



Aleksandar Dragojević<sup>1</sup>, Ivica Garašić<sup>2</sup>, Tomislav Kezele<sup>2</sup>

## PA ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE TRAČNICA ZAVARENIH AT POSTUPKOM

### PA ULTRASONIC TESTING OF AT WELD JOINTS IN RAILS

**Stručni rad / Professional paper**

**Rad primljen / Paper received:**

Novembar 2023.

**Rad prihvaćen / Paper accepted:**

Januar 2024.

**Adresa autora / Author's address:**

<sup>1</sup> IDEF d.o.o., Kranjčevićeva 30, Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje,  
Ivana Lučića 1, Zagreb, Hrvatska

**Ključne reči:** ultrazvučno ispitivanje, aluminotermijski zavareni spoj, ispitivanje tračnica

**Keywords:** ultrasonic testing, aluminothermic welded joint, rail inspection.

#### Rezime

U ovom radu provedeno je usporedno ispitivanje s dva različita ultrazvučna sistema na aluminotermijskim zavarenim spojevima tračnice. Ispitivanje je provedeno konvencionalnim sistemom i sistemom višestrukog pretvarača. Podešavanje osjetljivosti provedeno je na umjetno napravljenim reflektorima na uzorku tračnica, dok je usporedbeno ispitivanje provedeno na tračnici sa stvarnim pogreškama. Zbog složene geometrije tračnice i vrste pogrešaka koje mogu nastati samo ispitivanje može biti izazov u odabiru sistema i tehnike ispitivanja. Cilj rada je prikazati s obzirom na ograničenja ultrazvučnih sistema rezultate ispitivanja koji ukazuju na prednost ultrazvučnog sistema višestrukog pretvarača u odnosu na konvencionalni sistem.

#### Abstract

In this paper, a comparative test with two different ultrasonic systems was performed on the aluminothermic welded joints of the rail. The test was carried out with a conventional system and a phased array system. Sensitivity adjustment was carried out on artificially made reflectors on rail and a comparative test on the rail with real imperfections. Due to the complex geometry of the rail and the type of errors that can occur, the test itself can be a challenge in selecting the test system and technique. The aim of the paper is to show, considering the limitations of ultrasound systems, test results that indicate the advantage of a phased array ultrasound system compared to a conventional system.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa Međunarodnog naučnog i stručnog skupa: Zavarivanje spaja – „Zavarivanje i zavarene konstrukcije 2023“ održanog u Sarajevu, BiH, od 25. do 27. oktobra 2023. godine.



## 1. Uvod

Aluminotermijsko zavarivanje je postupak zavarivanja tračnica termitnom smjesom pri čemu se uslijed egzotermne reakcije oduzima kisik željeznom oksidu te nastaje rastaljeno željezo koje služi kao dodatni materijal. Osnovni materijal i kalup se predgrijavaju plinskim plamenom (acetilen-kisik ili propan butan-kisik) na temperaturu oko 900-1000 °C. Egzotermnom reakcijom se postiže temperatura od približno 2450 °C te se nakon ciklusa predgrijavanja i formiranja taline otvara ispušt pa uz gravitacijsko djelovanje dolazi do popunjavanja kalupa. Kvalitetna priprema kalupa i predgrijavanje nužni su za miješanje taline i osnovnog materijala tračnice te formiranje zavarenog spoja. Nakon završene aluminotermijske reakcije kalup se razbija i višak materijala se mehanički uklanja. Kao posljedica neodgovarajuće metode i tehnologije zavarivanja ovisno o postupku, pripremi i kvaliteti materijala mogu nastati nepravilnosti u zavarenom spoju koje se mogu detektirati metodama ispitivanja bez razaranja.

