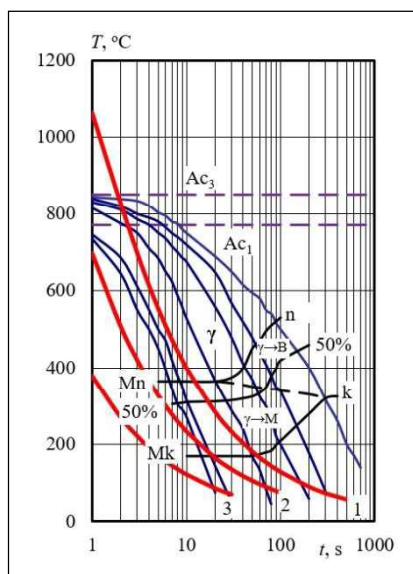
Pri zavarivanju kriterijum za procjenu uticaja faze hlađenja na kinetiku strukturnih transformacija u metalu ZUT-a su brzine hlađenja u temperaturnim intervalima 800–600 °C i 600–400 °C. Intervali pokrivaju područja difuzione i intermedijalne $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacije, respektivno, za veliku većinu ugljeničnih čelika [1, 10].

U skladu sa slikom 1, brzine hlađenja u naznačenim temperaturnim intervalima su gotovo jednake u područjima ZUT-a, koji je podvrgnut austenitizaciji i naknadnom razlaganju austenita. Shodno tome, struktura ZUT-a u ovim područjima bi trebalo da bude homogena, ako je formiranje strukture povezano samo sa fazom hlađenja zavarenog spoja. Ovaj zaključak se potvrđuje termokinetičkim dijagramom (slika 2) konstruisanim na osnovu poznatih dijagrama [6]. Kriva hlađenja br. 1, koja odgovara krivima hlađenja termičkih



ciklusa (slika 1), prolazi kroz martenzitno temperaturno područje (Mn – Mk). Dakle, u metalu ZUT-a koji je pri zagrijavanju podvrgnut

austenitizaciji treba da se formira homogena martenzitna struktura.



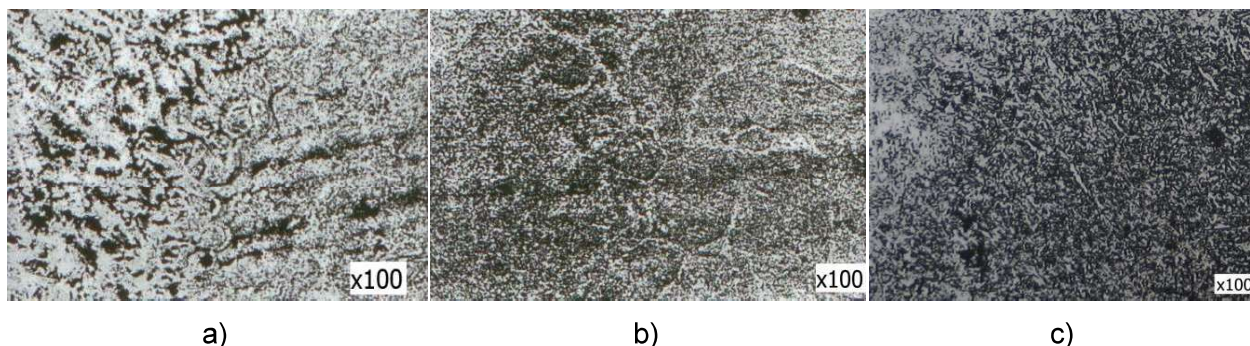
Slika 2. Termokinetički dijagram razlaganja pothlađenog austenite kod zavarenih spojeva čelika 30XhGSA debljine 3.5 mm: 1 – kriva hlađenja pri pogonskoj energiji zavarivanja 2162 J/cm; 2 – kriva hlađenja pri pogonskoj energiji zavarivanja od 1140 J/cm; 3 – kriva hlađenja pri pogonskoj energiji zavarivanja od 648 J/cm.

Figure 2. Thermokinetic diagram of undercooled austenite decomposition in welded joints of 30KhGSA steel with a thickness of 3.5 mm: curve 1 – cooling curve at a welding heat input of 2162 J/cm; curve 2 – cooling curve at a welding heat input of 1140 J/cm; curve 3 – cooling curve at a welding heat input of 648 J/cm.

Prema rezultatima metalografskih ispitivanja, u naznačenim područjima ZUT-a zavarenih spojeva dobijenih pri unosu energije od 2162 J/cm, formiraju se mješovite beinitno-martenzitne strukture (slika 3). To ukazuje na uticaj brzine zagrijavanja na razgradnju pothlađenog austenita, što termokinetički dijagram ne odražava.

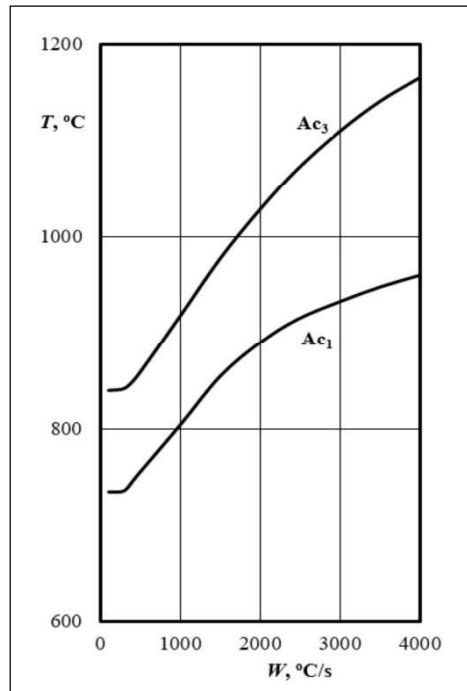
Poznato je da povećanje brzine zagrijavanja dovodi do porasta temperature kritičnih tačaka Ac_1 i Ac_3 (slika 4) [14, 15] i pomjeranja intervala

ograničenog njima u područje viših temperatura. Time se smanjuje interval rasta austenitnog zrna i homogenizacije austenita, kao i vrijeme zadržavanja metala u njemu, što pozitivno utiče na strukturu - zrno se usitnjava [1, 2]. Osim toga, smanjuje se i nivo homogenosti austenita, a njegovo razlaganje se pomjera ka višim temperaturama. U ZUT-a se formiraju strukture povećane žilavosti, plastičnosti i otpornosti na pojavu prslina.



Slika 3. Mikrostruktura metala ZUT-a zavarenog spoja čelika 30XhGSA: (a) s dominantnim sadržajem martenzita; (b) s sadržajem beinita i martenzita u odnosu 50 % – 50 %; (c) s dominantnim sadržajem beinita

Figure 3. Microstructure of the heat-affected zone (HAZ) in the welded joint of 30KhGSA steel: (a) predominantly martensitic structure; (b) mixture of bainite and martensite in a 50%–50% ratio; (c) predominantly bainitic structure



Slika 4. Oblast rasta temperatura kritičnih tačaka Ac_1 i Ac_3 u zavisnosti od brzine zagrijavanja čelika sa sadržajem ugljenika 0.2 – 0.6 mas. % [16]

Figure 4. Variation of critical transformation temperatures Ac_1 and Ac_3 as a function of heating rate for steels with a carbon content of 0.2–0.6 wt. % [16]

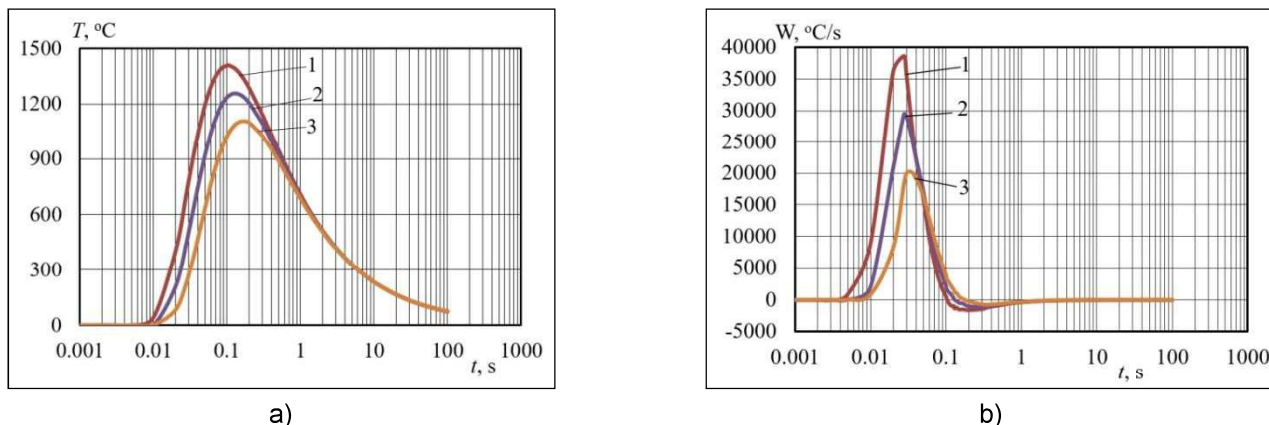
Dakle, prema slici 4 i rezultatima istraživanja [14,15], brzine zagrijavanja (sl. 1b) koje se dobijaju tokom zavarivanja pri unosu energije od 2162 J/cm, iniciraju pomjeranje kritičnih tačaka Ac_1 i Ac_3 u oblast povišenih temperatura. Ova pojava utiče na skraćenje temperaturnog opsega za rast austenitnog zrna i homogenizaciju austenita. Otuda se smanjuje nivo njegove homogenosti i otpornosti pri pothlađenju, a period inertnosti njegovog raspada se skraćuje.

Dominantni dio austenita koji je formiran u temperaturnom intervalu Ac_1 – Ac_3 ipak uspijeva postići prilično visok nivo homogenosti, što determiniše njegovu visoku stabilnost tokom pothlađenja. Stoga, pri brzinama hlađenja koje osigurava unos energije od 2162 J/cm (slika 1b), taj dio austenita se transformiše u bezdifuzionoj oblasti u martenzit. Drugi dio austenita se formira blizu gornje granice intervala Ac_1 – Ac_3 . Trajanje njegovog zadržavanja na temperaturama homogenizacije je minimalno, a shodno tome i nivoi njegove homogenosti i stabilnosti pri pothlađenju. Stoga, čak i pri brzinama hlađenja koje odgovaraju unosu energije od 2162 J/cm (slika 1b), razlaganje takvog austenita se dešava u beinitnoj oblasti.

Ipak, beinitna komponenta nije ravnomjerno raspoređena. Njen maksimalni sadržaj je blizu

fuzione granice i postepeno se smanjuje do minimuma s udaljavanjem od te granice. Ovo potvrđuje uticaj brzine zagrijavanja na kinetiku formiranja strukture metala. U blizini linije stapanja, maksimalne su brzine zagrijavanja (slika 1b; kriva 1). Zbog toga se u ovoj oblasti, prema slici 4, postižu maksimalne temperature Ac_1 i Ac_3 i koncentriše maksimalna količina austenita sa minimalnim nivoom homogenosti koji se razlaže u beinit. S udaljenjem od granice fuzije, brzine zagrijavanja se smanjuju (slika 1b; krive 2 i 3). Shodno tome, temperature Ac_1 i Ac_3 su smanjene, a takođe su smanjuje i količina austenita s minimalnim nivoom homogenosti. Dakle, kako se udaljavamo od linije stapanja, količina beinitne komponente se postepeno smanjuje.

Pri smanjenju unosa energije zavarivanja sa 2162 J/cm na 1140 J/cm, mijenja se toplotno stanje zavarenog spoja (slika 5). Trenutne brzine zagrijavanja i hlađenja se povećavaju (slike 1b i 5b). Ali čak i u ovom slučaju, u fazi hlađenja na temperaturama ispod 900 °C, termički ciklusi se spajaju, a trenutne brzine hlađenja se izjednačavaju. Razlike, i to značajne, termičkih ciklusa i krivih, koje odražavaju stope promjene njihovih temperatura, manifestuju se uglavnom u fazi zagrijavanja. Razlika između brzina zagrijavanja i hlađenja se povećava.



Slika 5. Termičko stanje ZUT-a zavarenog spoja čelika 30XГСА debljine 3.5 mm realizovanog pri unosu energije od 1140 J/cm: 1– $T_{max}=1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2– $T_{max}=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3– $T_{max}=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; a) termički ciklusi zavarivanja; b) srednje brzine zagrijavanja i hlađenja.

Figure 5. Thermal conditions in the heat-affected zone (HAZ) of a welded joint made of 30KhGSA steel with a thickness of 3.5 mm, produced at a heat input of 1140 J/cm: 1– $T_{max}=1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2– $T_{max}=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3– $T_{max}=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; (a) welding thermal cycles; (b) average heating and cooling rates.

Fazi hlađenja termičkih ciklusa pri unosu energije od 1140 J/cm (slika 5b) odgovara kriva br. 2 (slika 2). Pri takvim brzinama hlađenja, u ZUT-u treba da se formira struktura koja se sastoji od martenzita i zaostalog austenita. Saglasno pravilu proporcionalnosti odsječaka, odnos strukturnih komponenti je do 60% zaostalog austenita i do 40% martenzita. Za konačni raspad zaostalog austenita nije dovoljno hlađenje do sobne temperature, metal se mora pothladiti do temperatura ispod nule. Ovo ukazuje da se razlaganje austenita pomjera u područje nižih temperatura nego u prethodnom slučaju.

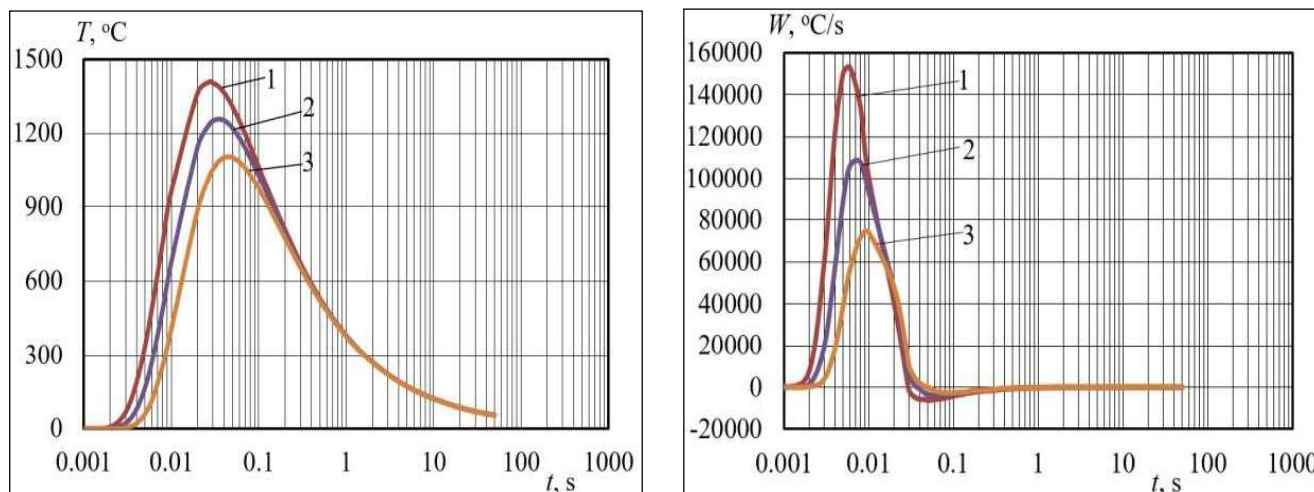
Metalografska ispitivanja daju nešto drugačiju sliku ovih transformacija. U metalu koji je podvrgnut austenitizaciji tokom zagrijavanja, formira se beinitno-martenzitna struktura (slika 3b) sa približno jednakim procentualnim udjelom strukturnih komponenti (50 % - 50 %). U poređenju sa prethodnim slučajem, raspad austenita postepeno prelazi u područje viših temperatura. Kao posledica, povećava se uticaj brzine zagrijavanja na razlaganje pothlađenog austenita, što termokinetički dijagram ne odražava.

Prema slici 4, povećanje brzine zagrijavanja inicira dalje povećanje temperatura A_{c1} i A_{c3} . Temperaturni interval homogenizacije austenita se smanjuje. Kao rezultat toga, do 50 % austenita uspijeva da se homogenizuje do nivoa pri kojem dolazi do njegovog raspada u martenzitnom području. Drugi dio austenita (do 50 %) ne uspijeva da se homogenizuje i raspada se u oblasti beinita

bez obzira na povećanje brzine hlađenja. Kao i u prethodnom slučaju, beinitna komponenta nije ravnomjerno raspoređena. Najveća količina beinita se nalazi blizu linije stapanja i postepeno se smanjuje udaljavanjem od nje. Ovo odgovara prirodi promjene brzine zagrijavanja, koja dostiže svoj maksimum blizu linije stapanja (slika 5b; kriva 1). Stoga se u ovom području, prema slici 4, dostižu maksimalne vrijednosti temperatura A_{c1} i A_{c3} , kao i maksimalne količine austenita sa minimalnim nivoom homogenosti. S udaljenjem od linije stapanja, brzine zagrijavanja (slika 5b; krive 2 i 3), kao i temperature A_{c1} i A_{c3} , opadaju. Takođe, smanjuje se i količina austenita sa niskim nivoom homogenosti, a samim tim i beinita.

Smanjenje unosa energije zavarivanja na 648 J/cm praćeno je daljim povećanjem brzine zagrijavanja i hlađenja (slika 6) i povećanjem njihove razlike. Međutim, i u ovom slučaju, kao i u prethodna dva, u fazi hlađenja na temperaturama ispod $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ dolazi do spajanja termičkih ciklusa i izjednačavanja trenutnih brzina hlađenja. Razlika između termičkih ciklusa i brzina promjene njihove temperature u potpunosti se ispoljava u fazi zagrijavanja zavarenog spoja.

Na termokinetičkom dijagramu faze hlađenja naznačenih termičkih ciklusa (slika 6a) odgovara kriva 3 (slika 2). Kriva prolazi ispod oblasti martenzitne transformacije. Stoga, u području ZUT-a, koje je zagrijavanjem podvrgnuto austenitskoj transformaciji, na temperaturama iznad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, očekuje se prisustvo zaostalog austenita. Za njegovo razlaganje neophodno je hlađenje ispod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 6. Termičko stanje ZUT-a zavarenog spoja čelika 30XГСА debljine 3.5 mm realizovanog pri unosu energije od 648 J/cm: 1– $T_{max}=1400$ °C, 2– $T_{max}=1250$ °C, 3– $T_{max}=1100$ °C; a) termički ciklusi zavarivanja; b) srednje brzine zagrijavanja i hlađenja

Figure 6. Thermal conditions in the heat-affected zone (HAZ) of a welded joint made of 30KhGSA steel with a thickness of 3.5 mm, produced at a heat input of 648 J/cm: 1– $T_{max}=1400$ °C, 2– $T_{max}=1250$ °C, 3– $T_{max}=1100$ °C; (a) welding thermal cycles; (b) average heating and cooling rates

Prema metalografskim istraživanjima, u naznačenom području ZUT-a formira se beinitno-martenzitna struktura u kojoj dominira beinit (slika 3c). Ovakva razlika u rezultatima dobijenim metalografijom i korištenjem termokinetičkog dijagrama u sva tri slučaja se može objasniti

4. Zaključak

Prethodno analizirani rezultati istraživanja pokazali su da smanjenje energije zavarivanja dovodi do istovremenog povećanja brzine zagrijavanja i hlađenja zavarenog spoja. Povećanje brzine zagrijavanja ZUT-a je praćeno povećanjem temperatura A_{c1} i A_{c3} . Ovo je praćeno smanjenjem temperaturnog intervala rasta austenitnog zrna i homogenizacije austenita, kao i vremena zadržavanja metala u njemu. Zrno se usitnjava, a smanjuju se nivo homogenosti austenita, njegova stabilnost pri hlađenju i period inercije njegovog razlaganja. Treba naglasiti da se razlaganje pomjera u područje viših temperatura [14, 15]. U ZUT-u, doprinosi formiranju fino zrnastih struktura veće žilavosti, duktilnosti i otpornosti na formiranje prslina.

isključivo uticajem stepena zagrijavanja na kinetiku razlaganja pothlađenog austenita, što nije moguće uočiti na osnovu analiza termokinetičkih dijagrama.

4. Conclusion

The previously analyzed research findings indicate that a reduction in welding heat input leads to a simultaneous increase in both the heating and cooling rates of the welded joint. The accelerated heating of the heat-affected zone (HAZ) results in an upward shift in the critical transformation temperatures A_{c1} and A_{c3} . This shift is accompanied by a narrowing of the temperature range for austenite grain growth and homogenization, as well as a reduction in the time the metal remains within this range. Consequently, grain refinement occurs, while the level of austenite homogeneity, its thermal stability during cooling, and the incubation period for its decomposition are all reduced. It is important to note that austenite decomposition shifts toward higher temperatures [14, 15]. In the HAZ, this behaviour promotes the formation of fine-grained microstructures, which exhibit improved toughness, ductility, and resistance to crack initiation.



Međutim, kako se povećava brzina zagrijavanja, tako se povećava i brzina hlađenja. Očekivano je da ovo bude praćeno obrnutim procesom – razlaganjem austenita u niskotemperaturnoj oblasti uz povećanje osjetljivosti ZUT-a na zakaljenje. Ipak, kao što potvrđuju prezentovani podaci, kako se povećava brzina zagrijavanja, njen pozitivan učinak na kinetiku razgradnje pothlađenog austenita u ZUT-u postepeno raste, bez obzira na negativan uticaj povećanja brzine hlađenja.

