



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 kašnjenjau 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].

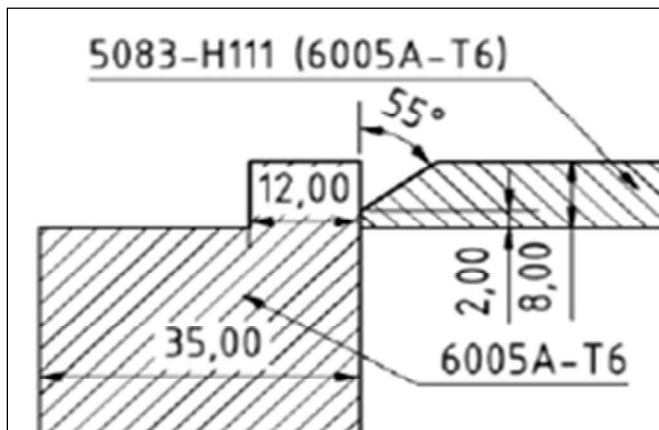
Ranije su predmetni spojevi bili ispitivani konvencionalnom tehnikom PE. Rezultati su bili veoma zadovoljavajući i više puta proveravani komparativnom metodom. Osoblje za IBR je imalo veliko iskustvo i rezultati ispitivanja su u visokom procentu zadovoljavali zahtevani nivo kvaliteta prema važećim standardima. Izmjena 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



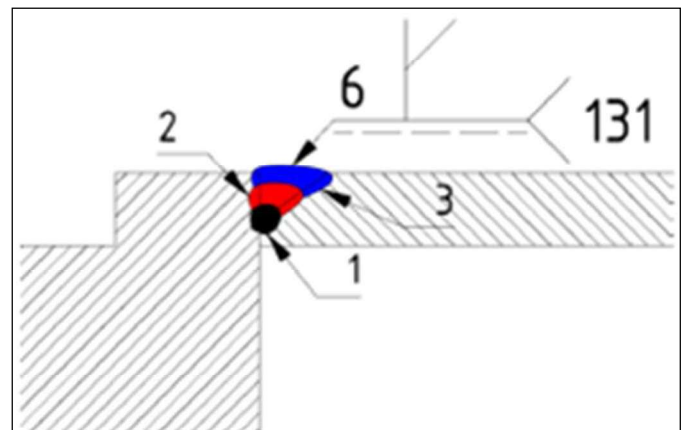
naručioca. Tehnika je napredna, nije jednostavna za ovladavanje, ali učenjem i vežbanjem je usavršena i sa ponosom možemo reći da smo jedan od retkih timova, ako ne i jedini u našoj zemlji i okruženju, koji primenjuje TFM tehniku i isporučuje zavarene spojeve visokog kvaliteta za planetarno poznatog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

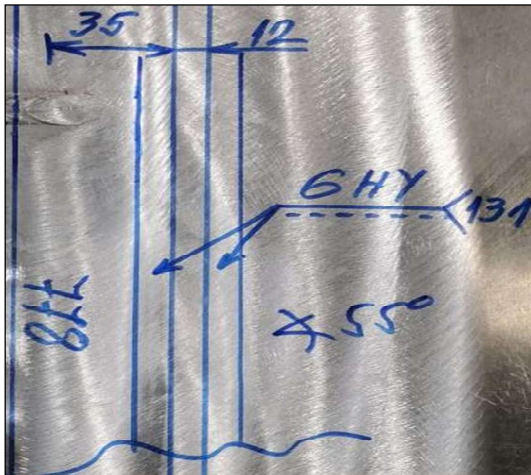


Slika 2. Raspored prolaza
Figure 2. Pass sequence layout

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

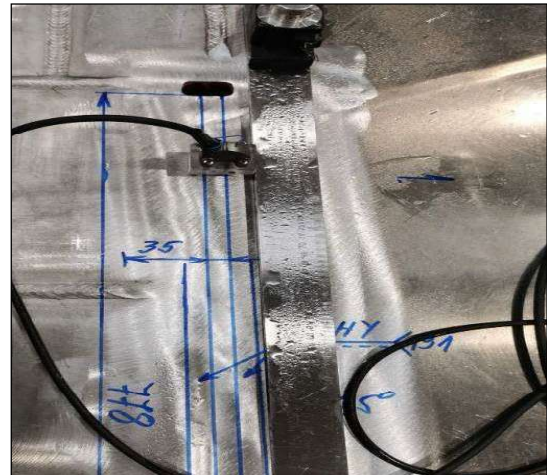
(Al_2O_3), a takođe se zna da se akustičke karakteristike aluminijuma bez oksida i sa oksidom znatno razlikuju, potrebno je posvetiti posebnu pažnju kod uklanjanja sloja oksida brušenjem. Ne pridržavanje uputstava za pripremu ispitne površine može ugroziti ceo tok i dovesti u sumnju pouzdanost rezultata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