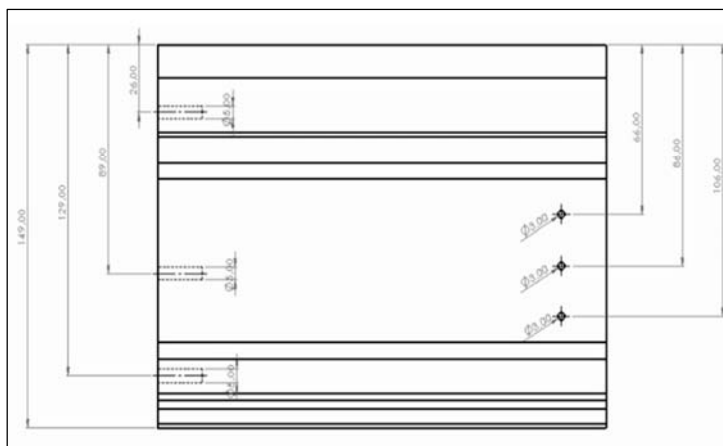
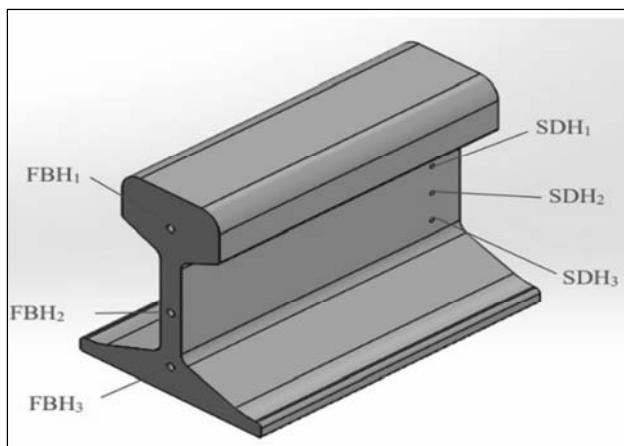
U ovom radu razmatrana je problematika detekcije jedne vrste pogrešaka u aluminotermijskom zavaru tračnice konvencionalnim ultrazvučnim (UT-Ultrasonic

Testing) ispitivanjem i višepretvorničkim ultrazvučnim (PA-UT – Phased array ultrasonic testing) ispitivanjem. Ispitivanje su se provodila po gaznoj površini tračnice simulirajući situacije ispitivanja zavarenih spojeva kada nije moguće provoditi ispitivanje na vratu ili stopi tračnice zbog nedostupnosti ili neodgovarajuće površine potrebne za provedbu ultrazvučnog ispitivanja.

Provjera oba sustava provedena je na referentnom uzorku poznatih umjetno napravljenih reflektora. Nadalje, usporedba rezultata ispitivanja provedena je na aluminotermijskom zavarenom spoju s realnom pogreškom u vratu tračnice.

### 1.1 Referentni uzorak za provjeru osjetljivosti sustava

Prije početka provođenja ispitivanja odabrani ultrazvučni ispitni sustav potrebno je odgovarajuće podešiti. S ciljem provjere podešavanja osjetljivosti ultrazvučnog sustava izrađen je referentni etalon s bočnim provrtima oznaka SDH<sub>1</sub>, SDH<sub>2</sub> i SDH<sub>3</sub> promjera 3 mm prema slici 1 [2].



**Slika 1.** Referentni uzorak i nacrt umjetno napravljenih reflektora

**Figure 1.** Reference sample and design of artificially made reflectors

### Podešavanje osjetljivosti ultrazvučnog sustava

Odabrani ultrazvučni sustav u okviru ovog istraživanja sastoji se od dva ultrazvučna uređaja Krautkramer GE USM36 i GE Mentor UT 32:128, te svaki od uređaja ima pripadajuće ultrazvučne sonde odgovarajućih karakteristika kako bi se

osiguralo prozvučavanje ispitivanog volumena tračnica [2]. Odabrani ultrazvučni sustav s pripadajućim etalonima za podešavanje i odabranom vrstom kontaktnog sredstva prikazan je u Tabeli 1.



**Tabela 1. Korištena oprema i sredstva UT i PAUT sustava**

**Table 1. Used equipment and resources of UT and PAUT systems**

Sustav	Naziv uređaja	Sonda	Etalon	Kontaktno sredstvo
UT	Krautkramer GE USM36,	MWB 45 -2 SWB 45 - 2	V2 V1	GE – ZG-F
PA-UT	GE Mentor UT 32:128,	PA-2M8E1P,	PAUT IIW block	

Za svaki odabrani ultrazvučni sustav provedena je provjera podešavanja osjetljivosti na izrađenom referentnom etalonu (slika 1). U tom smislu za svaku kombinaciju odabira ultrazvučnog uređaja i

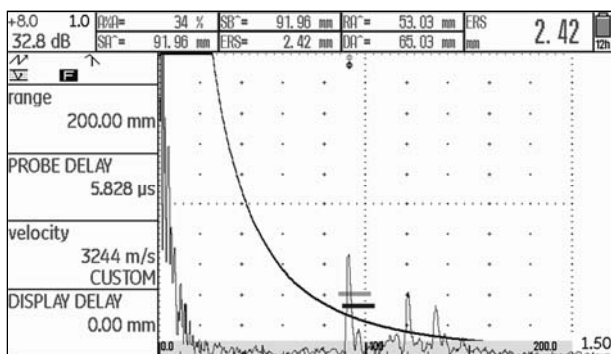
pripadajuće ultrazvučne sonde provjera osjetljivosti je provedena na ukupno tri bočna provrta oznaka SDH<sub>1</sub>, SDH<sub>2</sub> i SDH<sub>3</sub>. Rezultati podešavanja osjetljivosti nalaze se u Tabeli 2.