Dakle, uticaj stepena zagrijavanja na strukturu ZUT-a zavarenih spojeva ogleda se u sledećem. U fazi zagrijavanja formiraju se metalna zrna i definiše se njihova veličina. Takođe, kako je $\alpha \rightarrow \gamma$ transformacija završena u temperaturnom intervalu $A_{c1}-A_{c3}$, određuju se nivo homogenosti austenita, njegova postojanost i period inercije raspadanja, na čemu se zasniva kinetika strukturnih transformacija u fazi hlađenja. Posljedično, formiranje strukture ZUT-a zavarenih spojeva ugljeničnih čelika počinje u fazi zagrijavanja u međukritičnom intervalu ($A_{c1}-A_{c3}$). Faza hlađenja završava ovaj proces razlaganjem austenita. Faza zagrijavanja termičkog ciklusa zavarivanja ima dominantan uticaj na kinetiku formiranja strukture metala u ZUT-u zavarenih spojeva.

Izmjena nivoa homogenosti austenita, njegova postojanost pri hlađenju, kao i period inertnosti razlaganja se mogu kontrolisati upravljanjem procesom formiranja strukture ZUT-a i njegovim svojstvima.

Literatura / References

[1] Патон, Б. Е., (1974), Технология электрической сварки плавлением, Машиностроение, Москва

[2] Акулов, А. И., Бельчук, Г. А., Демянцевич, В. П., (1977), Технология и оборудование сварки плавлением, Машиностроение, Москва

[3] Гуляев, А. П., Металловедение, (1966), Металлургия, Москва

[4] Фролов, В. В., Парахин, В. А., Ермолаева, В. И., Макаров, Э. Л., Григорьянц, А. Г., Гаврилюк, В. С., Шип, В. В., (1988) под ред. В. В. Фролова, Теория сварочных процессов: учебник, М.: Высшая школа

[5] Новикова Д. П., (1989), Высокотемпературная металлография сварных соединений, Киев: Наукова думка (Научная мысль)

However, as the heating rate increases, the cooling rate also rises. This is typically expected to cause the opposite effect—favouring low-temperature austenite decomposition and increasing the HAZ's susceptibility to hardening. Nevertheless, as confirmed by the presented data, the beneficial influence of higher heating rates on the decomposition kinetics of undercooled austenite in the HAZ becomes increasingly significant, despite the adverse effects of faster cooling.

Therefore, the influence of heating intensity on HAZ microstructure can be described as follows: during the heating phase, metallic grains are formed and their size is determined. Since the $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation completes within the $A_{c1}-A_{c3}$ temperature interval, this stage also establishes the degree of austenite homogeneity, its stability, and the incubation time for its decomposition—parameters that directly govern the kinetics of structural transformations during cooling. As a result, the formation of HAZ microstructure in welded joints of carbon steels begins in the heating phase within the intercritical temperature range ($A_{c1}-A_{c3}$), and is completed during the cooling phase through austenite decomposition. The heating stage of the welding thermal cycle exerts the dominant influence on the kinetics of microstructural evolution in the HAZ.

Adjustments in austenite homogeneity, its stability during cooling, and the incubation time for its transformation can be controlled by managing the structure formation process in the HAZ and tailoring its resulting properties.

[6] Лебедев Ю. М., (1993), Регулирование структуры и свойств зоны термического влияния при сварке высокопрочных сталей, Николаевский кораблестроительный ин-т им. С.О.Макарова, Николаев, Украина

[7] Попов А. А., Попова А. Е., (1961), Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита, Москва: Машгиз

[8] Грабин В. Ф., Денисенко А. В., (1978), Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей, Киев: Наукова думка (Научная мысль)

[9] Грабин В. Ф., (1982), Металловедение сварки плавлением, Киев: Наукова думка (Научная мысль)



[10] Макара, А. М., Мосендз М.А., (1971), Сварка высокопрочных сталей, К: Техніка, Киев

[11] Багрянский, К. В., Добротина, З. А., Хренов, К. К., (1976), Теория сварочных процессов, К: Вища школа, Киев

[12] Позняков, В. Д., Костин, В. А., Гайворонский, А. А., Моссоковская, И. А., Жуков, В. В., Клапатюк, А. В., (2015), Влияние термического цикла сварки на структурно-фазовые превращения и свойства металла ЗТВ среднеуглеродистой легированной стали типа 30X2H2MФ, Автоматическая сварка, 2, 8-15.

[13] Сорокин, В. Г., Волосникова, А. В., Вяткин, С. А. и др., (1989), под ред. Сорокина, В. Г., Марочник сталей и сплавов, М.: Машиностроение, Москва

[14] Гриднев, В. Н., Мешков, Ю. Я., Ошкадеров, С. П., Трефилов, В. И., (1973), Физические основы электротермического упрочнения стали, К.: Наукова думка, Киев

[15] Савицкий А.М., (2001), Управление структурой и свойствами металла при дуговой сварке закаливаемых сталей. Автореф. диссертации дис. канд. техн. Наук, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

[16] Савицкий А. М., Савицкий М. ,(2017), Особенности влияния теплопроводности на склонность сталей к образованию сварных соединений, Металловедение и обработка металлов, 3, 40–47.

Vesti**News**

72. GODIŠNJA SKUPŠTINA DUZS

Redovna 72. godišnja skupština DUZS zakazana je za ponedjeljak, 30. jun 2025. godine u svečanoj sali Instituta IMS u Beogradu, Bulevar vojvode Mišića 43, sa sledećim dnevnim redom:

1. Otvaranje zasedanja Skupštine i izbor radnih tela
2. Verifikacija mandata članova Skupštine
3. Izveštaj o radu DUZS za period 2024 - 2025. godine.
Podnosilac izveštaja: predsednik DUZS
4. Izveštaj o radu DUZS-CertPers za period 2024 - 2025. godine.
Podnosilac izveštaja: izvršni rukovodilac DUZS-CertPers
5. Izveštaj o finansijskom poslovanju u 2024. godini.
Podnosilac izveštaja: predsednik Nadzornog odbora
6. Diskusija po podnetim izveštajima i usvajanje izveštaja
7. Predlog plana rada za 2025 - 2026. godinu; diskusija i usvajanje
8. Razno



Radomir Jovičić ^{1,a}, Simon Sedmak ¹, Mihajlo Arandjelović ¹, Dejan Jovičić ², Jernej Markež ³, Danijel Pavlović ⁴

OSOBINE SPOJEVA ZAVARENIH IZMEĐU NISKOUGLJENIČNIH I VISOKOLEGIRANIH ČELIKA

PROPERTIES OF WELDED JOINTS BETWEEN LOW-ALLOYED AND HIGH-ALLOYED STEEL

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Januar 2025.

Adresa autora / Author's address:

¹ Inovacioni centar Mašinskog fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija

² SchwingStetter doo, Smederevo, Srbija;

³ Metalweld, Sosnowiec, Poljska

⁴ Institut Goša, Beograd, Srbija

Email / ORCID ID:

^a jovicicrad@gmail.com

Ključne reči: niskougljenični čelici, austenitni čelici, zavareni spoj, dodatni materijali

Keywords: low-alloyed steel, austenitic steel, welded joint, filler material

Rezime

Osobine spojeva zavarenih između niskougljeničnih čelika povišene čvrstoće i visokolegiranih austenitnih čelika u značajnoj meri zavise od osobina dodatnog materijala kojim su ti spojevi zavareni. Osnovne smernice za izbor dodatnih materijala za ove spojeve daje Shefflerov dijagram. Međutim, smernice iz ovog dijagrama su orijentisane pre svega na izbegavanje pojave toplih prslina u navedenim spojevima. Zbog toga se često ne obraća dovoljno pažnje na razlike u mikrostrukturama i mehaničkim osobinama pojedinih delova ovih spojeva. Navedene razlike mogu imati mnogo veći uticaj na ponašanje ovakvih spojeva tokom eksploatacije, od eventualno prisutnih toplih prslina. U radu su prikazani rezultati ispitivanja dva zavarena spoja. Jednog, zavarenog dodatnim materijalom čijom se upotrebom smanjuje verovatnoća pojava toplih prslina i drugog, čijom se upotrebom obezbeđuje optimalan odnos mehaničkih osobina pojedinih delova spoja.

Abstract

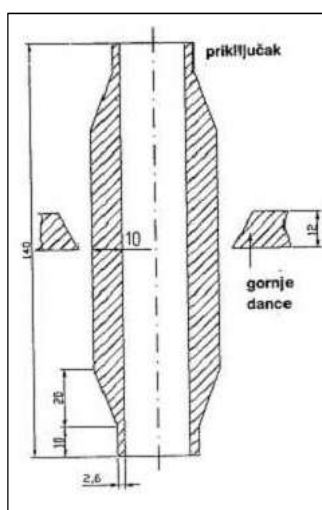
Mechanical properties of welded joints made of high-strength low-alloy and high-alloyed austenitic steels mainly depend on the properties of the filler material used for their welding. Basic guidelines for selection of filler materials for such welds are provided by the Sheffler diagram. However, these guidelines are mainly oriented towards the avoidance of hot crack occurrence in the aforementioned joints. Due to this and more often than not, insufficient attention is devoted to microstructural differences, and the resulting mechanical properties of welded joint regions. These differences can have a much higher influence on the behaviour of such welded joints during exploitation, when compared to hot cracks. This paper presents the results of testing of two welded joints. One of them was welded using a filler material whose purpose is to prevent hot cracks from occurring, and the other was used in order to obtain the optimal relationship between the mechanical properties of individual weld regions.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine



1. Uvod

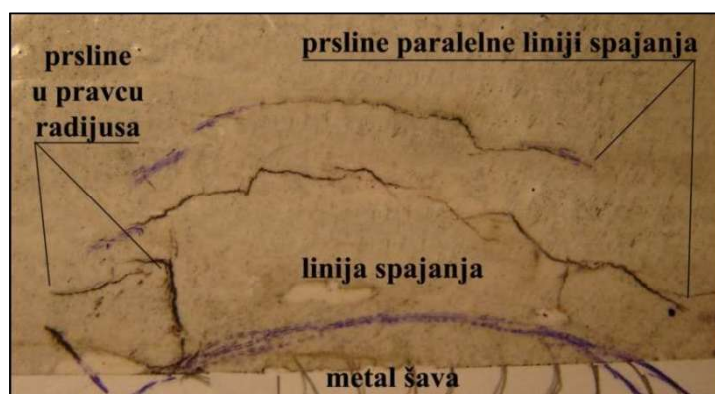
Tokom eksploatacije rezervoara za skladištenje utečjenog ugljendioksida ukazala se potreba za ugradnjom dva nova priključka u njegovo gornje danace. Osnovni podaci o rezervoaru su: zapremina 25 m³, maksimalni radni pritisak 25 bara, ispitni pritisak 32,5 bara, najniža radna temperatura -50°C, spoljni prečnik 2000 mm i ukupna visina 10080 mm. Rezervoar je izrađen od mikrolegiranog čelika P460 NL1 (NIOVAL 47), debljine 12 mm [1].



Slika 1. Izgled priključka
Figure 1. Connection layout

Nakon zavarivanja, a pre izlaganja rezervoara unutrašnjem pritisku, spojevi priključaka su ispitani metodama bez razaranja. Ispitivanjem magnetnim česticama, pored jednog od spojeva, otkrivene su prsline u materijalu danca. Slika 2. prikazuje otisak ovih prslina dobijen pomoću crnog magnetnog praha. Ispitivanjem ultrazvukom, na liniji stapanja u oba spoja, su otkrivene pore i uključci šljake. Na slici 2. se vide tri prsline paralelne liniji stapanja, dužina 60, 46 i 9 mm čija najveća dubina, izmerena ultrazvukom, iznosi 3,5 mm. Ove prsline su udaljene od linije stapanja i nalaze se u osnovnom materijalu (OM) danca. Na slici se uočavaju i tri prsline upravne na liniju stapanja, dužina 10, 9 i 5 mm, čija najveća izmerena dubina iznosi 6,5 mm. One uglavnom počinju od linije stapanja (LS). Na osnovu izgleda može se pretpostaviti da su otkrivene prsline tipa hladnih prslina. Sve prsline su nastale kao posledica delovanja velikih zaostalih napona, pri čemu su nastanak prslina usmerenih u pravcu radijusa priključka, olakšale greške na liniji stapanja.

Za izradu novih priključaka, slika 1., korišćeni su materijali i tehnologija zavarivanja koje je koristio i proizvođač pri izradi rezervoara [1]. Upotrebljen je visokolegirani austenitni čelik X6CrNiMo17 12 2, debljine 10 mm. Priključci su zavareni E postupkom obloženom elektrodom tipa INOX R 29 9 (standard EN 1600) [2]. Detalji o tehnologiji ugradnje i zavarivanja priključaka su dati u [3, 4].



Slika 2. Otisak prslina pored spoja priključka
Figure 2. A imprints of cracks next to the connector joint

2. Eksperiment

Da bi se razumela pojava opisanih prslina urađen je eksperiment u kome je ispitivan međusobni uticaj mehaničkih osobina OM i dodatnih materijala (DM) na ponašanje spojeva kao celine i na njihovu sklonost ka nastanku prslina. Za potrebe eksperimenta su zavarena dva spoja.

Za izradu prvog spoja korišćene su ploče dimenzija 500 x 200 mm, izrađene od čelika P460NL1 (NIOVAL 47) debljine 12 mm i visokolegiranog austenitnog čelika X6CrNiMo17 12 2, debljine 14 mm. Spoj je zavaren E postupkom dodatnim materijalom (DM) INOX R 29 9. Korišćena je tehnologija zavarivanja koja je primenjena za zavarivanje priključaka [4].

Za izradu drugog spoja su, takođe, korišćene ploče dimenzija 500 x 200 mm izrađene od čelika S 500 NL, debljine 14 mm i visokolegiranog čelika X6CrNiMo17 12 2, debljine 14mm. Spoj je zavaren MIG postupkom DM MIG 18/8/6 (standard EN ISO 14343 - A). Korišćena tehnologija zavarivanja je data u literaturi [5].



3. Rezultati i diskusija

3.1. Osnovni i dodatni materijali

Hemijski sastavi i mehaničke osobine OM, čelika NIOVAL 47 (M1), S 500 NL (M2) i visokolegiriranog

čelika X6CrNiMo17 12 2 (V) su dati u tabelama 1. i 2. Ovi rezultati su dobijeni ispitivanjima uzoraka uzetih iz zavarenih ploča.

Tabela 1. Hemijski sastavi osnovnih materijala (mas. %)

Table 1. Chemical composition of base metals (wt%)

Čelik	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Ti	V	Nb
M 1	0,10	0,49	1,26	0,011	0,014	0,08	0,11	0,21	0,067	0,019	0,002	0,048	0,053
M 2	0,10	0,38	0,64	0,014	0,020	0,76	0,10	0,30	0,015	0,33	-	0,02	0,042
V	0,04	0,35	1,73	0,031	0,004	17,9	11,6	0,18	0,061	2,16	0,38	0,079	0,016

Tabela 2. Mehaničke osobine osnovnih materijala

Table 2. Mechanical properties of base metals

	Gornji napon tečenja R_{EH} (MPa)	Donji napon tečenja R_{EL} (MPa)	Napon tečenja $R_{p0,2}$ (MPa)	Zatezna čvrstoća R_m (MPa)	Izduženje A (%)	Kontrakcija Z (%)
M1	453	435	-	565	25	58
M2	-	-	492	620	20	65
V	-	-	324	595	37	53

Mikrostrukturnim ispitivanjima je utvrđeno da čelici M1 i M2 imaju feritno - perlitnu, a da čelik V ima austenitnu mikrostrukturu [5, 6]. Hemijski sastavi DM i mehaničke osobine metala šava (MŠ)

su dati u tabelama 3. i 4. Hemijski sastavi DM su uzeti iz [2], a mehaničke osobine MŠ su dobijene ispitivanjem okruglih epruveta uzetih iz MŠ ispitnih ploča.

Tabela 3. Hemijski sastavi dodatnih materijala (mas. %)

Table 3. Chemical composition of filler materials (wt%)

	C	Si	Mn	Cr	Ni
INOX R 29/9	0,15	≤ 0,9	0,9	29	9
MIG 18/8/6	0,08	≤ 0,8	7	18,5	9

Tabela 4. Mehaničke osobine metala šava

Table 4. Mechanical properties of weld metal

	Dodatni materijal	Napon tečenja $R_{p0,2\%}$ (MPa)	Zatezna čvrstoća R_m (MPa)	Izduženje A_5 (%)	Kontrakcija Z (%)
Uzorak 1.	INOX R 29/9	550	750	42	42
Uzorak 2.	MIG 18/8/6	466	682	42	-

3.2. Rezultati ispitivanja metala šava

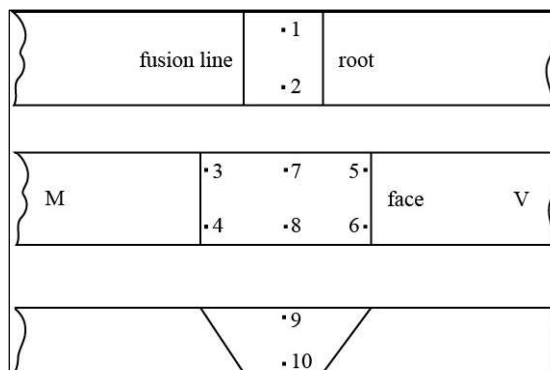
Hemijski sastav oba MŠ je ispitan metodom spektralne analize prenosnim spektroskopom NITON tip XL3, slika 3. Uređaj analizira hemijski sastav sa površine prečnika 3 mm i ima optiku kojom je moguće, pre analiziranja, utvrditi mesto koje će biti analizirano. Na taj način je moguće ispitati hemijski sastav MŠ neposredno uz LS sa

oba OM. Uređaj ne može da analizira sadržaj C. Analize su urađene na epruветama za ispitivanje zateznih karakteristika spojeva u celini. Slika 4. prikazuje raspored mernih mesta, a tabela 5. rezultate ispitivanja. S obzirom da sadržaj C bitno utiče na veličinu $Ni_{ekv.}$ a da ovim uređajem C nije mogao biti ispitan, $Ni_{ekv.}$ je izračunat tako što su usvojene vrednosti za sadržaj C iz kataloga proizvođača, tabela 3. [2]. Na isti način je izvršena korekcija $Cr_{ekv.}$ za sadržaj Si.



Slika 3. Analiza hemijskog sastava MŠ

Figure 3. Analysis of the chemical composition of weld metal



Slika 4. Mesta analize hemijskog sastava MŠ

Figure 4. Locations of analysis of the chemical composition of weld metal

Tabela 5. Rezultati hemijskih analiza MŠ spojeva zavarenih DM INOX 29/9 i MIG 18/8/6 (mas %)

Table 5. Results of chemical analyzes of WM joints welded by FM INOX 29/9 and MIG 18/8/6 (wt %)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spoj 1. Inox R 29/9	Cr	23,96	-	20,48	20,08	26,99	26,53	26,45	26,51	24,50	25,24
	Ni	7,78	-	6,17	5,91	7,85	8,43	8,15	8,09	7,22	7,94
	Mn	1,68	-	1,53	1,41	1,51	1,61	1,63	1,53	1,73	1,52
	Cr _{ekv.}	25,3	-	21,8	21,4	28,3	27,9	27,8	27,9	25,9	26,6
	Ni _{ekv.}	13,1	-	11,4	11,1	13,1	13,7	13,5	13,4	12,6	13,2
Spoj 2. MIG 18/8/6	Cr	16,73	17,06	15,70	15,21	17,45	17,50	16,10	16,60	17,12	16,42
	Ni	7,68	7,83	6,70	6,49	7,18	7,50	6,96	7,08	8,62	7,16
	Mn	5,76	5,83	5,90	5,90	6,34	6,53	5,91	6,11	5,37	5,64
	Cr _{ekv.}	17,9	18,3	16,9	16,4	18,7	18,7	17,3	17,8	18,3	17,6
	Ni _{ekv.}	13,0	13,2	12,1	11,8	12,8	13,2	12,3	12,5	13,7	12,4

Rezultati merenja tvrdoća na uzorku 1. [6] pokazuju da se tvrdoće ZUT čelika M1 kreću od 189 – 228 HV i da su veće od tvrdoća OM M1 (172 - 186 HV). One umereno rastu idući od korena (202 HV) ka licu šava (228 HV). Tvrdoće ZUT čelika V se kreću od 187 – 201 HV i jednake su tvrdoćama OM V (187 – 194 HV). One se bitno ne menjaju duž ZUT. Tvrdoće MŠ se kreću od 220 – 274 HV. Ove tvrdoće su najveće u sredini MŠ (258 - 274 HV) i opadaju ka licu i korenu. Merenje tvrdoća po horizontalnim linijama u MŠ pokazuju da su one, u blizini linija stapanja sa oba OM, približno iste.

Rezultati merenja tvrdoća na uzorku 2. [5] pokazuju da se tvrdoće ZUT čelika M2 kreću od 199–333 HV i da su veće tvrdoća OM M2 (180–193 HV). One rastu od sredine ZUT ka licu (274 HV) i korenu šava (333 HV). Tvrdoće ZUT čelika V se kreću od 153–192 HV i jednake su tvrdoćama OM V (168–193 HV). One se ne menjaju bitno duž ZUT. Tvrdoće MŠ se kreću od 180–209 HV. Ove tvrdoće su najveće u sredini MŠ (209 HV) i opadaju ka licu i korenu.

U ZUT čelika M1, uzorak 1. [6] u korenom delu šava je uočena sitnozrna feritno - perlitna struktura. Ka licu šava struktura je grublja i raste udeo beinita. Najgrublja, benitna struktura se javlja u ZUT poslednjeg prolaza. U ZUT čelika M1 nije otkriven martenzit. Struktura MŠ je austenitna sa udelom δ - ferita. Idući od korena ka licu šava struktura postaje grublja i raste udeo δ - ferita do 30 – 35%. U ZUT čelika V, nisu otkrivene strukturne promene. Uočen je samo rast zrna. U ZUT čelika V, uzorak 2. [5] uočena su krupna austenitna zrna. U ZUT čelika M2 uočena je feritno - perlitnu struktura sa značajnim udelom beinita. MŠ ima austenitnu strukturu sa udelom manjim δ - ferita.