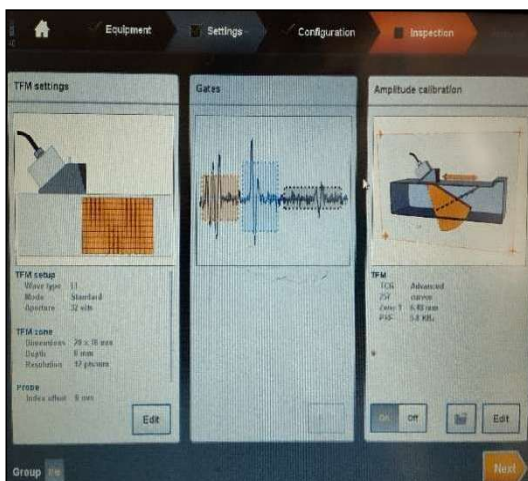
2.1. Podešavanje uređaja i opreme

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

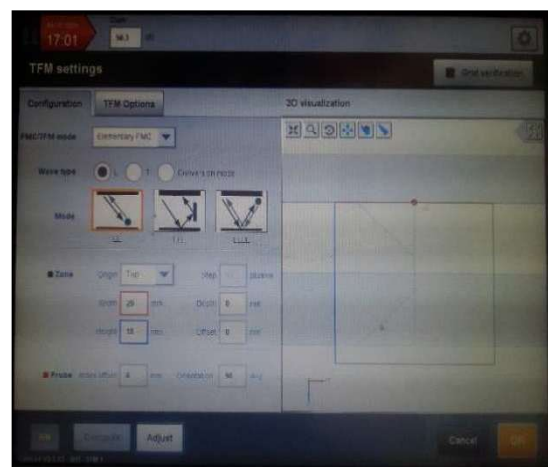
olakšali podešavanje uređaja i opreme, pa smo koristili uputstva naših kolega iz Evrope kod kojih smo imali prilike da savladamo ovu tehniku. Godine 2021. Tehnički komitet za standardizaciju je izdao standarde koji daju smernice i pravila za primenu FMC/TFM ultrazvučne tehnike ispitivanja. To su standardi 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.



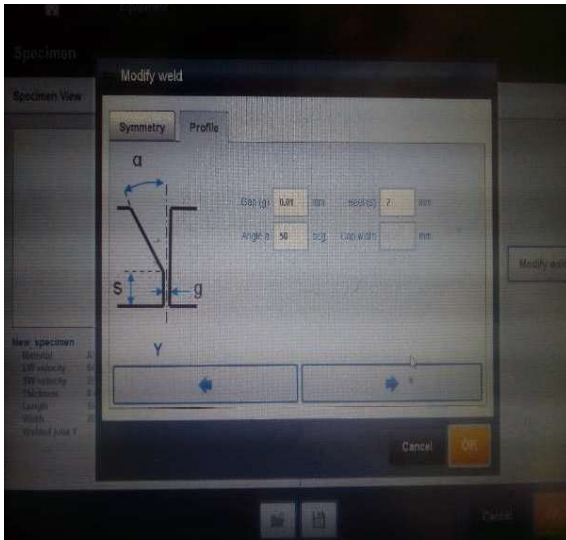
Slika 5. Podešavanje zone od interesa

Figure 5. Region of interest adjustment



Slika 6. Odabir tipa talasa za ispitivanje

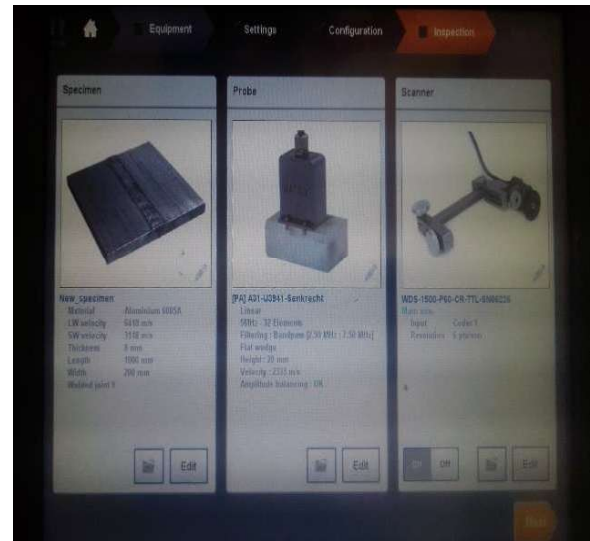
Figure 6. Selection of wave type for inspection