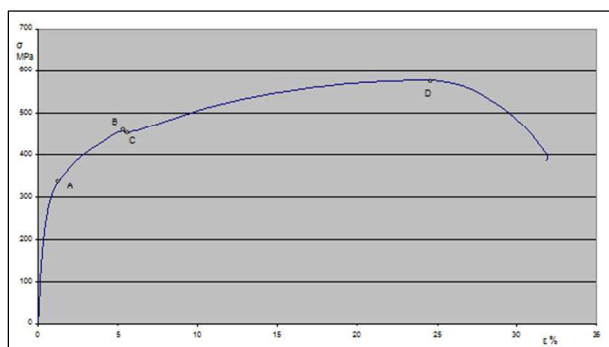
3.3. Rezultati ispitivanja zateznih karakteristika spojeva kao celine

Zatezne karakteristike spojeva u celini su ispitane na po tri pljosnate epruvete sa paralelnim bokovima. Rezultati ispitivanja [5, 6] su prikazani na slici 5. Na dijagramu $\sigma - \epsilon$, uzorak 1., slika 5.a) uočavaju se četiri karakteristične tačke. One

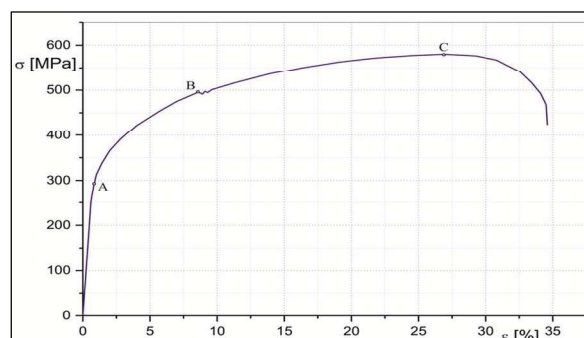


odgovaraju naponu tečenja čelika V (A), gornjem i donjem naponu tečenja čelika M1 (B, C) i zateznoj čvrstoći čelika M1 (D), tabela 2. Do loma sve tri epruvete je došlo u OM čelika M1, slika 5.c).

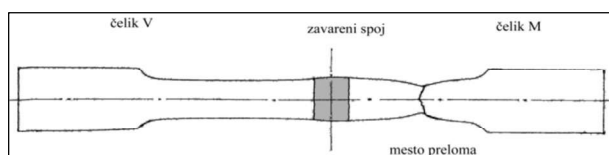
Kontrakcija poprečnog preseka epruveta je najmanja u sredini MŠ i iznosi 2%. Kontrakcija MŠ na LS sa čelikom V je veća (6%) nego kontrakcija na LS sa čelikom M1 (3%), slika 5.e).



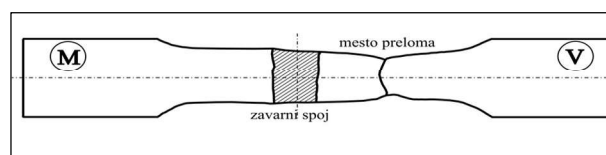
a)



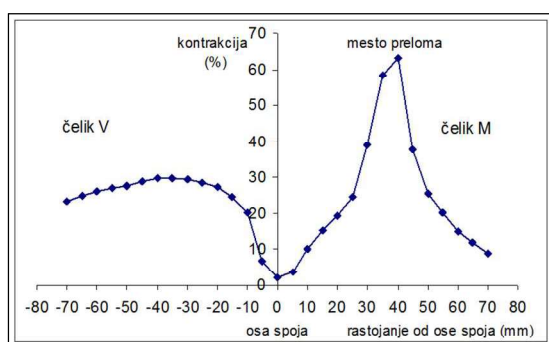
b)



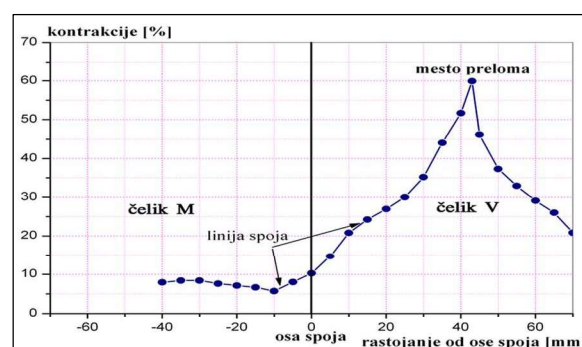
c)



d)



e)



f)

Slika 5. Zatezne karakteristike spoja u celini: a) dijagram $\sigma - \epsilon$, epruveta iz uzorka 1. b) dijagram $\sigma - \epsilon$ epruveta iz uzorka 2. c) epruveta uzorak 1. nakon loma d) epruveta uzorak 2. nakon loma e) promena kontrakcije porečnog preseka mernog dela epruvete, uzorak 1. f) promena kontrakcije porečnog preseka mernog dela epruvete, uzorak 2.

Figure 5. Tensile properties of welded joint: a) $\sigma - \epsilon$ diagram, sample 1; b) $\sigma - \epsilon$ diagram, sample 2; c) specimen from sample 1 after fracture; d) specimen from sample 2 after fracture; e) changes in cross section contraction, sample 1; f) changes in cross section contraction, sample 2

Na dijagramu $\sigma - \epsilon$, uzorak 2., slika 5.b) uočavaju se tri karakteristične tačke. One odgovaraju naponu tečenja čelika V (A), naponu tečenja čelika M2 (B) i zateznoj čvrstoći čelika V (C), tabela 2. Na sve tri epruvete do loma je došlo u OM čelika V, slika 5.d). Najmanja kontrakcija poprečnog preseka tj. najmanja deformacija (5%) se javlja na LS MŠ i čelika M2. Sredina MŠ ima kontrakciju od 10%. Kontrakcija MŠ na LS sa

čelikom V je veća (22%) nego kontrakcija na LS sa čelikom M2 (5%), slika 5.f).

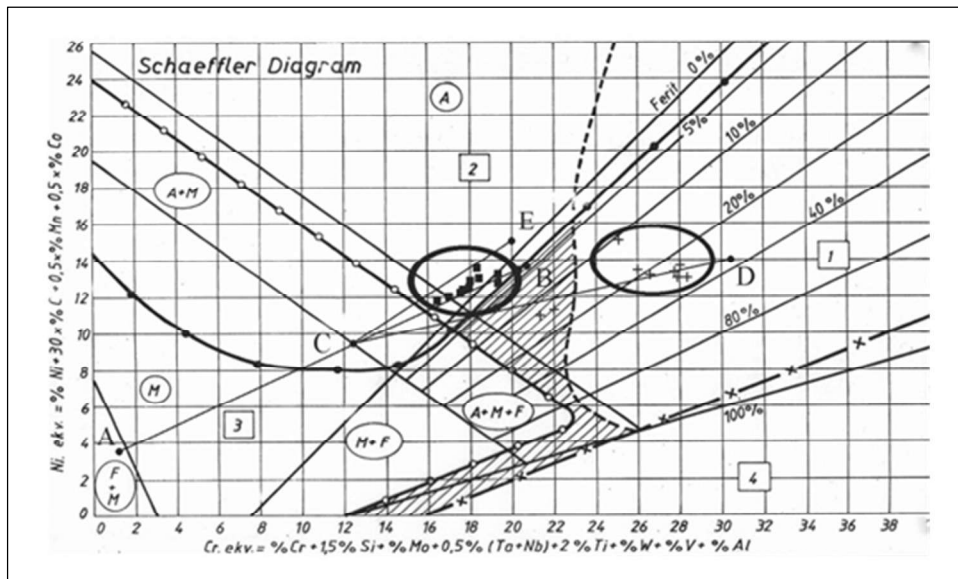
3.4. Diskusija

U literaturi [6, 7] se preporučuje da se DM za zavarivanje mikrolegiranih sa austenitnim čelicima (F - A spojevi) bira na osnovu Schaefflerovog dijagrama, slika 6. Uz pomoć ovog dijagrama mogu se odabrati hemijski sastavi DM koji obezbeđuju strukture MŠ bez grešaka. U slučaju F - A spojeva te greške mogu da budu hladne i tople prsline i



krstost usled rasta zrna ili izdvajanja krtih sekundarnih faza. Optimalan hemijski sastav MŠ tj. sastav bez pojave navedenih grešaka se nalazi unutar šrafiranog područija na slici 6. Najčešće greške u MŠ sa austenitnom strukturom su tople prslina. Otpornost MŠ na pojavu toplih prslina raste u prisustvu δ – ferita i da je najveća pri njegovom učešću od 3 – 10%. Za izbor optimalnog hemijskog sastava MŠ, potrebno je da se poznaju hemijski sastavi oba OM i DM i stepeni njihovog mešanja. Da bi se dobio MŠ sa austenitnom strukturom

potrebno je da upotrebljeni DM bude austenitnog tipa [8, 9]. Stepem mešanja zavisi od izabranog postupka zavarivanja [10], oblika žleba, parametara zavarivanja, predgrevanja, smera zavarivanja, njihanja ili pravolinijskog vođenja luka i ugla luka u odnosu na površinu OM. Uticaj ovih faktora je teško preciznije odrediti, pa je zbog toga praktično teško unapred obezbediti da se količina δ – ferita nađe u preporučenih 3-10 %.



Slika 6. Schaefflerov dijagram: unutar elipsi su date pozicije hemijskih sastava oba MŠ dobijenih spektralnom analizom

Figure 6. Schaeffler diagram: chemical compositions of both WM obtained by chemical analysis are grouped into two ellipses

Ako se u Schaefflerov dijagram unesu pozicije čelika M1 i M2 (A) i čelika V (E) i pozicije DM MIG 18/8/6 (B) i INOX R 29 9 (D) i ove pozicije spoje na način kako je objašnjeno u literaturi [6, 7] dobijaju se, na osnovu pretpostavljenih stepena mešanja, pozicije hemijskih sastava i mikrostrukture MŠ. Pozicija MŠ dobijenog zavarivanjem DM MIG 18/8/6 (B), uzorak 2. je unutar leve elipse na slici 6. a pozicija MŠ dobijenog zavarivanjem DM INOX R 29 9 (D), uzorak 1. je unutar desne elipse na istoj slici. U MŠ uzorka 1. se može očekivati pojava toplih prslina zbog male i nedovoljne količine δ – ferita, a u MŠ uzorka 2. se može očekivati krtost usled izdvajanja sekundarnih faza.

Hemijski sastavi oba MŠ, tabela 5. su na dijagramu na slici 6. prikazani unutar dve elipse. Rasipanje rezultata hemijskih analiza se posledica različitih stepena mešanja OM i DM po visini i širini spojeva. Kod višeprolaznih šavova samo koreni zavar nastaje istovremenim mešanjem oba OM i DM [6, 7]. Ostali zavari nastaju mešanjem jednog

od OM i prethodnog zavara zbog čega treba očekivati da svaki zavar ima drugačiji hemijski sastav i time i strukturu. Na osnovu toga se može zaključiti da leva i desna strana F – A spojeva neće imati isti hemijski sastav zbog razlika u hemijskim sastavima OM, tabela 5. Promene hemijskog sastava MŠ se mogu očekivati i po njegovoj visini, tabela 5. One su utoliko više izražene ukoliko je više legiran DM i ukoliko se zavaruju deblji materijali, zbog većeg broja zavara i veće širine lice šava. Promene hemijskog sastava pojedinih zavara utiču i na količinu δ -ferita u njima. Mikrostrukturnim ispitivanjima uzorka 1. je utvrđeno da se količina δ -ferita u MŠ povećava idući od korena ka licu šava i da dostiže 30 – 35%. U MŠ uzorka 2. otkrivene su manje količine δ – ferita. Ispitivanjima nisu otkrivene tople prslina ni u jednom od ispitivanih spojeva.

Osnovni problem koji se očekuje u ZUT mikrolegiranih čelika F – A spojeva [6, 7, 10] je pojava martenzita. Rezultati ispitivanja tvrdoća i



mikrostruktura pokazuju da se u ZUT ispitivanih uzoraka nije pojavio martenzit. U ZUT u oba F – A spoja uočen je beinit. Razlog zbog koga se u zoni mešanja mikrolegiranih čelika i visokolegiranih DM nije pojavio martenzit je verovatno nizak sadržaj C u oba OM, tabela 1. U ZUT austenitnog čelika nisu uočene strukturne promene. Uočen je samo rast austenitnog zrna.

Lom uzorka 1., slika 5.c) u OM čelika M1 pokazuje da je ovaj OM najslabije mesto u ovom F – A spoju. Sredina MŠ ima najmanju plastičnu deformaciju (do 2%) slika 5.e). Dijagram $\sigma - \epsilon$, slika 5.a) pokazuje da plastična deformacija epruvete započinje u OM čelika V jer je njegov napon tečenja niži od napona tečenja čelika M1 i MŠ, tabele 2. i 4. Tokom daljeg povećanja napona plastična deformacija se razvija samo u čeliku V sve dok napon ne dostigne napon tečenja čelika M1. Sa daljim povećanjem napona plastična deformacija se odvija istovremeno u oba OM. Neposredno pre nego što napon dostigne zateznu čvrstoću čelika M1 tj. napon pri kome se epruveta lomi, započinje plastična deformacija i u MŠ. Napon tečenja MŠ je malo niži od zatezne čvrstoće čelika M1 zbog čega nema dovoljno vremena za razvoj veće plastične deformacije u MŠ. I pored toga što plastična deformacija pre započinje u čeliku V do loma dolazi u čeliku M1 zato što je njegoa deformaciona sposobnost manja pa se pre iscrpljuje.

U slučaju ovog F – A spoja mogu se očekivati veliki zaostali naponi, koji su posledica razlika u fizičkim osobinama čelika M1 i MŠ i velike čvrstoće

4. Zaključak

Schaefflerov dijagram omogućava izbor dodatnog materijala čijom upotrebom je moguće smanjiti verovatnoću pojave grešaka u metalu šava zavarenog između niskougljeničnih i visokolegiranih austenitnih čelika. Strukture ovih šavova i pojava grešaka u njima zavise, pored hemijskih sastava osnovnih materijala i dodatnog materijala i od stepena njihovog mešanja. Stepenn mešanja zavisi od više parametara i teško ga je unapred preciznije predvideti, što dovodi do nepouzdanosti u predviđanju dobijenih struktura i u proceni pojave grešaka u metalu šava. Time se smanjuje i pouzdanost u izboru dodatnog materijala.

Zavareni spojevi između niskougljeničnih i austenitnih čelika imaju izraženu strukturnu nehomogenost, jer se sastoje od dva različita osnovna materijala, njihovih ZUT i metala šava. Ova nehomogenost dovodi do razlika u

samog MŠ. Ovi naponi se rasterećuju na račun plastične deformacije oba OM. Međutim, pošto čelik M1 ima manju deformacionu sposobnost i nižu zateznu čvrstoću prsline se pre mogu pojaviti u njemu.

Za izradu uzorka 2. korišćen je DM niže čvrstoće i veće plastičnosti. U ovom F – A spoju najslabije mesto je OM čelika V u kome se epruveta polomila, slika 5.d). Najmanju plastičnu deformaciju (5%) u ovom spoju ima materijal na LS MŠ i čelika M2, slika 5.f). Dijagram $\sigma - \epsilon$ na slici 5.b) pokazuje da plastična deformacija epruvete i u ovom slučaju započinje u OM čelika V jer je njegov napon tečenja niži od napona tečenja čelika M2 i MŠ, tabele 2. i 4. Tokom daljeg povećanja napona plastična deformacija se razvija samo u čeliku V sve dok napon ne dostigne napon tečenja MŠ. Sa daljim povećanjem napona plastična deformacija se odvija istovremeno u čeliku V i MŠ sve do dostizanja napona tečenja čelika M2. Dalje povećanje izaziva istovremenu plastičnu deformaciju u sva tri materijala u spoju. U ovim uslovima se najpre dostiže zatezna čvrstoća čelika V pa se epruveta lomi u njemu.

U slučaju ovog F – A spoja mogu se očekivati manji zaostali naponi nego u prethodnom slučaju zbog manjeg napona tečenja MŠ. Nastanak i razvoj prsline iz grešaka u MŠ u ovom slučaju nije mnogo verovatan zbog velike duktilnosti MŠ. Sa aspekta sigurnosti od loma ovog F – A spoja povoljna okolnost je to što se deformacija u najvećoj meri razvija u materijalima koji mogu da podnesu veliki stepen plastične deformacije.

4. Conclusion

Schaeffler's diagram allows the selection of an filler material, the use of which can reduce the probability of defects in the weld metal between low-carbon and high-alloy austenitic steels. The structures of these seams and the occurrence of errors in them depend, in addition to the chemical composition of the basic materials and filler materials, and on the degree of their mixing. The degree of mixing depends on several parameters and it is difficult to predict it more precisely in advance, which leads to unreliability in predicting the obtained structures and in assessing the occurrence of defects in the weld metal. This reduces the reliability in the choice of filler material.

Welded joints between low-carbon and austenitic steels have pronounced structural inhomogeneity, because they consist of two different base materials, their HAZ and weld metal.



karakteristikama čvrstoća i plastičnosti pojedinih delova spoja što, dalje, dovodi do njihovog različitog ponašanja pod dejstvom istog opterećenja. Predviđanje ponašanja pojedinih delova heterogenih spojeva, tokom opterećivanja, je zato znatno složenije nego predviđanje ponašanja spojeva između istrodnih čelika.

Za obezbeđenje pouzdanosti u eksploataciji spojeva zavarenih između niskougleničnih i visokolegiranih austenitnih čelika nije dovoljna procena verovatnoće pojave grešaka u metalu šava zasnovana na Schaefflerovom dijagramu. Da bi se obezbedila pouzdanost ovih spojeva u eksploataciji potrebna je još i ocena zasnovana na eksperimentalnim ispitivanjima spojeva kao celine.

Literatura / References

[1] Tehnička dokumentacija rezervoara, (1983), tip SRU V25, f.b. 1503, proizvođač TPO Gorazde

[2] Dodatni materijali za zavarivanje, (2004), Katalog, Elektrode Jesenice

[3] Tehnologija ugradnje priključaka za freonsku jedinicu u rezervoar za skladištenje tečnog ugljedioksida f.b. 1503, Mašinski fakultet u Beogradu, 2001.

[4] Anderson, T.L., (2017), Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications 4th Edition, CRC Press Elaborat o zavarivanju i ispitivanju priključaka za freonsku jedinicu na rezervoaru za skladištenje tečnog ugljedioksida f.b. 1503, Mašinski fakultet u Beogradu, 2003.

[5] Bukvić, A. Istraživanje uticaja dodatnih materijala kod feritno – austenitnih zavarenih spojeva u cilju optimizacije konstrukcija, Ph.D. thesis, Univerzitet u Beogradu,

[6] Jovičić, R. Analiza uticaja prslina na integritet feritno – austenitnih zavarenih spojeva, Ph.D. thesis, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija, 2007.

This inhomogeneity leads to differences in the strength and plasticity characteristics of individual parts of the joint, which further leads to their different behaviour under the same load. Predicting the behaviour of individual parts of heterogeneous joints during loading is therefore much more complex than predicting the behaviour of joints between similar steels.

To ensure reliability in the exploitation of welded joints between low-carbon and high-alloy austenitic steels, the assessment of the probability of occurrence of defects in the weld metal based on the Schaeffler diagram is not sufficient. In order to ensure the reliability of these joints in operation, an assessment based on experimental tests of the welded joints as a whole is also required.

[7] Granjon, (1998), H. Bases Metallurgiques du Soudage, Soudure Autogene, Paris

[8] Folkhard, E. Pertender, E. Schabereiter, H. Toesch, (1984), J. Metallurgie der Schweissung nichtrostender Staehle", Springer Verlag, Wien

[9] Jakšić, (1969), S. O zavarivanju raznorodnih čelika, Zavarivanje 1, Zagreb, , 2-12.

[10] Mateša, B., Samardžić, I. Dunder, M. (2011), Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaefflerovog dijagrama, Proceedings, 6th međunarodno savetovanje S. Brod, 26.-28. listopada 233-243



David Novak ^{1,a}, Tomaž Vuherer¹

WEAR RESISTANCE OF MAG CLADDED 27MnCrB5-2 BASE MATERIAL WITH THE SG3 SOLID WIRE

OTPORNOST NA HABANJE MAG OBLOŽENOG 27MnCrB5-2 OSNOVNOG MATERIJALA SA SG3 ČVRSTOM ŽICOM

Professional paper / Stručni rad

Paper received / Rad primljen:

August 2024.

Paper accepted / Rad prihvaćen:

March 2025.

Author's address / Adresa autora:

¹ University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering Maribor, Smetanova ulica 17, Maribor, Slovenia

Email / ORCID ID:

^a david.novak4@student.um.si

Keywords: cladding, abrasive wear, wear test, wear resistance, hardness

Ključne reči: oblaganje, abrazivno habanje, ispitivanje na habanje, otpornost na habanje, tvrdoća

Abstract

Cladding is one of the most commonly used technologies for extending the lifespan of wear-exposed products and surface hardening. This work presents cladding using the MAG process, where, during the experimental part of the research, the filler material BÖHLER SG 3 in the form of wire was clad onto the base material (27MnCrB5-2). We applied one, two, and three layers of cladding. It is known that cladding creates a dilution zone between the base and filler material, which is most visible in single-layer cladding. Our primary interest of research was how the number of cladding layers affects the hardness and wear resistance of the top layer of the cladding. The cladding was performed using a robot in a robotic cell, where we produced nine samples. We then conducted a wear test to ASTM G65 standard on a custom-made SLO-ASTM G65 testing machine. The samples were later halved, and the specimens were prepared for laboratory work, where we examined them and measured hardness and the dilution zone. None of the measurements showed significant differences in wear resistance and hardness. A slight deviation was observed only in the sample with three layers, which proved slightly more resistant than the samples with one and two layers.