Slika 7. Odabir tipa spoja

Figure 7. Selection of joint type

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

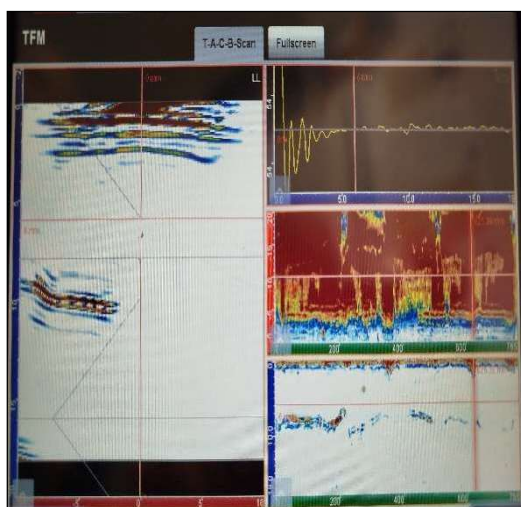


Slika 8. Čekiranje opreme za skeniranje

Figure 8. Equipment check for scanning

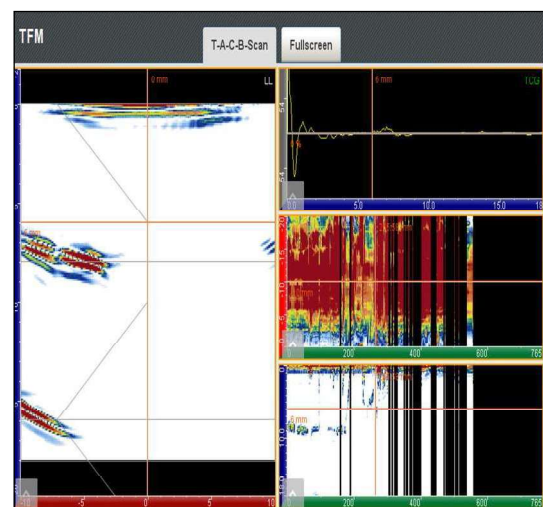
ipak mora biti usaglašeno sa naručiocem. Mi smo obezbedili saglasnost kupca. Bilo je i pokušaja korišćenja ultrazvučnog gela kao kontaktnog sredstva i iskustvo kaže da se može koristiti. Međutim, zbog značajne brzine skeniranja (do 70 mm/s), kao i povlačenja sonde po površini osnovnog materijala i uz 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



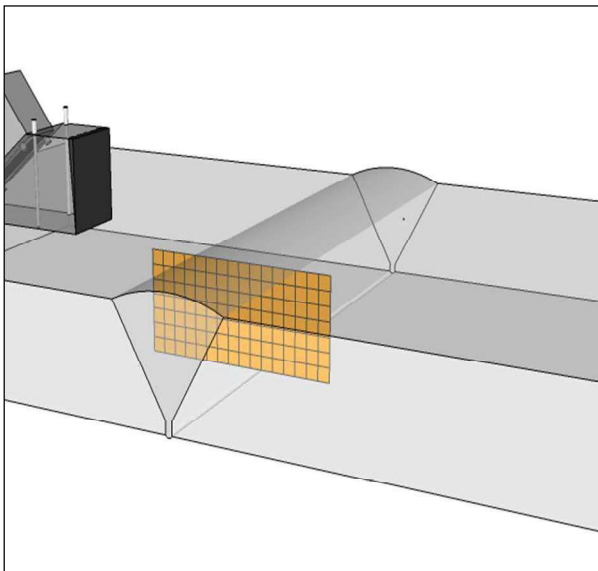
Slika 10. Vođenje sonde sa prekidima

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.



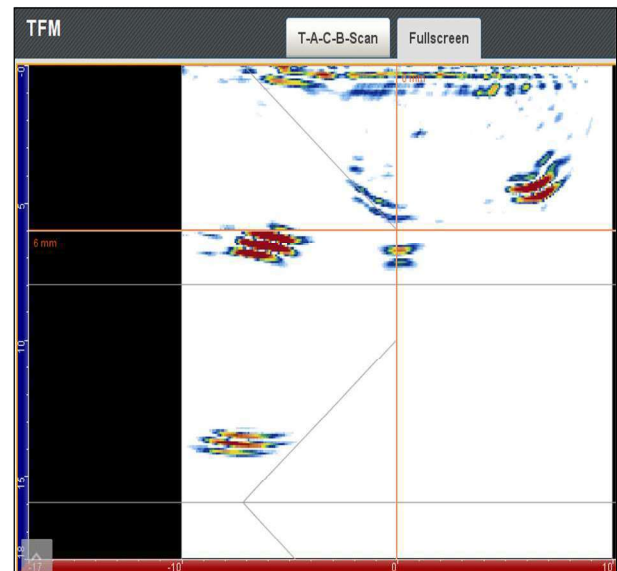
Slika 11. Ilustracija zone interesa

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.

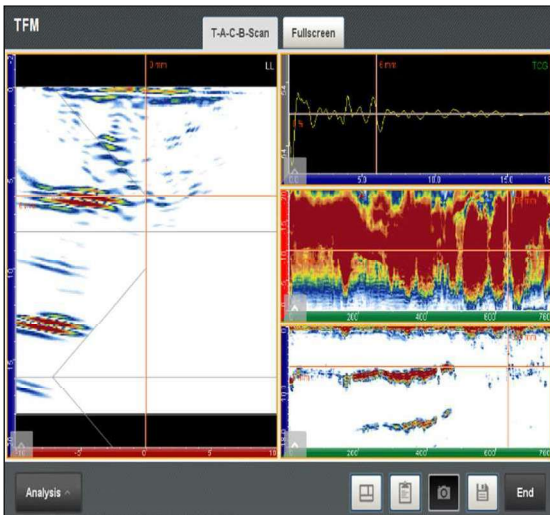
Na slici 11 je prikazana ilustracija zone interesa. Na slici 12 je jasno ograničena zona interesa na 6 mm od debljine lima koji je 8 mm.



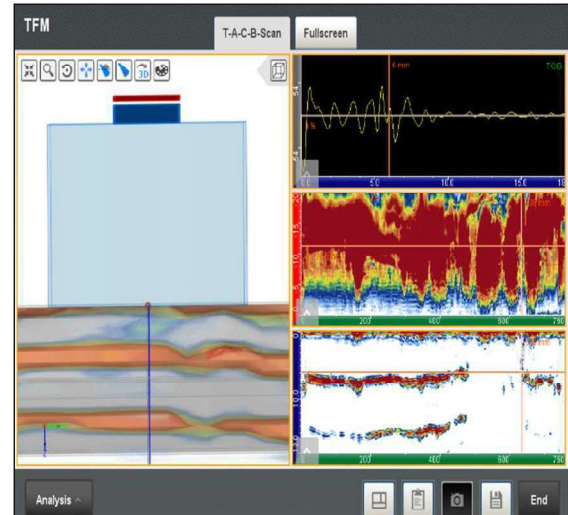
Slika 12. Zona interesa na monitoru

Figure 12. Region of interest on the monitor

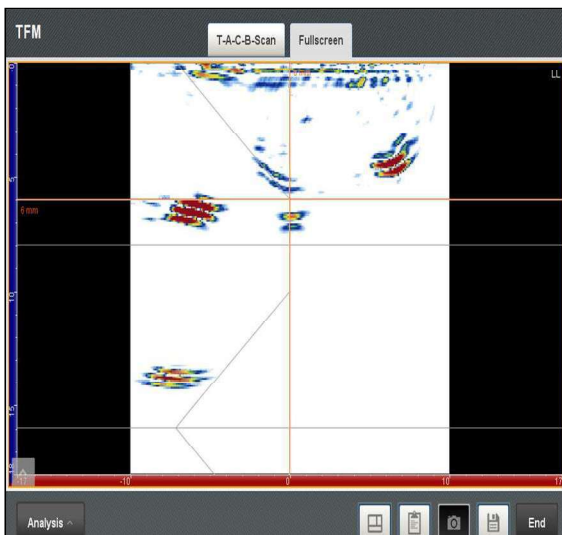
prikazu, zavarivač može uz pomoć operatera da sagleda i okarakteriše grešku, kao i da razume njen nastanak i lokaciju. Ova činjenica garantuje uspešnost reparacije zavara u visokom procentu, što je dokazalo iskustvo, a što ima poseban značaj upravo kod reparacije zavara na legurama aluminijuma. Ovakav 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.