Rezime

Oblaganje je jedna od najčešće korišćenih tehnologija za produženje životnog veka proizvoda izloženih habanju i površinskom očvršćavanju. U ovom radu je prikazano oblaganje postupkom MAG, pri čemu je u eksperimentalnom delu istraživanja na osnovni materijal (27MnCrB5-2) nanet materijal za punjenje BOHLER SG 3 u vidu žice. Naneli smo jedan, dva i tri sloja obloge. Poznato je da oblaganje stvara zonu razblaženja između podloge i materijala za punjenje, što je najvidljivije kod jednoslojnih obloga. Naš primarni interes istraživanja bio je kako broj slojeva obloge utiče na tvrdoću i otpornost na habanje gornjeg sloja obloge. Oblaganje je izvedeno pomoću robota u robotskoj ćeliji, gde je proizvedeno devet uzoraka. Zatim je sproveden test habanja prema standardu ASTM G65 na mašini za testiranje SLO-ASTM G65 po meri. Uzorci su kasnije prepolovljeni i pripremljeni za ispitivanja u laboratoriji, gde su pregledali i izmerene tvrdoću i zonu razblaženja. Nijedno od merenja nije pokazalo značajne razlike u otpornosti na habanje i tvrdoću. Neznatno odstupanje uočeno je samo kod uzorka sa tri sloja, koji se pokazao nešto otpornijim od uzoraka sa jednim i dva sloja

The paper was published in its original form in the Proceedings of the 33rd Conference with international participation "Welding 2024" held in Vrnjačka Banja, Serbia from October 2 to 5, 2024.



1. Introduction

Wear and corrosion are among the major challenges faced by the mining and steel industries [1], and these issues are also common in agricultural machinery [2] and the military industry [3]. Cladding, a process in which a new layer of material is applied to an existing base material that is typically of lower quality, is a widely used solution to mitigate these problems [4]. Various cladding methods are available, and the choice of method depends on several factors, including production costs, process flexibility, the amount of heat input, and overall economic efficiency [5]. The primary objective of cladding is to extend the lifespan of products, as applying a cladding layer not only increases the strength and hardness of the material but also enhances its resistance to wear and impact [5].

However, it is important to note that an increase in the hardness of the cladding does not necessarily lead to improved wear resistance. This phenomenon is largely influenced by the chemical composition of the alloy and its resulting microstructure [6]. The materials used for cladding are typically alloyed with elements such as iron, nickel, and cobalt, and the selection of these materials is based on the characteristics of the base material and the specific type of wear they are intended to withstand [7]. There are several well-known cladding methods, including MAG cladding with flux-cored wire (FCAW) [8], MIG/MAG with solid wire (GMAW) [9], submerged arc welding (SAW), and TIG cladding (GTAW) [9]. The focus of this work is on the GMAW method, where the arc is established between the wire fed through the nozzle and the base material, all within a gas shield that prevents air from infiltrating the arc. In this process, it is crucial to select the appropriate parameters that will maximize both the process's efficiency and the cladding's quality. This is particularly important because the thermal conditions play a significant role in determining the quality, as faster solidification and crystallization can lead to higher-quality cladding [10].

The company uses different filler materials for cladding. The cladding material is selected based

on the exposure of the machine part to wear, as well as the customer's needs and requirements. Materials with high hardness are more prone to flaking, while materials with lower hardness tend to be tougher. Since softer materials are also less complex to weld and repair, we explored the possibility of cladding with such material. In this study, we analyzed BÖHLER SG 3 material with different numbers of cladding layers, aiming to demonstrate the differences between samples with one, two, and three layers. Using a robotic cell, we prepared the samples and subsequently performed wear tests, hardness measurements, and an analysis of weld metal and base material dilution. The overarching goal for manufacturers of clad parts is to ensure the longest possible service life for machine components under their specific operating conditions while also maintaining economic viability. Cladding is not only applied to new products but is also used in the repair of worn components, where both the economic justification and the quality of the repair are of even greater importance.

2. Experimental

2.1 Material

We examined the filler material BÖHLER SG 3, which we applied in different layers onto a test piece that is a forging made of 27MnCrB5-2 base material with dimensions of 115 x 89 mm and a thickness of 30 mm. Due to the varying number of layers applied, the test pieces were appropriately labelled. Test pieces with a single-layer weld are labelled B1, those with a two-layer weld are labelled B2, and those with a three-layer weld are labelled B3. We produced three identical test pieces for each option, resulting in a total of 9 test pieces. The mechanical and chemical properties of the filler and base materials are presented in Table 1 and Table 2. We do not have data on the mechanical properties of the base material in its forged form, but the mechanical properties of this material before forging are provided.

**Table 1.** Chemical composition and mechanical properties of the filler material BÖHLER SG 3**Tabela 2.** Hemijski sastav i mehaničke karakteristike dodatnog materijala BÖHLER SG 3

Filler material			BÖHLER SG 3
Chemical composition (wt. %)			
C	Si	Mn	
0.5	1.3	1.3	
Mechanical properties			
R_e (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	ISO-V KV (J)
485	602	26	50 (-40 °C)

Table 3. Chemical composition and mechanical properties of 27MnCrB5-2 (BM)**Tabela 2.** Hemijski sastav i mehaničke karakteristike BÖHLER SG 3 (OM)

Base material				27MnCrB5-2			
Chemical composition of (wt. %)							
C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S	Ni
0,29	1.240	0.160	0.340	1.300	0.015	0.003	0.120
Cu	V	Al	Ti	N	Nb	Sn	B
0,22	0.003	0.028	0.038	0.007	0.001	0.011	0.022
Mechanical properties							
R_e (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	ISO-V KV (J)				
695	922	15	65				

2.2 Welding

Before starting the experimental work, we decided first to conduct a wear test, after which we would cut the test pieces in half using a water jet and create cross-sections for microstructure imaging and hardness measurements in the cross-

section. We were primarily constrained by the shape and dimensions of the test pieces due to the clamping fixture integrated into the testing device. Fortunately, we found a suitable forging, which is also a machine part typically clad in the production of mixing, crushing, and shredding equipment. While welding the test pieces, we used the parameters shown in Table 3.

Table 4. Welding parameters**Tabela 5.** Parametri zavarivanja

Layer	Process	Diameter of FM (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Type / polarity	Wire speed (m/min)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
1	135	1,2	222	25.2	DC+	8.8	9	37.3
2	135	1,2	201	25.5	DC+	8.4	10	30.7
3	135	1,2	200	25.6	DC+	8.3	10	30.7

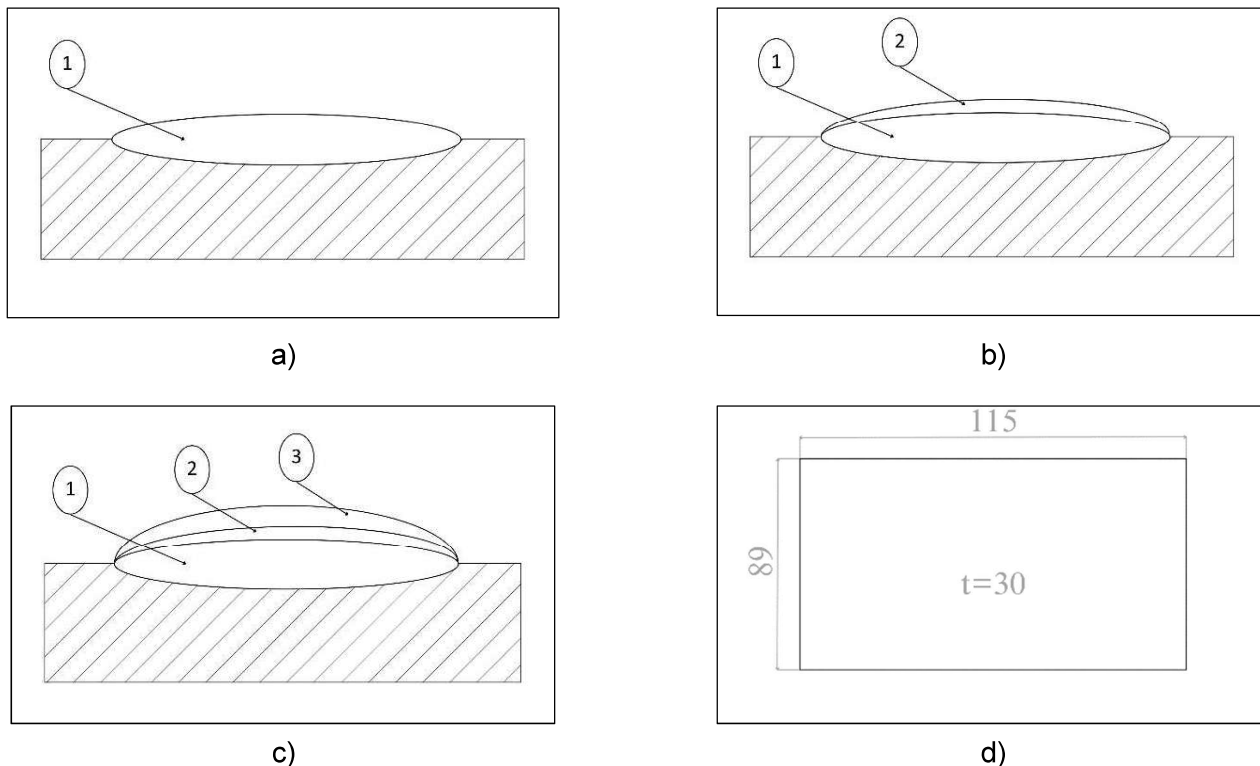


Figure 1. Sample with: a) one layer b) two layers c) three layers and d) dimensions of test sample

Slika 1. Uzorak sa: a) jednim slojem b) dva sloja c) tri sloja i d) dimezije ispitnog uzorka

The MAG cladding process was carried out using a CLOOS welding robot equipped with a CLOOS QINEO PULSE 600 welding power source. We chose automated cladding for the test pieces to ensure the homogeneity of the cladding shape, the consistency of the torch movements during the welding process. This way, we closely replicate the actual production technology used for such parts. The forging was clamped in a specialized fixture typically used for this purpose. A sketch of the

cladded part and the sequence of the cladding layers is shown in Figure 1. Using the robot's control unit, shown in Figure 2, we determined the path and position of the welding torch and the welding parameters commonly used for cladding forgings. The cladding was performed without preheating, and we monitored the temperature between the cladding layers. We used a mixture of argon and carbon dioxide for shielding gas, specifically M21 with 18% CO₂.

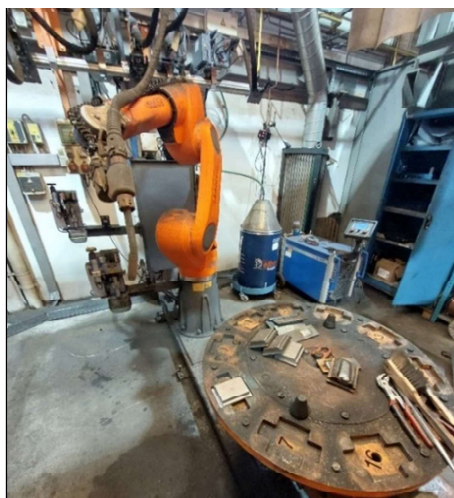


Figure 2. CLOOS welding robot

Slika 2. CLOOS robot za zavarivanje



2.3 Preparation of cross-sections

Before laboratory work, it was necessary to prepare the test pieces to ensure they were suitable for hardness measurements and cross-sectional imaging. The test pieces were cut using a water jet cutting method with an abrasive additive. The cross-sections required further processing through milling and grinding to achieve a flat and smooth surface. After polishing, the cross-sections were etched with an etchant (1% Nital) to distinguish the filler material from the base material in the cross-section and to identify the heat-affected zone.

2.4 Hardness measurements

Hardness was measured across the cross-section of the sample, starting from the weld's top downward, as we were interested in observing the change in hardness relative to the depth and number of layers. The hardness measurements were carried out using the Vickers hardness testing method by mass of load of 10 kg (HV10) for 15 sec. We also captured images of each cross-section and later used AutoCAD software to measure the areas. This allowed us to calculate the dilution area of the base and filler materials.

2.5 Wear testing - procedure description

The test area of the testing machine is shown in figure 3. The device consists of a housing, an electric motor, a control unit for parameter regulation, a clamping fixture, a feeding mechanism, and a reservoir for the abrasive medium. We used aluminium oxide (Al_2O_3) sand with a grain size between 300 and 425 μm , sold under the trade name WSK 46 by IMERYS.

We decided to test the samples up to 3000-wheel revolutions, measuring the mass of the test piece after every 1000 revolutions, representing one cycle. The sand flow rate was set to approximately 350 g/min. During the test, we randomly checked the flow rate multiple times and paid close attention to the moisture content of the abrasive. Special care was needed when positioning and clamping the sample between cycles to ensure it was clamped in the same position, allowing for consistent material removal, as shown in Figure 3.

Weighing at the end of each cycle was performed using a calibrated scale with a resolution of 0.01 g. Before weighing, the test piece was cleaned with compressed air to remove any sand and other contaminants that could lead to inaccurate mass measurements.



Figure 3. Position of the sample during abrasion test a), and weighing of the worn test sample b)
Slika 3. Položaj uzorka tokom testa na habanje a), i merenje istrošenog uzorka za ispitivanje b)

3. Results and discussion

3.1 Results of macro-section examination

Results of macro-section examinations are presented in Figure 4

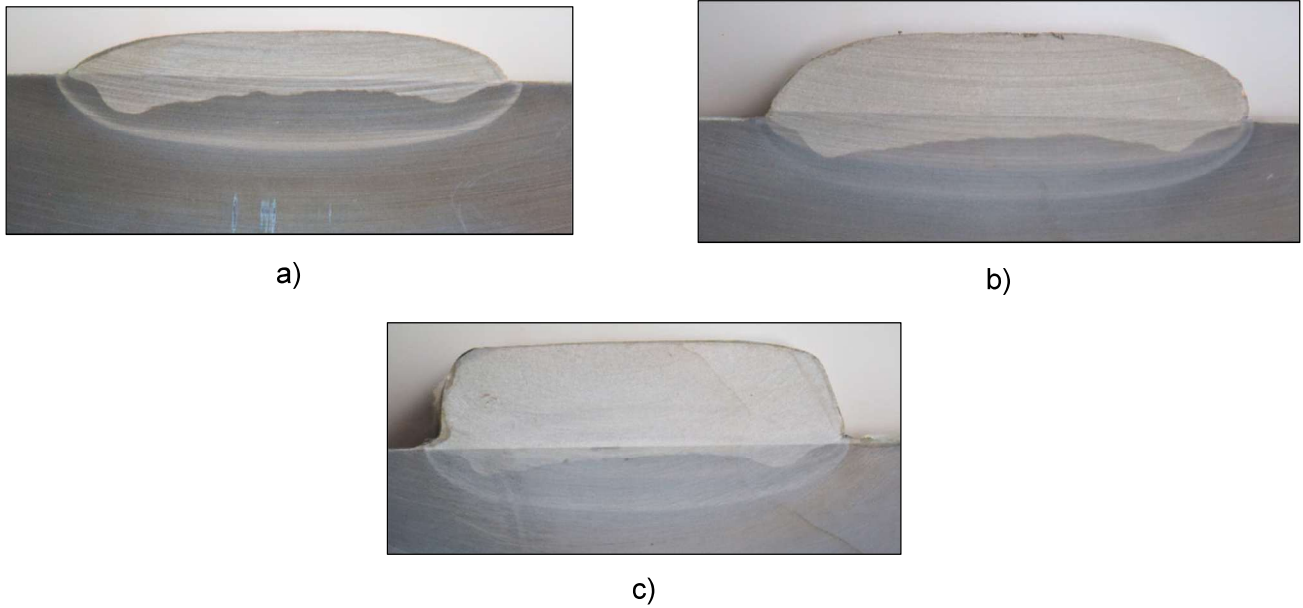
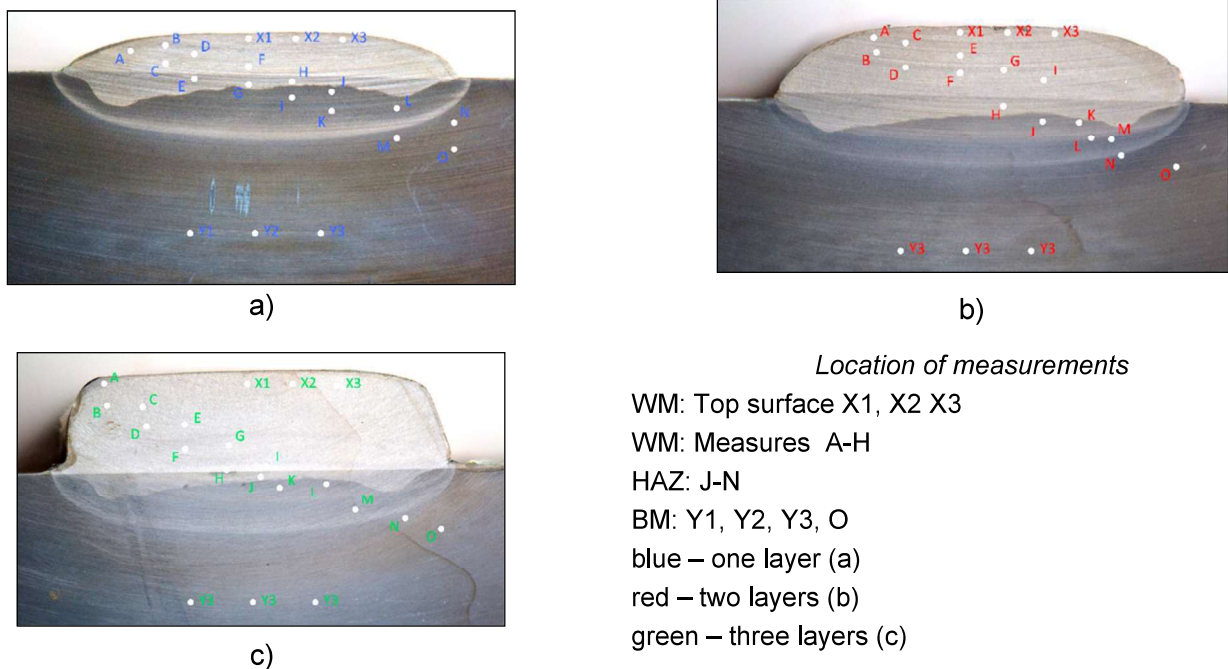


Figure 4. Macro-section; a) one layer, b) two layers, c) three layers

Slika 4. Makro-presek; a) jedan sloj, b) dva sloja, c) tri sloja

3.2 Results of hardness measurements

The cross-sectional images of the samples are shown in Figure 5, with the HV10 hardness measurement locations indicated.



Location of measurements

- WM: Top surface X1, X2, X3
- WM: Measures A-H
- HAZ: J-N
- BM: Y1, Y2, Y3, O
- blue – one layer (a)
- red – two layers (b)
- green – three layers (c)

Figure 5. Cross-section of: a) one layer, b) two layer and c) three-layer sample

Slika 5. Poprečni presek; a) jedan sloj, b) dva sloja c) tri sloja

The results of the hardness measurements are shown in the Table 4 below.



Table 4. HV10 hardness measurements

Tabela 4. Ispitivanje tvrdoće po Vikersu

Measurement point	Hardness HV10			Measurement point	Hardness HV10		
	B1	B2	B3		B1	B2	B3
A	268	268	257	L	372	268	263
B	293	293	252	M	312	249	275
C	273	273	247	N	341	309	297
D	209	209	244	O	464	294	329
E	198	198	242	X1 (surface layer WM)	202	203	234
F	211	199	231	X2 (surface layer WM)	235	204	240
G	355	210	236	X3 (surface layer WM)	242	204	223
H	354	220	257	Y1 (BM)	490	488	423
I	382	237	247	Y2 (BM)	514	466	475
J	365	290	272	Y3 (BM)	515	463	476
K	340	314	290	B1 – one layer, B2 – 2 layers, B3 –3 layers			
Dilution (%)	31%	21%,	15%				

3.2 Results of wear tests

The following graphs (Figure 6 to Figure 8) show the wear curves of the individual layers. The wear of sample B1 is shown in Figure 6, the wear of

sample B2 is shown in Figure 7, and the wear of sample B3 is shown in Figure 8. The differences in mass were converted into volume changes, so the results are presented in volumetric units (mm³) relative to the number of spins.

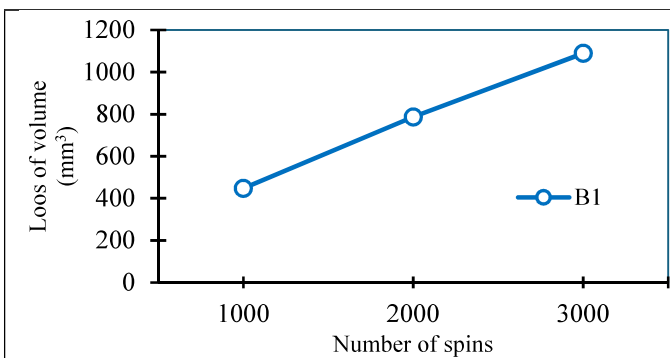


Figure 6. Wear of sample B1

Slika 6. Habanje uzorka B1

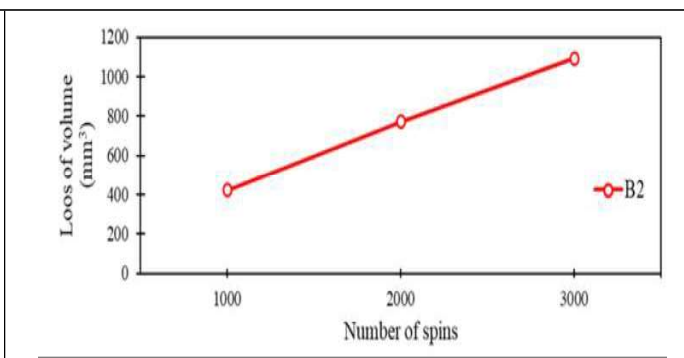


Figure 7. Wear of sample B2

Slika 7. Habanje uzorka B2

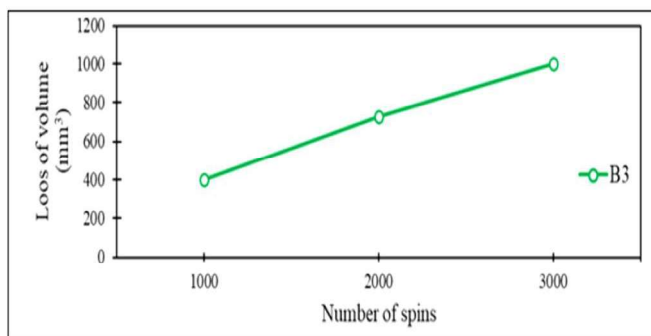


Figure 8. Wear of sample B3

Slika 8. Habanje uzorka B3

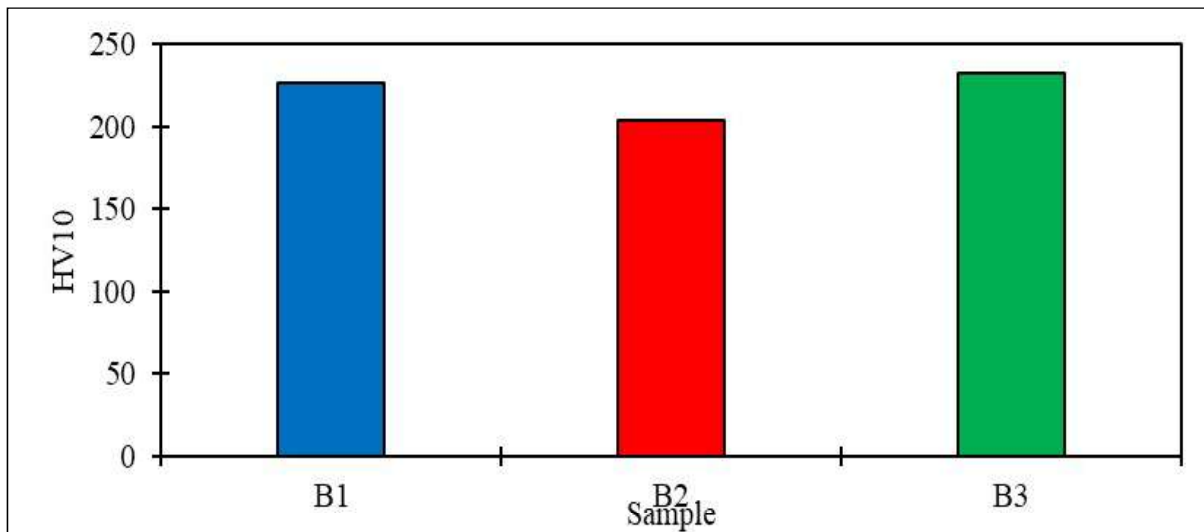


Figure 9. Averaged hardness measurements on the top surface layer

Slika 9. Prosečne vrednosti rezultata prilikom merenja tvrdoće na gornjem površinskom sloju

Figure 10 shows the wear test results for samples with different numbers of cladding layers. The dependence of wear on the number of wheel revolutions during the test is presented for each

sample. As can be seen, the number of cladding layers does not significantly affect the volume loss. A slight deviation was observed only in the sample with three layers (B3), which proved to be the most resistant.

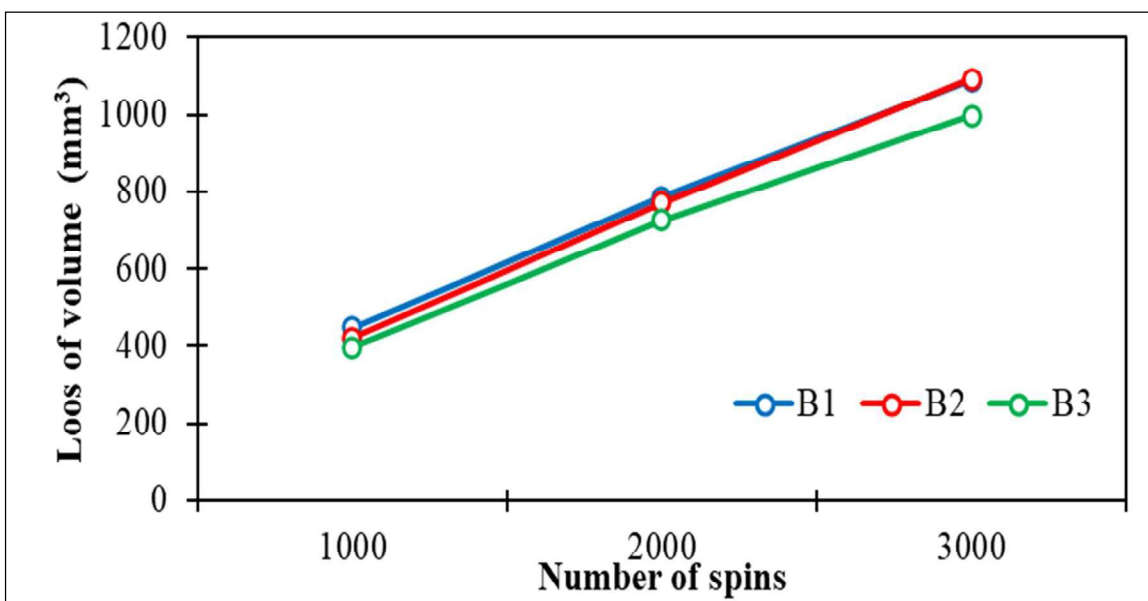


Figure 10. Wear resistance between samples B1, B2, B3

Slika 10. Otpornost na habanje između uzoraka B1, B2, B3

Additionally, we can confirm that there is no linear relationship between hardness and wear resistance in this material choice, as the differences in hardness are too small, and measurement uncertainty must be considered.



5. Conclusions

The research revealed important findings regarding single-pass and multi-pass cladding. The results will serve the company as a guide in selecting filler materials for cladding, ensuring that the process delivers the highest quality products. It was found that, for this material combination, hardness does not significantly change with different numbers of layers. Additionally, we could not confirm a linear relationship between hardness and wear resistance for this material combination. However, to deepen this hypothesis, it would be worthwhile to conduct further research with other material combinations that might result in significantly greater differences in surface hardness, which is a plan for future investigations.

Acknowledgement

We thank the company Farmtech d.o.o. from Slovenia for enabling us to produce the test samples, enabling the wear tests and financing the investigation.

References / Literatura

[1] Kishore K., Sarkar K. & Arora, K.S., (2023), Effect of alloying elements on microstructure, wear, and corrosion behavior of Fe-based hardfacing. *Weld World* 67, 2463–2475.

[2] Vytenis J., Antonov M., Varnauskas V., Skirkus R., Goljandin, D., (2015), Effect of WC grain size and content on low stress abrasive wear of manual arc welded hardfacings with low-carbon or stainless steel matrix. *Wear* 328-329, 378–390.

[3] Sözeri M., Özdemir U., Findick T., Karakoç H., (2024), Comparative study of hardfacing applications on structural steel surfaces to improve ballistic properties. *Materials Today Communications* 38, 2-17.

[4] Balaguru S., Gupta M., (2021), Hardfacing studies of Ni alloys: a critical review, *Journal of Materials Research and Technology* 10, 1210-1242.

[5] Srikarun B., Oo, H.Z., Muangjunburee P., (2021), Influence of Different Welding Processes on Microstructure, Hardness and Wear Behavior of Martensitic Hardfaced Cladding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 8984–8995.

5. Zaključci

Istraživanje je otkrilo važne nalaze u vezi sa jednoprolaznim i višeprolaznim oblaganjem. Rezultati će poslužiti kompaniji kao vodič u odabiru materijala za punjenje za oblaganje, osiguravajući da proces daje proizvode najvišeg kvaliteta. Utvrđeno je da se za ovu kombinaciju materijala tvrdoća ne menja značajno sa različitim brojem slojeva. Pored toga, nije potvrđena linearna veza između tvrdoće i otpornosti na habanje za ovaj odabir materijala. Međutim, da bi se ova hipoteza produbila, bilo bi potrebno sprovesti dalja istraživanja sa drugim kombinacijama materijala koje bi mogle rezultovati znatno većim razlikama u površinskoj tvrdoći, što je plan za buduća istraživanja.

Zahvalnica

Zahvaljujemo se kompaniji Farmtech d.o.o. iz Slovenije što nam je omogućila izradu testnih uzoraka, sprovođenje ispitivanja habanja i finansiranje istraživanja.

[6] Kaushal K., Kuntal S., Kanwer A, (2023), Effect of alloying elements on microstructure, wear, and corrosion behavior of Fe-based hardfacing. *Welding in the World*, 67, 2463-2475.

[7] Chen J., Xie W., Liu R., Wei Y., (2021), Microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing layer prepared by flux-cored wire feeding MAG welding process. *Welding in the World* 66, 175-185.

[8] Oo H.Z., Muangjunburee P., (2024), Hardfacing of thermite welded rail by flux-cored arc welding, *Wear* 546-547, 1-14.

[9] Tabaie S., Greene T., Benoit M., (2023), Optimization of GMAW process parameters for weld overlay of Inconel 686 superalloy on low-carbon steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 127, 4769-4788

[10] Sachajdak A., Słoma J., Szczygieł I., (2018), Thermal model of the Gas Metal Arc Welding hardfacing process. *Applied Thermal Engineering* 14, 378-385.



Miloš Jovanović ^{1,a}

KVALIFIKACIJA I SERTIFIKACIJA IBR OSOBLJA PREMA NOVOJ VERZIJI STANDARDA EN ISO 9712

QUALIFICATION AND CERTIFICATION OF NDT PERSONNEL ACCORDING TO NEW EDITION OF THE STANDARD EN ISO 9712

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received :

Septembar 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted :

Februar 2025.

Ključne reči: praktično iskustvo, sudija, pisano uputstvo, produženje sertifikata

Adresa autora / Author's address:

¹ Institut za varilstvo, Ptujška ulica 19, Ljubljana, Slovenija

Email / ORCID ID:

^a milos.jovanovic@i-var.si / 0000-0002-0554-7908

Keywords: practical experience, referee, written instruction, certificate renewal

Rezime

Novo izdanje standarda EN ISO 9712 donosi promene u proširenju odgovornosti sertifikacionog tela, u povećanju zahteva za dokazivanje praktičnih iskustava kandidata od strane poslodavca i uvodi se pojam sudije za samozaposlena lica. Na području ispita se povećava broj ispitnih pitanja kod teorijskog dela, a kod praktičnog dela se priprema pisanog uputstva odvaja od ocene ispitnih uzoraka i ocenjuje kao poseban deo. Glavne promene odnose se na postupak produženja sertifikata nakon 5 godina, gde je prva opcija kreditni sistem za dokazivanje neprekidne aktivnosti kontrolora, a druga opcija je praktični ispit.

Abstract

The new edition of EN ISO 9712 standard introduces changes that expand the responsibilities of the certification body, increases the requirements for employers to provide proof of candidates' practical experience, and introduce the concept of referee for self-employed persons. In the examinations area, the number of questions in the theoretical part is increased, while in the practical part, the preparation of the written instruction is separated from the examination of the test samples and is evaluated as a separate section. The main changes relate to the procedure for certificate renewal after 5 years, where the first option is a credit system demonstrates the controllers' continuous activity, and the second option is a practical examination.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine.



1. Uvod

Sistem sertifikacije NDT osoblja na međunarodnom nivou izvodi se najčešće u skladu sa standardom ISO 9712. Taj standard je prihvaćen i u Evropskoj uniji kao EN ISO 9712.

Sertifikaciju NDT osoblja u državama EU kao i pridruženim članicama Evropske akreditacije (EA) izvode nezavisna sertifikaciona tela (ST) nakon što ih odobre nacionalne akreditacione kuće. Nakon autorizacije sertifikacionog tela nacionalna akreditacija svake godine vrši kontrolne audite da bi nadzirala njegov rad, koji treba da je usklađen sa standardima i odobrenim obimom akreditacije. Godišnji nadzori se vrše u skladu sa krovnim standardom EN ISO/IEC 17024, standardom EN ISO 9712 kao i sertifikacionom šemom po kojoj svako sertifikaciono telo izvodi svoje aktivnosti.

Standardi se ažuriraju svakih nekoliko godina zbog promena u tehnologiji i povratnih informacija sa terena. Standard EN ISO 9712 je do sada imao 4 izdanja, a zadnji verzija je izdata 2022. godine. Zato su sertifikaciona tela dužna da prate sve promene u ovim standardima i svoj rad prilagode novim zahtevima.

2. Važnije promene

U novom izdanju standarda ima mnogo izmena i teško ih je nabrojati na nekoliko stranica. Negde su stari zahtevi delimično ili potpuno brisani, a negde su uspostavljeni potpuno novi. U ovom radu ćemo se fokusirati se samo na one promene koje u praksi imaju najveći uticaj na postupke sertifikacije NDT osoblja. Ići ćemo po tačkama novog izdanja standarda tako da je moguće adekvatno ispratiti navedene promene.

2.1 Tačka 5: Odgovornost

Tačka 5.2.2 (Odgovornost- Sertifikaciono telo) - Pored zahteva iz prethodnog izdanja standarda za ST su dodati i sledeći zahtevi:

- mora uspostaviti proceduru za ovlašćenje ispitivača/ocenjivača za ispite,
- mora uspostaviti uslove za praćenje radnih aktivnosti, prema kojima kandidati mogu iskazivati radno iskustvo prema tački 7.3.
- mora uspostaviti proces za priznavanje visokog obrazovanja,
- mora uspostaviti proces za odobravanje pojedinaca za poziciju sudije (engl. referee),
- mora uspostaviti proces za odobravanje strukturiranog kreditnog sistem, gde se koristi,

- može postaviti uslove za minimalnu starost kandidata prema tački 7.1,

- mora uspostaviti proces za odobrenje Programa strukturiranog iskustva-SEP (engl. structural experience program) gde se koristi.

Tačka 5.4 (Odgovornost-Ispitni centar):

U alineji d) podtačke 5.4.1. postoji novi zahtev da je korišćenje vanjskih prostora dozvoljeno. To znači da ST može vršiti ispite i u prostorijama poslodavca koji je naručio sertifikaciju.

Tačka 5.5 (Odgovornosti-Poslodavac):

Podtačka 5.5.1 se menja i glasi: „ Poslodavac mora dokumentovati sve lične podatke, uključujući dokaz o obrazovanju, obuci i industrijskom iskustvu i oštirini vida, koji su neophodni za utvrđivanje podobnosti kandidata. Ako je kandidat samozaposlen, radno iskustvo potvrđuje sudija/referee.”

U alineji e) nove podtačke 5.5.2 (podtačka 5.5.3 iz starog izdanja) postoji dodatni zahtev da je poslodavac obavezan da za svakih dvanaest (12) meseci vodi dokumentovane dokaze o sertifikovanom NDT osoblju, čime se potvrđuje kontinuirana upotreba NDT metode u relevantnom sektoru bez značajnih prekida.

Nova podtačka 5.5.3 glasi: "Samozaposleni mora preuzeti sve obaveze propisane poslodavcu."

Nova podtačka 5.5.4 glasi: "Sertifikat prema ovom standardu (dokumentu) daje potvrdu o opštim sposobnostima sertifikovanog NDT osoblja. To ne predstavlja ovlašćenje za rad, jer to ostaje odgovornost poslodavca."

Tačka 5.6 (Odgovornosti-Kandidat). Sledeće dve alineje su promenjene:

c) kandidat mora dostaviti dokumentovani dokaz da je traženo iskustvo stečeno pod nadzorom;

e) kandidat mora obezbediti i druge dokaze koje se traže od sertifikacionog tela.

Tačka 5.7 (Odgovornosti- Nosioc sertifikata). Sledeća alineja se menja:

b) Nosioc sertifikata moraju voditi evidenciju koja dokazuje da su zahtevi za vid ispunjeni u skladu sa tačkom 7.4.



Tačka 5.8 (Odgovornosti - ispitivači/ocjenjivači). Ova tačka je potpuno nova i glasi:

Podtačka 5.8.1 Ispitivači/ocjenjivači bi trebali biti:

- ovlašteni od strane certifikacionog tela za sprovođenje, kontrolu i ocenjivanje ispita;
- sertifikovani na nivou 3 u NDT metodi, u proizvodnom i/ili industrijskom sektoru za koji su ovlašteni.

Podtačka 5.8.2 Ispitivaču/ocjenjivaču ne sme biti dozvoljeno da ispituje/ocjenjuje nijednog kandidata:

- kog su osposobili za ispit u roku od dve (2) godine od dana završetka obuke,
- koji radi (stalno ili privremeno) u istoj ustanovi kao i ispitivač/ocjenjivači, osim ako je certifikaciono telo uspostavilo procedure upravljanja sa dokumentovanim poverljivošću i nepristrasnošću za takve slučajeve.

Tačka 5.9 (Odgovornosti-Sudija (eng. referee)). Ova tačka je potpuno nova i glasi:

Sudija mora biti sertifikovan na nivou 2 ili 3 za bilo koju metodu NDT ili može biti nesertifikovana osoba odobrena od strane certifikacionog tela koja posjeduje znanje, veštine, obučenosť i iskustvo za validaciju industrijskog iskustva kandidata.

2.2 Tačka 7: Podobnost (Ulazni uslovi)

Tačka 7.1 (Podobnost): *Dodat je zahtev da certifikaciono telo može definisati minimalnu starost kandidata pred prvom sertifikacijom.*

Podtačka 7.2.1 - Tabela 2 u standardu (u našem tekstu je to tabela 1) za minimalne uslove za obuku je promenjena i trajanje obuke se sada meri u danima, i ne više u satima, kao što je bio slučaj do sada.

Podtačka 7.2.2 Tekst se menja na sledeći način:

» Za sve nivoe, teorijska obuka se može izvoditi licem u lice sa instruktorom, u vidu učenja na daljinu, u obliku samostalnog tempa ili u kombinaciji navedenih načina. Praktična obuka treba da se održava samo u vidu licem u lice sa instruktorom. Početna obuka za sertifikaciju važi najviše 10 (deset) godina od datuma završetka. Ako se koristi opcija učenja na daljinu, sistem mora biti postavljen tako da se osigura završetak celokupnog nastavnog plana i programa.

Podtačka 7.2.4 U ovoj tački potrebni " sati " su sada zamenjeni potrebnim " danima ".

Tabela 1. Zahtevi za minimalno trajanje obuke

Table 1. Minimum training requirements

NDT metoda	AT	ET	LT	MT	PT	RT**	ST	TT	UT	VT
Nivo 1 dani*	5	5	5	3	3	5	2	5	8	3
Nivo 2 dani*	8	6	9	2	2	10	3	6	10	2
Nivo 3 dani*	5	6	6	4	3	5	2	5	5	3
* Jedan dan sadrži najmanje 7 sati koji se mogu postići tokom istog dana ili sabiranjem sati u više dana										
** Za RT metodu broj dana ne obuhvata obuku za Zaštitu pred zračenjem										
NAPOMENA 1: Za specifične tehnike pogledati Dodatak E										

Podtačka 7.3.1 (Podobnost, Industrijsko NDT iskustvo, Uopšteno).

U slučaju da se deo industrijskog NDT iskustva stiče nakon uspešno položenog ispita, rezultati ispita ostaju važeći najviše pet (5) godina. Dokumentovani dokaz o iskustvu mora biti overen od strane poslodavca ili sudije i prosleđen certifikacionom telu.

Tabela 3 u standardu (u našem tekstu je to tabela 2) za minimalno industrijsko NDT iskustvo je potpuno promenjena i trajanje ovog iskustva se sada meri u danima, a ne više u mesecima.

**Tabela 2.** Zahtevi za minimalno industrijsko iskustvo**Table 2.** Minimum industrial experience requirements

NDT metoda	Iskustvo u danima*					
	Nivo 1	Nivo 2		Nivo 3		
		sa nivoa 1	direktn pristup	sa nivoa 2, uz visokoškolsko obrazovanje	sa nivoa 2	direktan pristup
AT, ET, LT, RT, TT, UT	45	135	180	270	450	540
MT, PT, VT, ST	15	45	60	180	240	360

* Jedan dan sadrži najmanje 7 sati koji se mogu postići tokom istog dana ili sabiranjem sati u više dana. Maksimalan broj sati u jednom danu je 12. Iskustvo u danima se dobija kada ukupan broja sati podelimo sa 7.

Podtačka 7.3.3.5 Do 50% vremena industrijskog NDT iskustva može se postići tzv. strukturnim programom iskustva-SEP. Jedan dan pohađanja SEP-a je ekvivalentan maksimalno pet (5) dana radnog iskustva u industriji. SEP mora uključiti sve tipične zadatke (vidi tačku 6) dotičnog nivoa, metode i sektora. Dodatna svrha je sticanje specifičnog znanja o proizvodima i tehnikama. SEP mora biti unapred odobren od sertifikacionog tela i mora biti dostupan za pregled od strane sertifikacionog tela.

Tačka 7.4 (Podobnost; Zahtevi za vid; svi nivoi). Ova tačka je u potpunosti revidirana i proširena. U novom izdanju su dati sledeći zahtevi :

Podtačka 7.4.1 Upošteno: Kandidati i nosioci sertifikata moraju održavati i obezbediti dokumentovane dokaze o prihvatljivom vidu u skladu sa tačkama 7.4.2 do 7.4.4.

Podtačka 7.4.2 Vid na blizinu: Pre sertifikacije i svake godine nakon toga, vid na blizinu mora biti testiran u skladu sa zahtevima ISO 18490 ili mora biti sposoban očitati najmanje Jaeger br. 1 ili Times New Roman br. 4,5 ili ekvivalentna slova, na udaljenosti od najmanje 30 cm sa jednim ili oba oka, ako je vid korigovan ili nekorigovan .