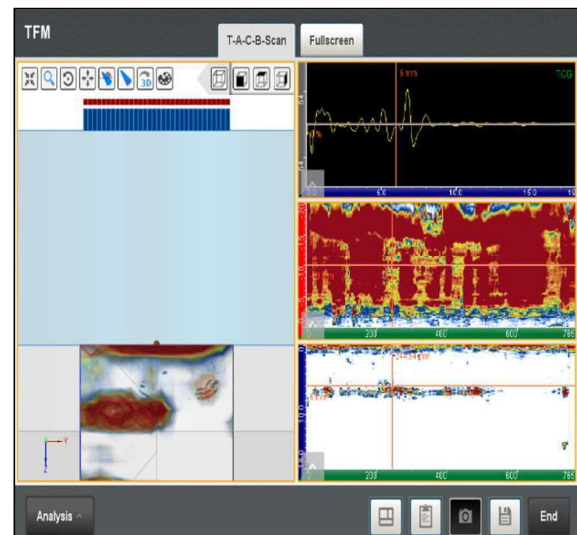
Slika 13. Prikaz A-sken
Figure 13. A-scan display



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

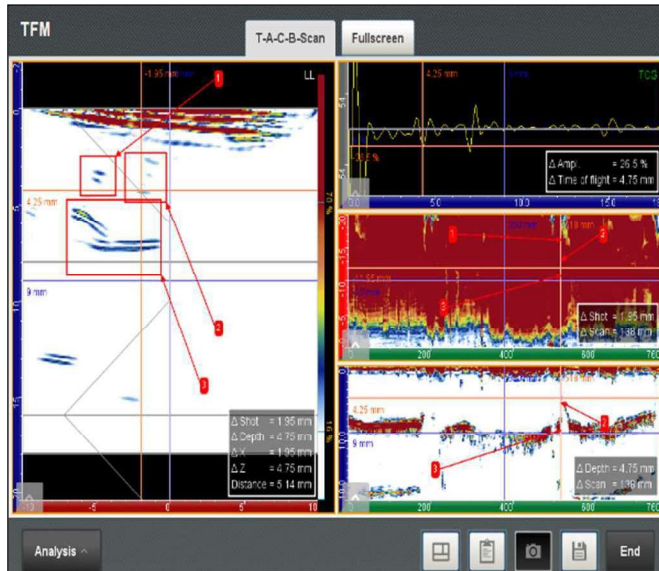


Slika 18. Grupisana poroznost/šupljine
Figure 18. Cluster porosity/voids



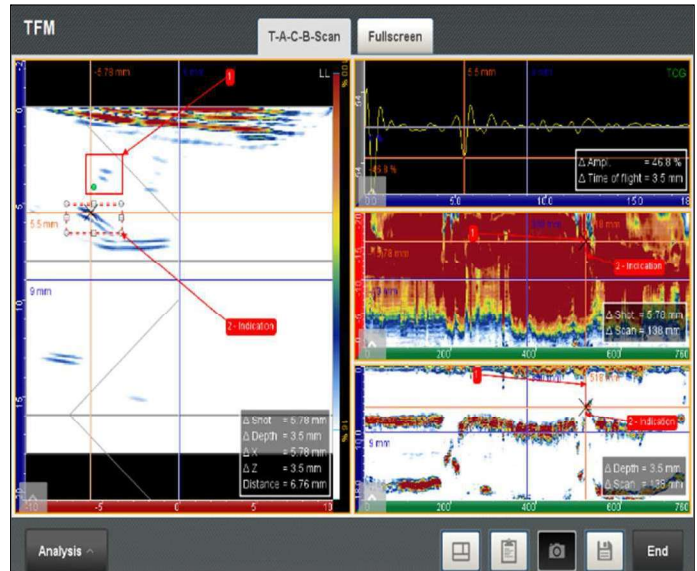
Kao što je ranije opisano, uređaji koji podržavaju TFM tehniku imaju i moćne računarske mogućnosti. Uređaj sa kojim je sprovedeno ovo ispitivanje ima, između ostalog, implementiran Windows 10 što nam daje raskošne mogućnosti u smislu memorijskog kapaciteta, fluidnosti u radu, povezivanja sa internetom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