Podtačka 7.4.3 Prepoznavanje boja: Pre prve sertifikacije, ponovne sertifikacije ili obnove sertifikacije, kandidat/nosioc sertifikata mora dokazati da je test prepoznavanja boja obavljen u prethodnih pet (5) kalendarskih godina. Smatra se da je prepoznavanje boja i/ili sive lestvice dovoljno dobro ako je pojedinac u stanju da razlikuje boje ili nijanse sive koje se koriste u relevantnim NDT metodama/tehnika na osnovu zahteva poslodavca. Test prepoznavanja boja mora ili potvrditi da osoba ima prihvatljiv vid boja bez ograničenja, ili ukazati na bilo kakva ograničenja u prepoznavanju boja. Tamo gde postoje ograničenja u poprepoznavanju boja mora poslodavac potvrditi

da li ti rezultati bilo kako utiču na upotrebu određene NDT metode ili tehnike.

Podtačka 7.4.4 Osoblje za izvođenje provere vida: Test za vid na blizinu, prepoznavanje boja i/ili test raspoznavanja sive lestvice moraju vršiti licencirani lekari, medicinske sestre, oftalmolozi, optometristi ili drugi kvalifikovani stručnjaci koji su odobreni i dokumentirani od strane osoblja nivoa 3 koje deluje u ime poslodavaca.

2.3 Tačka 8: Ispiti

Podtačka 8.1.1. Proces ispitivanja mora biti osmišljen tako da se osigura uporedivost rezultata ispitivanja korištenjem metoda kao što su međusobno poređenje grupe, doprinosi stručnjaka u njihovim oblastima, statistička poređenja, a gde veličina ispitne grupe to dozvoljava, mogu se koristiti psihometrijski principi kako je navedeno u Aneksu G.

Rezultati ispita moraju ostati važeći do pet (5) godina dok kandidat ne ispuni sve ostale uslove za sertifikaciju.

Podtačka 8.1.2. Za nivo 2, ispiti se moraju sastojati od sljedećih elemenata:

- element opšteg ispita
- element specifičnog ispita
- element praktičnog ispita
- element pisanja NDT uputstva.

Podtačka 8.1.3. Za nivo 1 i nivo 2, ukupno vreme za ispitne elemente zasniva se na dve (2) minuta za svako ispitno pitanje sa višestrukim odgovorima za element opšteg ispita i tri (3) minuta za svako ispitno pitanje sa višestrukim odgovorima za element specičnog ispita.

Podtačka 8.2.1. Element opšteg ispita treba da sadrži najmanje 40 pitanja sa višestrukim odgovorima.



Podtačka 8.2.4. *Element ispita pisanja NDT uputstva mora uključivati kreiranje pismenih NDT uputstava od strane kandidata za nivo 2.*

Ocenjivanje elementa praktičnog ispita mora biti zasnovano na predmetima 1 do 3 u tabeli 4, sa preporučenim faktorima težine u vezi sa nivoom i metodom koja se koristi.

Tabela 4 u novom izdanju standarda EN ISO 9712:2022 (u ovom tekstu je to tabela 3) ima promenjene težinske faktore (procenete) za nivo 2, odnosno za predmet 2 povećan je sa 20% na 26%, a za predmet 3 je povećan sa 55% na 64%. Predmet 4 (priprema pismenih NDT uputstava za nivo 1), koji je u prethodnom izdanju iznosio 15%, sada se briše u novom izdanju i ocenjuje se posebno.

Tabela 3. Područja i težinski faktori za ocenjivanje. Element praktičnog ispita.

Table 3. Subjects and weighting factors for grading— Practical examination element

R. broj	Područje	Težinski faktori	
		Nivo 1 %	Nivo 2 %
1	Poznavanje NDT opreme i sredstava	20	10
2	Primena NDT metode	35	26
3	Otkrivanje indikacija ili nepravilnosti i izveštavanje	45	64
Ukupno		100	100
U tabeli D.1 su dodatni detalji za svako navedeno područje koje ispitno osoblje treba da uvažava.			

Tačka 8.5 (Ispiti-Ponovno polaganje ispita). Sledeće dve tačke se menjaju:

Podtačka 8.5.2 *Kandidat koji ne položi jedan ili više elemenata ispita (tj. opšti, specifični, praktični itd.) može ponovo polagati nepoloženi ispit najviše dva puta:*

- Nakon minimalnog perioda od jednog (1) meseca (koji se može smanjiti ako je bila izvedena dodatna obuka prihvatljiva za sertifikaciono telo;*
- Najkasnije dve (2) godine nakon prvog izvođenja ispita.*

Tačka 8.6 (Ispiti - Dodatni ispiti). Sledeće dve tačke se menjaju:

Podtačka 8.6.1 *Lice sa sertifikatom nivoa 1 ili nivoa 2 koje menja sektore ili dodaje druge sektore za istu NDT metodu mora da polaže elemente specifičnog i praktičnog ispita za novi sektor. Za nivo 2 se zahteva pisanje NDT uputstva za novi sektor.*

Podtačka 8.6.2 *Pojedinac sa sertifikatom nivoa 3 koji menja sektore ili dodaje druge sektore za istu NDT metodu mora da vrši samo specifične predmete E i F iz elemenata ispita glavne metode.*

2.4 Tačka 9: Sertifikacija

Tačka 9.1 (Sertifikacija-Administracija). Druga stavka je dopunjena "digitalnim sertifikatima", a treća stavka je dodata na novo:

To se može postići izdavanjem sertifikata na tvrdoj kopiji, digitalnih sertifikata i/ili elektronskim učitavanjem i prikazivanjem relevantnih informacija u bazi podataka na internet stranici sertifikacionog tela. Sertifikaciono telo može izdati i tvrdu karticu (džepnu), koja uključuje mere za sprečavanje falsifikovanja.

Tačka 9.2 (Sertifikacija-Sertifikati).

" Sertifikati takođe moraju sadržavati jedinstvenu ličnu identifikaciju (npr. fotografiju ili referenciju na identifikaciju fotografije sa brojem .

2.5 Tačka 10: Obnavljanje/produženje

Tačka 10.1 (Obnavljanje):

„Pre isteka roka važenja nakon sertifikacije i recertifikacije, sertifikat mora biti obnovljen od strane sertifikacionog tela za novi period važenja na osnovu:

- dokumentovanih dokaza o zadovoljavajućem vidu na blizu, obavljenom u prethodnih 12 meseci, i*
- dokumentovani dokaz o zadovoljavajućem prepoznavanju boja i/ili raspoznavanja sive lestvice obavljen u prethodnih 60 meseci (5 godina), i*
- proverljivi dokumentovani dokaz o zadovoljavajućoj kontinuiranoj radnoj aktivnosti bez značajnih prekida u metodi i sektoru za koje se traži obnavljanje sertifikata;*



i jedno od sledeća dva:

d) uspešno polaganje elementa praktičnog ispita u skladu sa tačkom 11.2.2, s tim što će se sastojati od najmanje 50% uzoraka potrebnih prema tački 11.2.2; ili

e) zadovoljavajuće ispunjenje zahteva za strukturni kreditni sistem, kako je navedeno u tački 10.2 i Aneksu C.

Ako kriterijum c) za obnavljanje nije ispunjen, pojedinac mora uspešno položiti element praktičnog ispita kako se zahteva u tački 11.2.2.

Tačka 10.2 (Obnavljanje-strukturalni kreditni sistem). Ovo je potpuno nova tačka koja glasi:

Kada kandidat odluči da koristi strukturni kreditni sistem, mora sertifikacionom telu dostaviti dokaz da je sakupio minimalnih 100 bodova u petogodišnjem (5) periodu obnove, na osnovu zahteva iz tabele C.1

2.6 Tačka 11: Resertifikacija

Tačka 11.2 (Resertifikacija - nivo 1 i nivo 2). Prethodna tačka 11.2.2 sada je proširena na dve podtačke 11.2.2 i 11.2.3. Tačka 11.2.4 je nova. Celi izmenjeni tekst u novom izdanju standarda glasi:

Podtačka 11.2.1 Nosioci sertifikata nivoa 1 i 2, koji traže resertifikaciju moraju da prilože potvrdu koju izdaje poslodavac o kontinuiranoj zadovoljavajućoj radnoj delatnosti bez značajnijih prekida u metodi i sektoru za koji se traži resertifikacija i ispunjava tačku 11.2.

Podtačka 11.2.2 Pojedinac mora na zadovoljavajući način položiti element praktičnog ispita koji pokazuje kontinuiranu sposobnost za obavljanje poslova u okviru obima navedenog na sertifikatu. Ovo mora uključiti ispitivanje uzoraka (vidi Aneks B) odgovarajućih obimu resertifikacije, i dodatno za nivo 2, izradu pisanih NDT uputstava korisnih za upotrebu od strane osoblja nivo 1.

Podtačka 11.3.1 (Resertifikacija - Nivo 3 - Zahtevi). Prva stavka i alineje a) i b) menjaju se i glase:

Podtačka 11.3.1. Nosioci sertifikata nivoa 3 koji zahtevaju resertifikaciju, moraju da prilože potvrdu o kontinuiranoj zadovoljavajućoj radnoj aktivnosti koji je izdao poslodavac bez značajnijih prekida u metodi i sektoru za koji se traži resertifikacija i:

a) ispunjavaju uslove za nivo 3 iz tačke 11.3.3 za pismeni ispit, ili

b) ispunjavaju zahteve za strukturni kreditni sistem, kako je dato u tački 11.3.2 i tabeli C.1.

Podtačka 11.3.3. (Resertifikacija - nivo 3 - Pismeni ispit). Ova tačka je modifikovana tačka 11.3.2 iz prethodnog izdanja standarda i glasi:

Podtačka 11.3.3. Kada nosioc sertifikata nivoa 3 odabere pismeni ispit ili ne ispunjava uslove strukturnog kreditnog sistema mora uspešno položiti ispit koji uključuje:

a) najmanje 20 pitanja s višestrukim izborom o primeni metode ispitivanja u relevantnom(im) sektoru(ima) koja pokazuju razumevanje trenutnih NDT tehnika, standarda, kodova ili specifikacija, i

b) najmanje 10 pitanja sa višestrukim odgovorom o osnovnim zahtevima sertifikacione šeme po kojoj deluje sertifikaciono telo.

2.7 Aneks A (normativno): Sektori

Tačka A.2 (Sektori-Sektori proizvoda). Sektori proizvoda su sada podeljeni na:

- metalne materijale
- kompozitne materijale

Kompozitni materijali:

- f) cementni kompoziti (cc);*
- g) ojačane plastike kao što su polimeri ojačani vlaknima (frp);*
- h) metalni kompoziti (mmc);*
- i) keramički kompoziti (cmc).*

Za kompozitne materijale, sertifikaciono telo mora odrediti zahteve za ispite.

Tačka A.3 (Sektori-Industrijski sektori). Dodate su nove skraćenice za industrijske sektore, koje se moraju navesti na sertifikatu:

- a) proizvodnja (m);*
- b) ispitivanje pre i tokom eksploatacije, u proizvodni uključujući i proizvodnju(s);*
- c) održavanje železnice (r);*
- d) vazduhoplovstvo (a)*



2.8 Aneks B (normativno): Minimalni broj i vrste uzoraka za element praktičnog ispita za nivoe 1 i 2

a) Za sve elemente praktičnog ispita od kandidata se mora zahtevati da ispituju jedan ili više uzoraka specifičnih za sektor.

d) Za elemente praktičnog ispita koji se odnose na sektore proizvoda: od kandidata se mora zahtevati da ispita najmanje dva (2) uzorka za višestruke sektore proizvoda, najmanje jedan (1) za svaki sektor proizvoda.

2.9 Aneks C (normativni): Strukturni kreditni sistem za obnavljanje nivoa 1, 2, 3 i za resertifikaciju nivoa 3

Tačka C.1 (Strukturni kreditni sistem za obnavljanje nivoa 1, 2, 3 i za resertifikaciju nivoa 3). Tabela C.1 iz prethodnog izdanja je u potpunosti promenjena i proširena na nivo 1 i nivo 2.

2.10 Aneks F (informativno): Zahtevi za obuku za različite NDT tehnike

Aneks F. To je novi, informativni dodatak, koji sadrže sledeće tri tačke:

F.1 Uopšteno

F.2 Preporučeni dodatni dani obuke za nove NDT tehnike

Ovde spadaju tehnike za LT i MT metodu, kao i napredne tehnike kod UT metode (UT-TOFD i UT-PA)

F.3 Preporučeni ukupni dani obuke za tehnike radiografskih ispitivanja (RT).

Ovo se odnosi i na tehnike filmskog prikaza (RT-F), digitalnog prikaza (RT-D), kompjuterske tomografije (RT-CT), radioskopije (RT-S), kao i na različite tehnike ocenjivanja dbojenih prikaza, kao što su RT-FI (interpretacija filma), RT-DI (interpretacije digitalne slike) i RT-FDI (kombinacije prethodne dve tehnike). [1],[2]

3. Diskusija

3.1 Odgovornost

U ovoj tački su najviše raširene odgovornosti seertifikacionog tela, kao i odgovornost poslodavca. Uvodi se i odgovornost sudije, tj. osobe koja mora biti ovlašćena od strane ST da proverava i potvrđuje praktično iskustvo kandidata koji su samozaposleni, odnosno nemaju poslodavca.

3.2. Primerenost kandidata

Ovde je većina promena povezana sa ulaznim uslovima u vezi potrebnih industrijskih iskustava i

trajanja obuke pred sertifikacijom. U oba slučaja se umesto dosadašnjeg broja sati, odnosno meseci, uvedeni zahtevi izraženi u broju dana, gde jedan dan predstavlja minimalno 7 sati. Dozvoljava se da se teorijski obuke izvodi na daljinu. Otvara se i mogućnost uvođenja SEP programa kojim ST pomažu kandidatima u pridobijanju industrijskih iskustava pred postupkom sertifikacije.

U ovoj tački su takođe detaljnije opisani uslovi u vezi pregleda vida (prepoznavanje boja i sivinske skale).

3.3 Ispiti

Promene se odnose na opšti deo teorijskog elementa ispita, gde je minimalan broj pitanja povećan na 40. Kod praktičnog elementa ispita je pisanje radnog uputstva od strane osoblja nivoa 2 izdvojeno kao poseban deo ispita, i takođe se odvojeno ocenjuje. Do promena je došlo i u vezi sa brojem ispitnih uzoraka koje kandidat mora pregledati ako zahteva sertifikaciju više sektora proizvoda. Međutim ovo nije naj baš najjasnije definisano u novom izdanju standarda i biće potrebna dodatna uputstva za ST. Trenutna situacija u praksi je da svako ST na svoje načine definiše nove postavke standarda i onda dolazi do odstupanja u zahtevima za kandidate.

3.4 Obnova (produženje) sertifikacije

Ovo područje je pretrpelo najveće promene, a zahtevi za produženje sertifikacije su se prilično zaoštrili. Sada je potrebno da kandidat produženje izvede preko strukturisanog kreditnog sistema bodovanja gde se za svaku godinu rada sakupljaju dokazi o tekućim projektima u koje je kandidat bio uključen i na osnovu toga se dobijaju bodovi. Dokaze skuplja kandidat zajedno sa svojim poslodavcem, a na kraju ih dostavlja sertifikacionom telu. Time se dokazuje neprekidna aktivnost kandidata na području NDT tokom petogodišnjeg perioda važenja sertifikata. U slučaju da je kandidat sakupio dovoljan broj bodova, ST mu produži sertifikat za dodatnih 5 godina. Ako kandidat ne sakupi dovoljan broj bodova, potrebno je da pristupi praktičnom delu ispita sa smanjenim brojem ispitnih uzoraka za 50% u odnosu na broj pri prvoj sertifikaciji.

Pošto je kreditni sistem dosta kompleksan i zahteva dodatno administrativno delo kako za poslodavca i kandidata na jednoj, tako i za ST na drugoj, u praksi se obično izabira varijanta sa praktičnim ispitom. Neka ST zbog toga umesto postupka obnove sertifikacije uvode postupak resertifikacije na svakih 5 godina.



3.5. Ostale izmene

Neke od novosti su i da ST može postaviti donju granicu za prvu sertifikaciju kandidata, kao i da je na sertiikatu obavezna fotografija kandidata.

U normativnom aneksu A novog standarda je kod sektora proizvoda za kompozitne materijale detaljno definisano koje sve vrste proizvoda tu spadaju. Uvedene su i nove slovne oznake za industrijske sektore.

U normativnom aneksu B je na novo definisan broj uzoraka potrebnih na ispitu u zavisnosti od industrijskog sektora i sektora proizvoda.

U normativnom aneksu C su dati zahtevi za kreditni sistem obnove sertifikata za sve tri nivoa.

4. Zaključak

Nova verzija standard EN ISO 9712:2022 donosi dosta važnih promena. Pre svega se povećava broj obaveza sertifikacionog tela, poslodavca i kandidata. Zaoštavaju se uslovi za pristup sertifikaciji na području praktičnog industrijskog iskustva, povećavaju se zahetvi za ispitne zadatka kao i uslovi za odražavanje i obnavljanje pridobijene sertifikacije.

Područja sertifikacije se šire na nove materijale, kao što su kompoziti. A za nove tehnike kod pojedinih NDT metoda se daju precizna usmerenja u vezi sa trajanjem dodatne obuke.

Literatura / References

[1] EN ISO 9712:2022 Non-destructive testing - Qualification and certification of NDT personnel (ISO 9712:2021), CEN- European Committee for Standardization, March 2022.

[2] Tomc J., Jovanović M. (2022), Verifikacijsko poročilo o implementaciji standarda EN ISO 9712:202, Institut za varilstvo, Ljubljana

U normativnom aneksu D su dati detaljni zahtevi za nivo težnosti praktičnih ispita, gde je ocenjivanje izrade radnog uputstava odvojeno od ocenjivanja pregleda praktičnih uzoraka.

U novom informativnom aneksu F su dati zahtevi za dodatne dane obuke kada je reč o novim tehnikama kod određenih IBR metoda (LT, MT, UT i RT).

4. Conclusion

The new version of the standard EN ISO 9712:2022 brings a lot of important changes. First of all, the number of obligations of the certification body, employer and candidate is increasing. The conditions for access to certification in the field of practical industrial experience are being tightened, the requirements for exam tasks are increasing, as well as the conditions for reflecting and renewing the acquired certification.

Certification areas are expanding to include new materials, such as composites. And for new techniques in certain NDT methods, precise directions are given regarding the duration of additional training.



Zoran Nikolić^{1,a}, Veljko Nikolić^{2,b}

ISPITIVANJE ZAVARENIH SPOJEVA PRIMENOM FMC/TFM ULTRAZVUČNE TEHNIKE

INSPECTION OF WELDED JOINTS USING THE FMC/TFM ULTRASONIC TECHNIQUE

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

April 2025.

Ključne reči: Total Focusing Method, Full Matrix Capture, nepotpuna penetracija, legura aluminijuma, detekcija reflektora

Rezime

Ultrazvučna tehnika FMC/TFM (*Full Matrix Capture / Total Focusing Method*) odnedavno nalazi sve veću primenu u ispitivanju materijala i zavarenih spojeva u Evropi i svetu. Ova tehnika je poznatija kao tehnika totalnog fokusiranja. Razlozi zasve veću primenu su preciznost detekcije reflektora i unapređeni prikaz tih reflektora na ekranu uređaja, čime se ispitivaču obezbeđuje komfornije ocenjivanje ispitane komponente, a naručiocu ispitivanja vrlo detaljan i besprekoran izveštaj. Na taj način je obezbeđen adekvatan odgovor na sve složenije zahteve kvaliteta i ubrzan napredak industrije. U Srbiji i okruženju skoro da nema zabeleženih primera praktične primene ove merne tehnike. I ako ih ima, svode se na blic prezentacije i reklame prekookeanskih kompanija koje posluju na našim prostorima uglavnom dok traju radovi na izgradnji pojedinih gasovoda i naftovoda. Standard EN ISO 17640 navodi znatna ograničenja kod primene ultrazvučne metode za ispitivanje zavarenih spojeva bez pune penetracije. U ovom radu prezentovana su iskustva iz prakse u primeni tehnike totalnog fokusiranja na ispitivanju zavarenih spojeva od legura aluminijuma 6005A-T6 i 5083 H111 kod karakterističnog konstrukcijskog rešenja spojeva bez pune penetracije, nenarušavajući pritom fizičke principe na kojima je UT metoda zasnovana.

Adresa autora / Author's address:

¹ Siemens Mobility d.o.o. Cerovac, Sobovica BB, 34321 Kragujevac, Srbija

² Departman za fiziku, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad, Srbija

Email / ORCID ID:

^a /0009-0006-2550-9315

^b ferrumcarbon@gmail.com/ 0009-0006-2143-2883

Keywords: Total Focusing Method, Full Matrix Capture, incomplete penetration, aluminum alloys, reflector detection

Abstract

The FMC/TFM ultrasonic technique (*Full Matrix Capture / Total Focusing Method*) has recently gained increasing application in the inspection of materials and welded joints across Europe and globally. This method, more commonly referred to as the total focusing technique, is increasingly adopted due to its high accuracy in reflector detection and its enhanced visualization capabilities on inspection device displays. These advantages enable inspectors to evaluate components with greater ease, while providing clients with detailed and comprehensive inspection reports. As a result, this technique effectively responds to growing quality assurance demands and the accelerated progress of industrial technologies. In Serbia and neighboring countries, there are very few documented cases of the practical use of this measurement technique. When present, such applications are typically limited to brief demonstrations or promotional activities by overseas companies operating in the region—primarily during pipeline construction projects. Standard EN ISO 17640 outlines significant limitations for the use of ultrasonic testing on welded joints that lack full penetration. This study presents practical experiences with the application of the total focusing technique for the nondestructive testing of welded joints made from aluminum alloys 6005A-T6 and 5083 H111. These tests were performed on typical joint designs without full penetration, without violating the fundamental physical principles on which ultrasonic testing is based.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine



1. Uvod

Potreba da se sa što većom sigurnošću i brzinom proveri i potvrdi kvalitet izrade mašinskih konstrukcija, materijala i zavarenih komponenti razvila je različite metode zapreminskih ispitivanja bez razaranja materijala. Jedna od najnaprednijih, najsofisticiranijih i najpouzdanijih metoda je ultrazvučna metoda ispitivanja.

Pored već poznate ultrazvučne tehnike Puls-Eho koja se na našim prostorima uspešno primenjuje u industriji još od osamdesetih godina prošlog veka, a u svetu i Evropi već posle Drugog svetskog rata, napredak inženjerske elektronike i razvoj računarske opreme i softvera na početku dvadeset prvog veka učinili su ultrazvučnu metodu još zastupljenijom, preciznijom i podelili su je na više grana tj. tehnika. Različite tehnike su postale prepoznatljive i primenljive za ciljana ispitivanja u određenim granama industrije. Izdvojile su se tehnike kao što su već pomenuta Puls-Eho (PE), zatim Phased Array (PA), Time-of-flight diffraction (TOFD), Internal Rotary Inspection System (IRIS), Total Focusing Method (TFM) i druge. Svaka od navedenih ima svoje specifičnosti, prednosti i relativne nedostatke, ali su i dalje dovoljno pouzdane za detekciju diskontinuiteta u zavarenim spojevima i osnovnim materijalima.

Predmet ovog rada je opis i pojašnjenje dela iskustva iz praktične primene TFM ultrazvučne tehnike na ispitivanju zavarenih spojeva izrađenih od legura aluminijuma. Principi i specifičnosti TFM tehnike neće biti detaljno razmatrani jer prevazilaze okvire ovog rada, izuzetno u delovima gde je to neophodno radi lakšeg razumevanja sprovedenog ispitivanja koje se opisuje.

1.2 Pojašnjenja i značenja skraćenica

Skraćenica FMC je akronim engleskog izraza *Full Matrix Capture*, što se prevodi kao snimanje potpune matrice. U ovom slučaju se misli na matematičke matrice. Skraćenica TFM je akronim engleskog izraza *Total Focusing Method*, što na našem jeziku znači metoda totalnog fokusiranja.

U standardu EN ISO 9712:2013 (Ispitivanje bez razaranja-Kvalifikacija i sertifikacija osoblja za IBR) termin NDT Method (IBR Metoda) ipak je rezervisan za disciplinu koja primenjuje određeni fizički princip prilikom ispitivanja bez razaranja. Takođe, isti standard objašnjava da je termin NDT Technique (Tehnika IBR-a) samo specifičan način korišćenja IBR metode [1]. Budući da se TFM zasniva na istim fizičkim principima i zakonitostima kao i sve ostale tehnike UT (Snelliusov zakon, Youngov modul, brzina prostiranja mehaničkih

talasa i dr.), proizilazi da TFM ne može biti metoda već tehnika ispitivanja ultrazvučnom metodom.

Prvi korak u TFM tehnici, odnosno FMC, govori o načinu snimanja i akvizicije podataka dobijenih skeniranjem koji će biti memorisani i kasnije obrađeni. Drugi korak, odnosno TFM, se odnosi na obradu podataka dobijenih primenom FMC (snimanjem pune matrice), koja se, uz podršku elektronike uređaja, u formi rezultata ispitivanja, prikazuje direktno na ekranu uređaja [2]. Uređaji koji se koriste za ispitivanje ovom tehnikom pre svega moraju da podržavaju TFM opciju i da poseduju značajan memorijski kapacitet, dobar propusni opseg i znatnu računarsku snagu zbog svega gore navedenog. Sve ovo omogućuje dobijanje zapisa na ekranu bez kašnjenja u slučaju primene interaktivnog načina snimanja i analize, što ova tehnika i omogućuje.

Za neposredno sprovođenje ispitivanja TFM tehnikom u smislu skeniranja na ispitnom komadu, nije potrebno posebno operativno iskustvo i znanje. Međutim za tumačenje snimaka, analizu eventualnih reflektora, ocenjivanje kvaliteta zavarenog spoja i izradu izveštaja potrebno je značajno iskustvo u ispitivanju metodom ultrazvuka, obimno teorijsko znanje iz oblasti tehnologije zavarivanja, detaljno poznavanje principijalnih metoda IBR ispitivanja i posedovanje važećeg sertifikata o završenoj obuci za ispitivanje metodom UT kvalifikacionog nivoa 2 (minimalni nivo), prema EN ISO 9712:2013 [1].

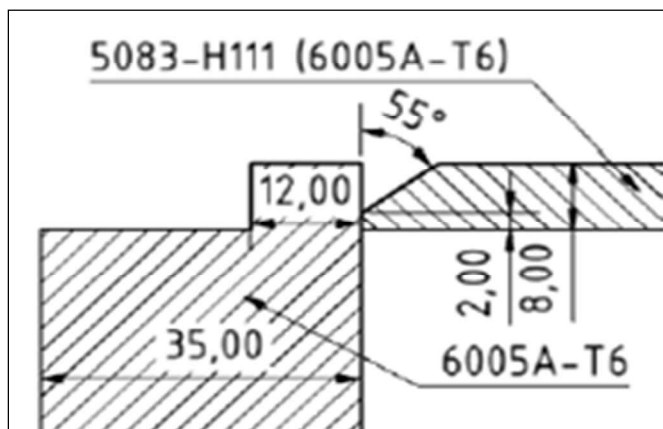
Ranije su predmetni spojevi bili ispitivani konvencionalnom tehnikom PE. Rezultati su bili veoma zadovoljavajući i više puta proveravani komparativnom metodom. Osoblje za IBR je imalo veliko iskustvo i rezultati ispitivanja su u visokom procentu zadovoljavali zahtevani nivo kvaliteta prema važećim standardima. Izmena zahteva naručioca posla je u jednom momentu tražila od nas da se spoj sa oznakom 6HY ubuduće ispituje ultrazvučnom tehnikom TFM. Kako nismo imali kome da se obratimo za pomoć u našoj zemlji, naša ekipa je stigla u jednu veoma industrijski i tehnološki naprednu evropsku državu na specijalizaciju za primenu TFM tehnike. Sa njihovim ekspertima smo izvesno vreme vežbali primenu TFM tehnike ispitivanja koju su oni već godinama unazad koristili. Posle uspešno savladane specijalizacije, usaglašavanja sa kupcem i usvajanja procedure za ispitivanje, vratili smo se u našu zemlju i implementirali novu tehniku ispitivanja zavarenih spojeva i postigli u tom smislu zapažene rezultate koji su i dan danas bez primedbi



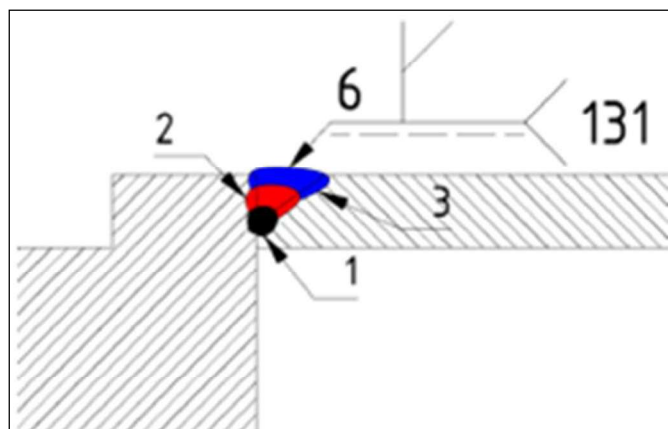
naručioca. Tehnika je napredna, nije jednostavna za ovladavanje, ali učenjem i vežbanjem je usavršena i sa ponosom možemo reći da smo jedan od retkih timova, ako ne i jedini u našoj zemlji i okruženju, koji primenjuje TFM tehniku i isporučuje zavarene spojeve visokog kvaliteta za planetarno poznatog naručioca posla.

2. Sprovođenje i tok ispitivanja

Ispitivanje je sprovedeno prema planu kontrole zavarenih spojeva koji dolazi od nadležnih službi i sektora iz proizvodnje a po specifičnom zahtevu kupca. U toku procesa proizvodnje ispitivan je zavareni spoj proizveden od osnovnih materijala napravljenih od legura aluminijuma 6005A-T6 i 5083 H111 [3-5] debljina 8 mm sa pripremom spoja HY, primenom MIG (131) postupka u PA položaju. Na slikama 1 i 2 prikazani su detalji pripreme i raspored prolaza na ispitivanom spoju, prema WPS-u.



Slika 1. Skica pripreme spoj
Figure 1. Joint preparation sketch

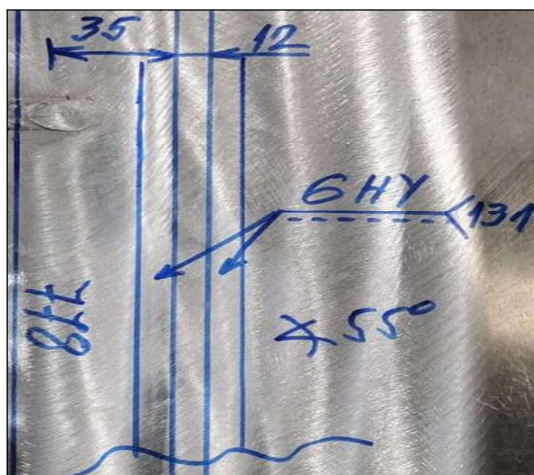


Slika 2. Raspored prolaza
Figure 2. Pass sequence layout

Pre početka ispitivanja neophodno je utvrditi da li je ispitna površina pravilno pripremljena. Za adekvatnu pripremu površine za skeniranje tehnikom TFM potrebno je izbrusiti lice zavara na nivo hrapavosti osnovnog materijala zbog specifičnosti vođenja sonde paralelno osovini šava. Takođe je potrebno ispitnu površinu oko zavarenog spoja ispolirati odgovarajućim diskovima za poliranje minimalno u širini kolika je i dužina pleksi klina. U ovom slučaju, to je širina oko 50 mm sa obe strane zavara. Prilikom poliranja brusilicom neophodno je voditi računa da se izbegne stvaranje brazda, zajedno na osnovnom materijalu i da površina koja se polira ne bude valovita. Pošto je poznato da aluminijum stvara na površini oksid

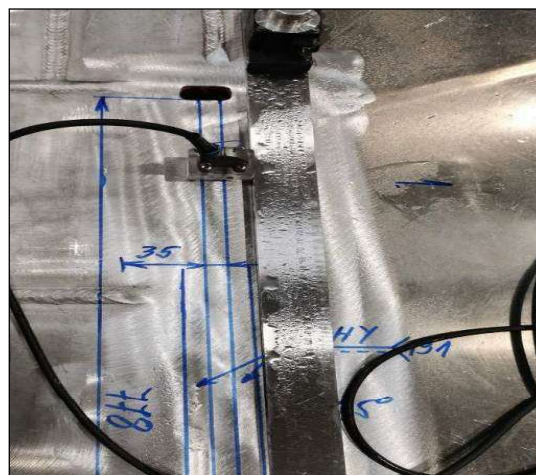
(Al_2O_3), a takođe se zna da se akustičke karakteristike aluminijuma bez oksida i sa oksidom znatno razlikuju, potrebno je posvetiti posebnu pažnju kod uklanjanja sloja oksida brušenjem. Ne pridržavanje uputstava za pripremu ispitne površine može ugroziti ceo tok i dovesti u sumnju pouzdanost rezultata ispitivanja [6,7].

Sledeća aktivnost je obeležavanje pozicija za skeniranje na ispitnom komadu i pozicioniranje opreme i uređaja za ispitivanje. Za pravilno obeležavanje i pozicioniranje enkodera, sonde i prateće opreme odgovoran je isključivo operater koji sprovodi skeniranje. Na slikama 3 i 4 prikazano je pravilno obeležavanje ispitne komponente i pozicioniranje opreme za skeniranje.



Slika 3. Obeležavanje ispitne komponente

Figure 3. Test component marking



Slika 4. Pozicioniranje opreme

Figure 4. Equipment positioning

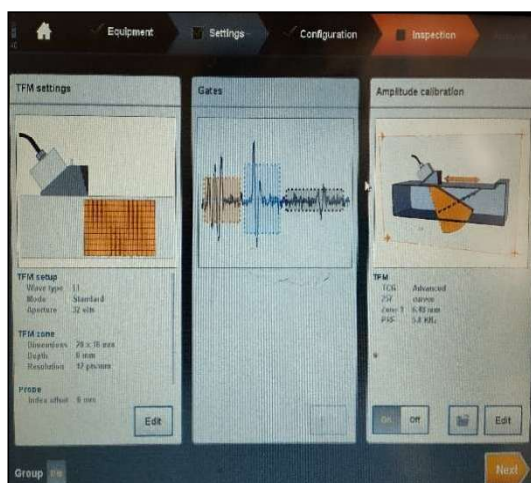
2.1. Podešavanje uređaja i opreme

Podešavanje i konfiguracija opreme i uređaja za ispitivanje TFM tehnikom zahteva veliku veštinu i znanje ispitivača, kao i dosta vremena, posebno kada se uređaj i oprema podešavaju za ispitivanje neke komponente po prvi put. Jednom podešeni parametri za istu komponentu i tip zavarenog spoja mogu se uvek pozvati iz memorije uređaja pri početku ispitivanja, što u znatnoj meri olakšava i ubrzava čitav proces ispitivanja. Samo ispravno podešeni uređaj i oprema garantuju da će ispitivanje biti privedeno kraju u skladu sa standardima i zahtevima naručioca.

Na početku rada sa TFM tehnikom ispitivanja nismo imali adekvatne standarde koji bi nam

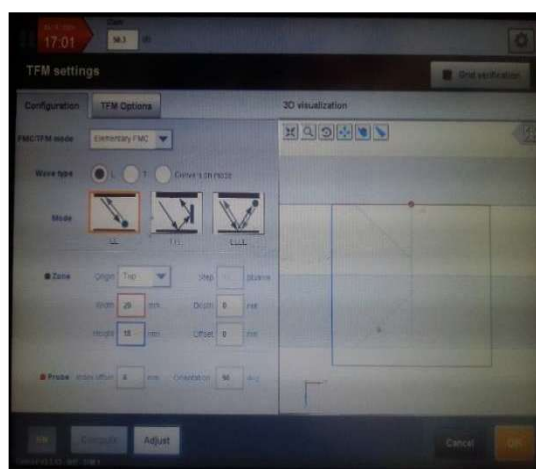
olakšali podešavanje uređaja i opreme, pa smo koristili uputstva naših kolega iz Evrope kod kojih smo imali prilike da savladamo ovu tehniku. Godine 2021. Tehnički komitet za standardizaciju je izdao standarde koji daju smernice i pravila za primenu FMC/TFM ultrazvučne tehnike ispitivanja. To su standardi ISO 23864:2021 i ISO 23865:2021 [7,8]. Pored ovih standarda, značajna je i grupa standarda za ultrazvučnu tehniku faznog niza (PAUT). Ovi standardi su umnogome olakšali rad prilikom konfiguracije opreme i tumačenja rezultata ispitivanja kvaliteta zavarenih spojeva FMC/TFM tehnikom [9-12].

Na slikama 5-8 su prikazani neki od parametara koji se unose prilikom podešavanja uređaja za TFM pre skeniranja predmetnog spoja.



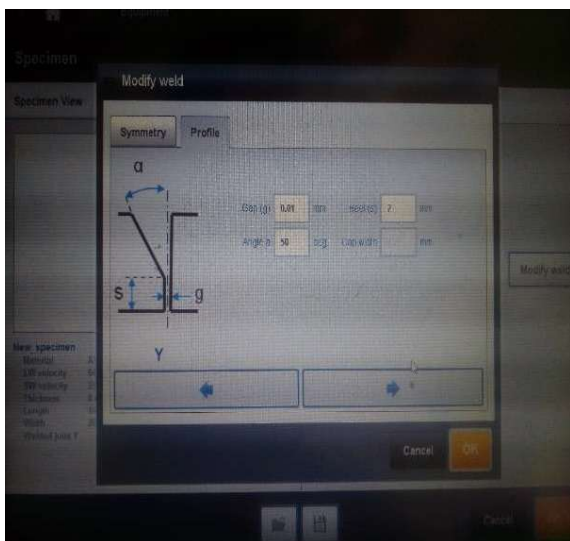
Slika 5. Podešavanje zone od interesa

Figure 5. Region of interest adjustment



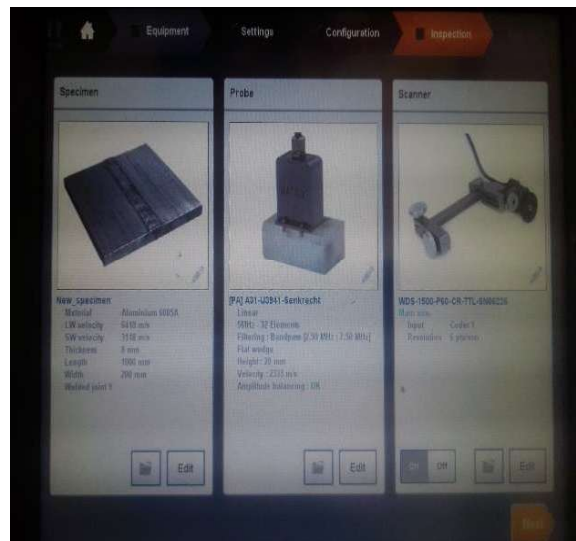
Slika 6. Odabir tipa talasa za ispitivanje

Figure 6. Selection of wave type for inspection



Slika 7. Odabir tipa spoja

Figure 7. Selection of joint type



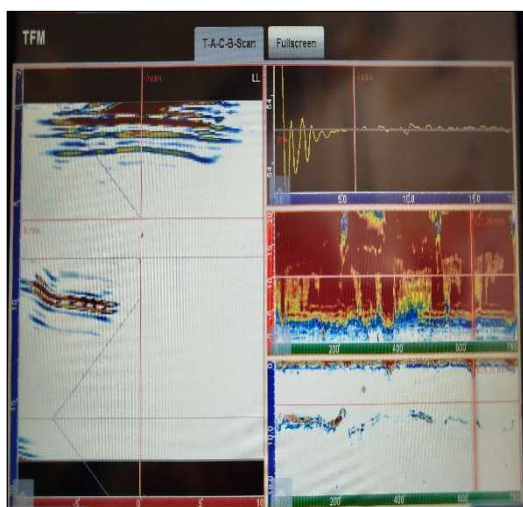
Slika 8. Čekiranje opreme za skeniranje

Figure 8. Equipment check for scanning

Prilikom ispitivanja ovog spoja, korišćena je voda (H_2O) kao kontaktno sredstvo [6, 13]. Ultrazvučni uređaj koji je korišćen poseduje pumpu za vodu koja se aktivira dok traje skeniranje i tako obezbeđuje akustičko sprezanje u bilo kom gravitacionom položaju. Spoj koji je opisan u ovom radu ispitivan je u horizontalnom (PA) položaju. Zbog lakše manipulacije sa opremom, pumpu smo uklonili i vodu nanosimo uz pomoć najobičnije ručne prskalice zapremine $\frac{1}{2}$ litra, što je ubrzalo rad, a s druge strane, garantovalo kvalitetnu akustičku spregu između pleksi klina i ispitne površine. Kako se ispitani delovi šalju na dodatne površinske obrade i zaštite posle ispitivanja, ne postoji rizik od napredovanja korozije na ispitnoj površini. Korišćenje vode kao kontaktnog sredstva

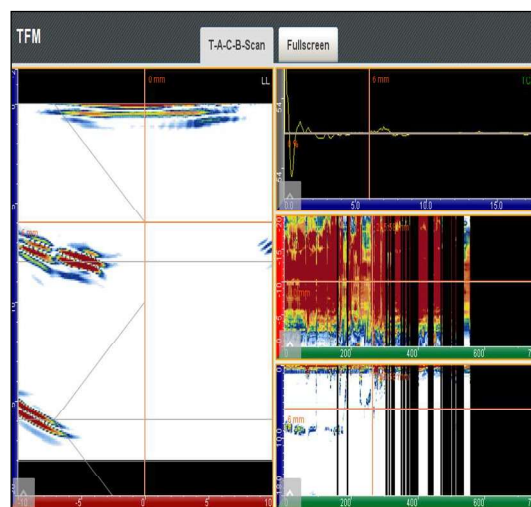
ipak mora biti usaglašeno sa naručiocem. Mi smo obezbedili saglasnost kupca. Bilo je i pokušaja korišćenja ultrazvučnog gela kao kontaktnog sredstva i iskustvo kaže da se može koristiti. Međutim, zbog značajne brzine skeniranja (do 70 mm/s), kao i povlačenja sonde po površini osnovnog materijala i uz ivicu lenjira (što je prikazano na slici 4), ispostavilo se da voda obezbeđuje lakše povlačenje sonde u poređenju sa ultrazvučnim gelom i samim tim brži proces skeniranja i bez zastoja.

Na slikama 9 i 10 se može videti prikaz na monitoru uređaja prilikom pravilnog vođenja sonde bez prekida i kada se tokom vođenja sonde javljaju prekidi na snimku usled neadekvatnog akustičkog sprezanja, nepažnje operatera i sl.



Slika 9. Pravilno vođena sonda

Figure 9. Proper probe handling



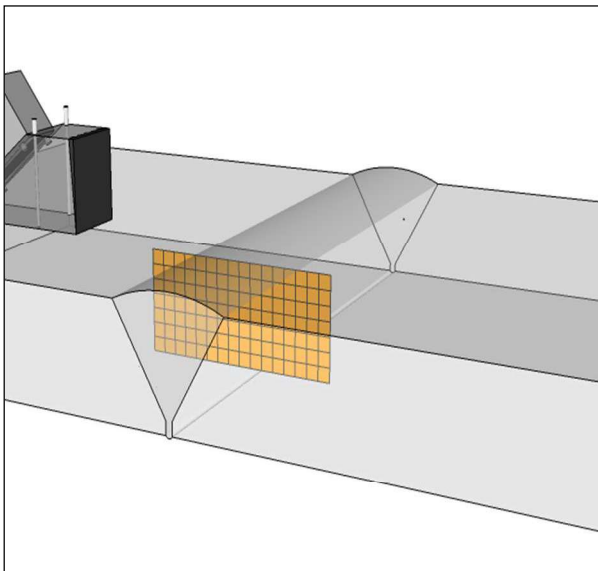
Slika 10. Vođenje sonde sa prekidima

Figure 10. Interrupted probe handling



3. Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja su zadovoljavajući ukoliko se poštuju sve ranije navedene mere. Pravila za ocenu eventualnih indikacija, njihov opis i karakterizaciju, kao i nivoe prihvatanja nalazimo u primenljivim standardima [7,12]. U pisanoj proceduri i radnom uputstvu za ispitivanje zavarenih spojeva TFM tehnikom su sadržane sve smernice i pravila za evaluaciju, analizu i tumačenje sprovedenog ispitivanja. U proceduri su takođe sadržani zahtevi proizvodnje, kao i specifični zahtevi naručioca ispitivanja, ukoliko ih ima. Pošto je zahteva bilo u ovom slučaju, oni su dobili prednost u odnosu na neka pravila iz standarda.



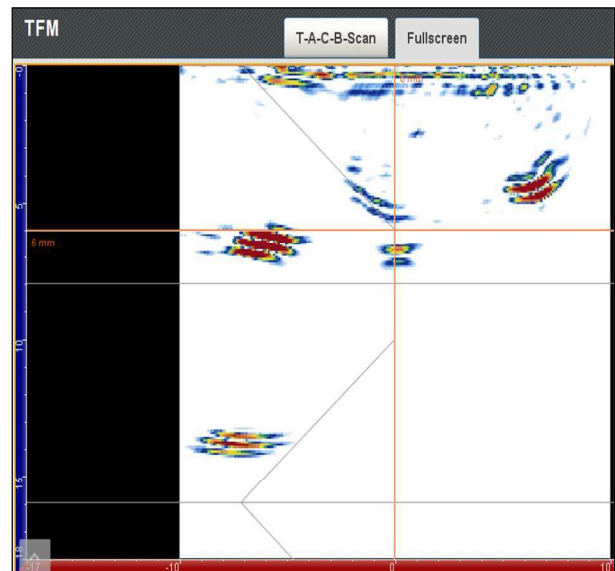
Slika 11. Ilustracija zone interesa

Figure 11. Illustration of region of interest

Pošto ultrazvučni uređaj pored A-skene ima i opciju 3-D prikaza [2], to je značajno koristilo u potvrđivanju ocene kvaliteta zavarenog spoja. Na slikama 13-16 je prikazan izgled detektovanih nesavršenosti na ekranu uređaja uz pomoć obe opcije. Mogućnost 3-D prikaza ima poseban značaj prilikom dorade zavara. Kada zavarivaču pokažemo signale ehoa od reflektora na Puls-Eho uređaju, njemu to malo ili ništa ne znači. Pošto nije za to obučan, on to vidi samo kao neke neobično iscrtane linije. Teško mu je da razume tip greške i poziciju greške u zavaru. U 3-D

Predmetni spoj je projektovan sa specifičnim konstruktivnim rešenjem koje je predviđalo nemogućnost potpunog uvarivanja. Dakle tip spoja je bio HY. Kod ovog tipa spoja, standardi za ultrazvučna ispitivanja navode određena ograničenja [14,15]. Zahtev naručioca posla je bio da se TFM tehnikom ispita samo zona od interesa [2] (slike 11 i 12). U ovom slučaju zona od interesa jeste zapravo dubina dostignutog uvarivanja od 6 mm. Iako je mestimično bilo ugorevanja na dubini preko 6 mm u delu zatupljenja, takve deonice nisu razmatrane.

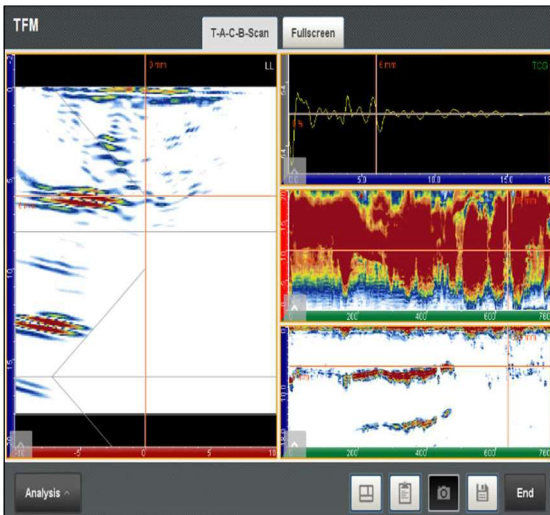
Na slici 11 je prikazana ilustracija zone interesa. Na slici 12 je jasno ograničena zona interesa na 6 mm od debljine lima koji je 8 mm.



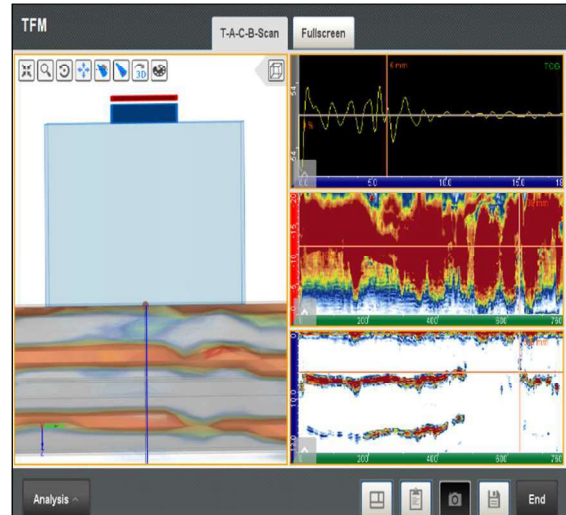
Slika 12. Zona interesa na monitoru

Figure 12. Region of interest on the monitor

prikazu, zavarivač može uz pomoć operatera da sagleda i okarakteriše grešku, kao i da razume njen nastanak i lokaciju. Ova činjenica garantuje uspešnost reparacije zavara u visokom procentu, što je dokazalo iskustvo, a što ima poseban značaj upravo kod reparacije zavara na legurama aluminijuma. Ovakav pristup problemu, kada zavarivač ima percepciju i viziju zavara sa greškama, stavlja zavarivača u poziciju ravnopravnog učesnika, što mu daje dodatni motiv za uspešnu reparaciju. To je možda i najveća prednost praktične primene TFM tehnike.



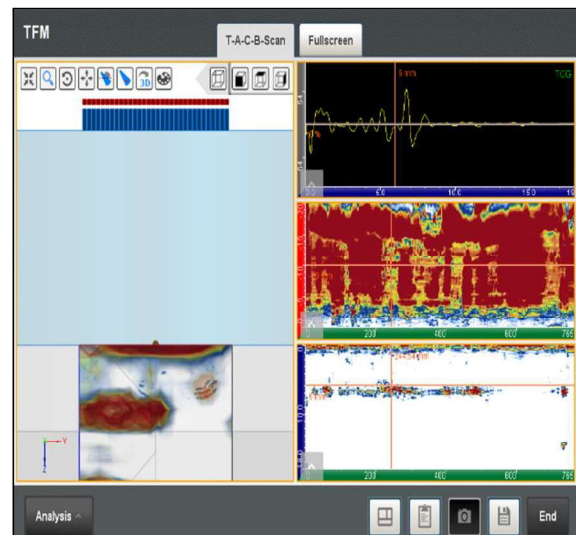
Slika 13. Prikaz A-sken
Figure 13. A-scan display



Slika 14. Prikaz 3-D (uzdužni presek)
Figure 14. 3D display (longitudinal section)



Slika 15. Prikaz A-sken
Figure 15. A-scan display



Slika 16. Prikaz 3-D (poprečni presek)
Figure 16. 3D display (cross-section)

Na slikama 17 i 18 je prikazan deo vizuelno potvrđenih nesavršenosti uočenih u toku žljebljenja

zavara koji je određen za doradu po oceni ispitivača, a u vezi sa prethodnim slikama.



Slika 17. Linearna poroznost
Figure 17. Linear porosity

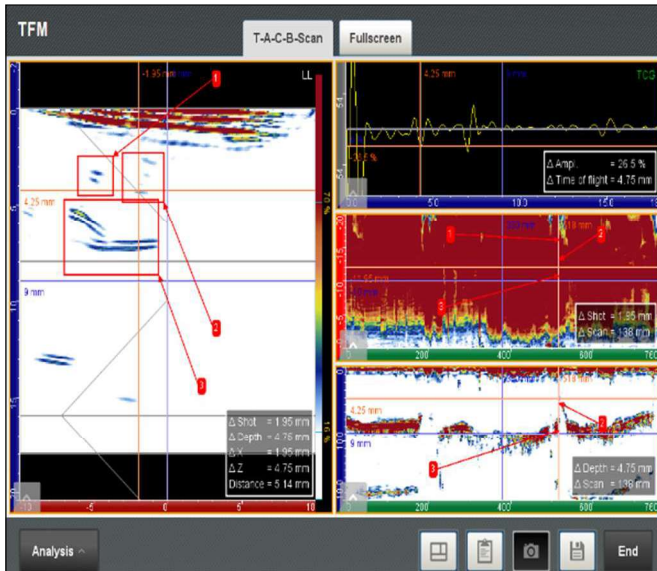


Slika 18. Grupisana poroznost/šupljine
Figure 18. Cluster porosity/voids



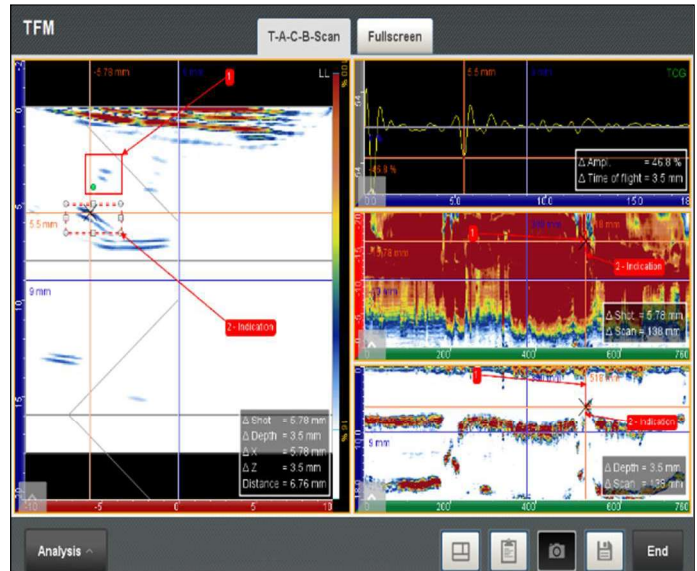
Kao što je ranije opisano, uređaji koji podržavaju TFM tehniku imaju i moćne računarske mogućnosti. Uređaj sa kojim je sprovedeno ovo ispitivanje ima, između ostalog, implementiran Windows 10 što nam daje raskošne mogućnosti u smislu memorijskog kapaciteta, fluidnosti u radu, povezivanja sa internetom i sl. Te funkcije su nam omogućile lagodnost komunikacije sa naručiocem

ispitivanja u pogledu zajedničke analize snimaka, ocene kvaliteta zavara i donošenja daljih odluka. Koristeći mogućnost snimka ekrana, obeležavanja i dimenzionisanja detektovanih grešaka i izradu izveštaja o TFM, rezultati ispitivanja su podignuti na najviši nivo ispitivačke struke. Na slikama 19 i 20 prikazani su primeri obeležavanja i dimenzionisanja detektovanih nesavršenosti.



Slika 19. Dimenzionisanje indikacija

Figure 19. Indication sizing



Slika 20. Dimenzionisanje indikacija

Figure 20. Indication sizing

4. Zaključak

Iskustvo iz prakse je dokazalo da tehniku TFM za ispitivanje treba primenjivati kada je god to izvodljivo. Preciznost u detekciji diskontinuiteta, prikaz diskontinuiteta na monitoru, mogućnost njihovog jednostavnog dimenzionisanja, lakoća i brzina postupka skeniranja, opcija formiranja isključivo interesne zone za ispitivanje i vrlo jasna forma izveštaja jesu značajne prednosti ove tehnike.

Obučiti operatere za sam proces skeniranja nije posebno zahtevan posao i ne traži skoro nikakvo predznanje budućih operatera iz oblasti UT. To mogu biti i zainteresovani radnici bez posebnih sertifikata i obuka, sa opštim interesovanjem za tehniku iz redova proizvodnje. Uz nekoliko sati vežbe sa ispitivačem koji ima iskustva i kvalifikacije za IBR taj proces se jednostavno i brzo savladava. Za podešavanje uređaja i opreme, tumačenje i analizu dobijenih snimaka i izradu izveštaja potrebno je veliko operativno iskustvo i znanje iz oblasti IBR koje mora biti verifikovano odgovarajućim sertifikatom, kao što je to ranije opisano.

4. Conclusion

Practical experience has demonstrated that the TFM technique should be applied whenever feasible. Its significant advantages include high precision in detecting discontinuities, clear visualization of discontinuities on the monitor, easy and accurate sizing of flaws, fast and simple scanning procedures, the ability to define specific zones of interest for inspection, and very clear, standardized reporting formats.

Training operators to perform the scanning process itself is not particularly demanding and requires almost no prior knowledge of ultrasonic testing. Operators can even be interested production workers without specialized certifications or formal training, provided they have a general interest in the technique. With just a few hours of practice under the guidance of an experienced and qualified NDT examiner, they can quickly master the scanning procedure. However, setting up the equipment, interpreting and analyzing the acquired data, and preparing reports require extensive operational experience and specialized knowledge in NDT, which must be validated by appropriate certification, as previously described.



TFM tehnike i na osnovu ovde opisanih i neopisanih, a nama poznatih, iskustava iz prakse, može se organizovati da operateri, tj. izvršioci skeniranja, ispituju zavareni spoj na gradilištu npr. negde u Brazilu a da kvalifikovan i dobro obučan IBR stručnjak za TFM ili inspektor zavarivanja negde u Evropi uz pomoć jednog računara i internet veze vrši podešavanje i konfiguraciju uređaja, posmatra tok ispitivanja u realnom vremenu, tumači i analizira skeniranje, donosi zaključke o ispitivanju, izrađuje izveštaje i dr. Ovakvim pristupom se potvrđuje činjenica da samo jedan ekspert za TFM može na vrlo komforan način da opslužuje i servisira više timova operatera na različitim lokacijama, a da pritom održava kvalitet ispitivanja na veoma visokom i naprednom nivou.

Na kraju, kao i sve druge metode i tehnike IBR ispitivanja, i FMC/TFM ima određenih ograničenja. Kao jedno od najznačajnijih je relativno visoka cena uređaja i opreme. Ta vrsta ograničenja je možda ipak vezana za tržište poslova u našoj zemlji i okruženju. Ima najava i već konkretnih akcija da će se to u bliskoj budućnosti promeniti na bolje. Stečeno iskustvo iz prakse, koje razumljivo nije moglo biti do detalja opisano u ovom radu, dostupno je svakom zainteresovanom na različite druge načine komunikacije.

Literatura / References

[1] SRPS EN ISO 9712:2013 - Ispitivanje bez razaranja – Kvalifikacija i sertifikacija osoblja za IBR, ISS, Institut za Standardizaciju Srbije, Beograd

[2] ISO 23243:2020 – Non-destructive testing – Ultrasonic testing with arrays – Vocabulary, ISO, Vernier, Geneva, Switzerland.

[3] SRPS EN 755-2:2016 - Aluminium and aluminium alloys – Extruded rod/bar, tube and profiles – Part 2: Mechanical properties, CEN, European Committee for Standardization, Brussels.

[4] EN 573-1:2004 - Aluminium and aluminium alloys – Chemical composition and form of wrought products – Part 1: Numerical designation system, CEN, European Committee for Standardization, Brussels.

[5] Prokić Cvetković, R., Popović, O., (2019), Metalurgija zavarivanja, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, , 307-312.

[6] EN ISO 16810:2012 – Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General principles,

Based on the capabilities and benefits of the TFM technique, as well as the practical experience—both documented and undocumented—that we have gained, it is possible to organize remote inspection workflows. For example, scanning operators at a construction site in Brazil can perform the inspection, while a qualified and well-trained TFM NDT specialist or welding inspector in Europe remotely controls the device setup and configuration, monitors the inspection in real-time via internet connection, interprets and analyzes the scan data, draws conclusions, and generates reports. This approach confirms that a single TFM expert can comfortably support and service multiple operator teams at various locations while maintaining a high and advanced level of inspection quality.

Finally, like all other NDT methods and techniques, FMC/TFM has certain limitations. One of the most notable is the relatively high cost of the equipment and associated hardware. This limitation is likely more tied to the local market conditions in our country and region. However, there are indications and ongoing initiatives suggesting that this situation will improve significantly in the near future. The practical experience gained, which understandably could not be fully detailed in this paper, is available to any interested parties through various other communication channels.

CEN, European Committee for Standardization, Brussels.

[7] ISO 23864:2021 – Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of automated total focusing technique (TFM) and related technologies, ISO, iiw, Vernier, Geneva, Switzerland.

[8] ISO 23865:2021 – Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General use of full matrix capture / total focusing technique (FMC / TFM) and related technologies, ISO, iiw, Vernier, Geneva, Switzerland.

[9] ISO 18563-1:2022 – Non-destructive testing – Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment – Part 1: Instruments, ISO, Vernier, Geneva, Switzerland.

[10] ISO 18563-2:2017 – Non-destructive testing – Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment – Part 2: Probes, ISO, Vernier, Geneva, Switzerland.

[11] ISO 18563-3:2015 – Non-destructive testing – Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment – Part 3: Combined system, CEN, European Committee for Standardization, Brussels.



[12] ISO 19285:2017 – Non-destructive testing of welds – Phased array ultrasonic testing (PAUT) – Acceptance levels, CEN, European Committee for Standardization, Brussels.

[13] EN 10160:1999 – Ultrasonic testing of steel flat product of thickness equal or greater than 6 mm (reflection method), CEN, European Committee for Standardization, Brussels.

[14] ISO 17640:2018 - Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Technique, testing levels, and assessment, ISO, Vernier, Geneva, Switzerland.

[15] EN ISO 17635:2016 - Non-destructive testing of welds – General rules for metallic materials, CEN, European Committee for Standardization, Brussels.



SIGMA LAB



SIGMALAB.RS

Ispitivanje Materijala & Zavarenih Spojeva

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2025**

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimenzije (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
DIN	crno/beli	-	45 000	28 000	19 000	12 000
	kolor	120 000	85 000	-	-	-

- U cene nije uračunat PDV 20%.
- Objavljanje oglasa u samo jednom broju iznosi 30% od datih cena.
- Reklamni tekstovi: 25% od cene površine crno/belih oglasa.
- Dostava materijala:
 - za crno-beli film ili CD (Adobe Photoshop / CoreIDRAW);
 - za kolor film ili CD (Adobe Photoshop / CoreIDRAW);
 - izrada filma sa CD: 10% od cene angažovanog prostora.
- Na web prezentaciji DUZS-a, (www.duzs.org.rs), na strani Marketing, objavljuje se pregled firmi-oglašivača sa podacima o glavnim grupama proizvoda/usluga i adresom web prezentacije. Svi posetioci naše web prezentacije mogu da posete i web prezentacije oglašivača, preko aktivnih linkova koji se nalaze na ovoj stranici!

WELDING & WELDED STRUCTURES, Quarterly review
Advertising prices for four successive numbers in 2025

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimensions (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
EUR	black/white	-	1000	500	400	300
	colour	3000	2000	-	-	-

- VAT 20% included.
- Advertising in one number only is 35% of the given prices.
- Commercial articles: 30% of black/white advertising price.
- Print material:
 - for black/white CD (Adobe Photoshop / CoreIDRAW)
 - for color CD (Adobe Photoshop / CoreIDRAW).
- All the visitors of our web site may be linked to the advertisers' web site.

INDEKS OGLAŠIVAČA
ADVERTISERS INDEX

MESSER TEHNOGAS

YASKAWA SLOVENIJA

HONEX

ELIMP

NEMINIK

SIGMA LAB

EDC D.O.O. HRVATSKA

TMS CEE D.O.O BEOGRAD

MESSE ESSEN - SCHWEIßEN & SCHNEIDEN

- | | |
|---|---------------------|
| 1. ČLANARINA DUZS za 2025. godinu | 5.000 dinara |
| Članovima DUZS GRATIS godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" | |
| 2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2025. godina u slobodnoj prodaji (u cene je uračunat PDV 10%): | |
| ▪ cena pojedinačnog broja..... | 1.150 dinara |
| ▪ godišnja pretplata za 1 komplet brojeva godišnjeg izdanja..... | 3.520 dinara |
| 3. ČASOPIS - stari brojevi (u cene je uračunat PDV 10%) | |
| a) u slobodnoj prodaji: | |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2024. godinu | 500 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... | 250 dinara |
| b) beneficirane cene za članove DUZS: | |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2024. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) | 400 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) | <u>Gratis</u> |
| 4. Knjiga Organizacija i ekonomika zavarivačkih radova – autor: prof. dr Zoran Radojević (uračunat PDV 10%) | 1.045 dinara |
| 5. Zbirke standarda OBEZBEĐENJE KVALITETA U ZAVARIVANJU, komplet 4 toma (izdanja su i z 2012. godine) | 6.750 dinara |