**Tabela 2. Prikaz provjere osjetljivosti na radnom etalonu ovisno o sustavu i referentnom mjestu**

**Table 2. Presentation of the sensitivity check on the working standard depending on the system and reference location**

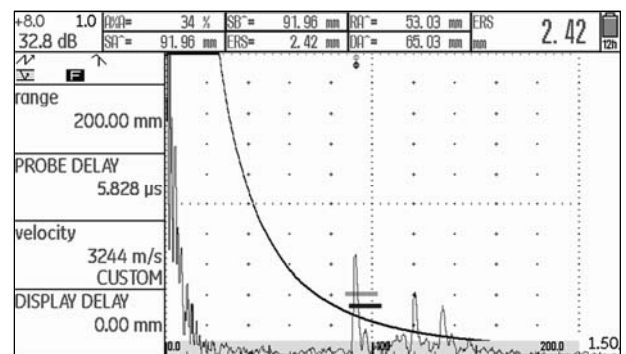
Sistem	Reflektor	Prikaz reflektora na radnom etalonu		Procjena veličine Ø mm (ERS)/dubina mm (DA)	
		MWB 45 -2	SWB 45 - 2	MWB 45 -2	SWB 45 - 2
UT	SDH1	Slika 2	Slika 5	2.42/65	3.29/66
	SDH2	Slika 3	Slika 6	2.62/86	2.81/85
	SDH3	Slika 4	Slika 7	2.37/109	2.70/106

PAUT	PA-2M8E1P		Dubina indikacije mm (DA)	
	SDH1	Slika 8	66,6	
	SDH2	Slika 9	85,8	
	SDH3	Slika 10	106,7	



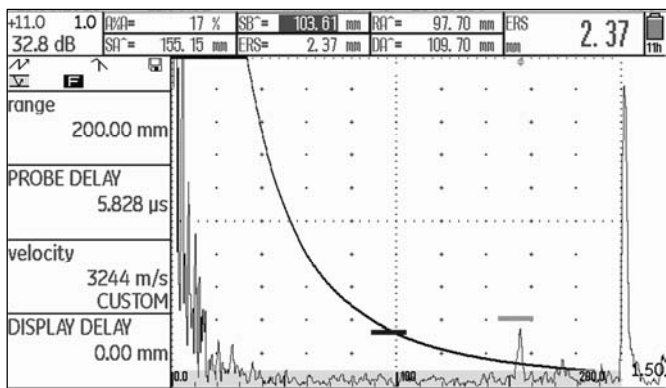
**Slika 2. Prikaz odjeka od referentnog reflektora SDH1 (MWB 45-2)**

**Figure 2. View of the echo from the reference reflector SDH1 (MWB 45-2)**



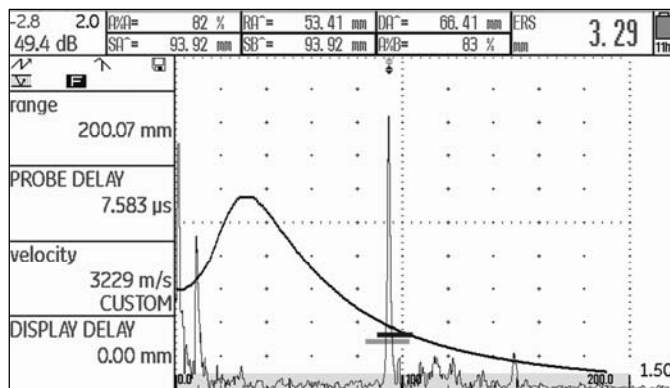
**Slika 3. Prikaz odjeka od referentnog reflektora SDH2 (MWB 45-2)**

**Figure 3. View of the echo from the reference reflector SDH2 (MWB 45-2)**



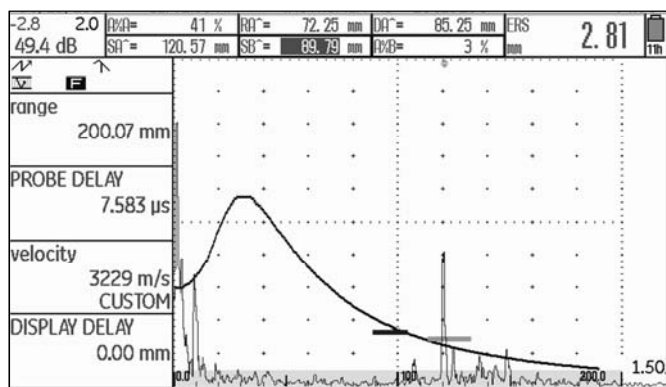
**Slika 4.** Prikaz odjeka od referentnog reflektora SDH3 (MWB 45-2)

**Figure 4.** View of the echo from the reference reflector SDH3 (MWB 45-2)



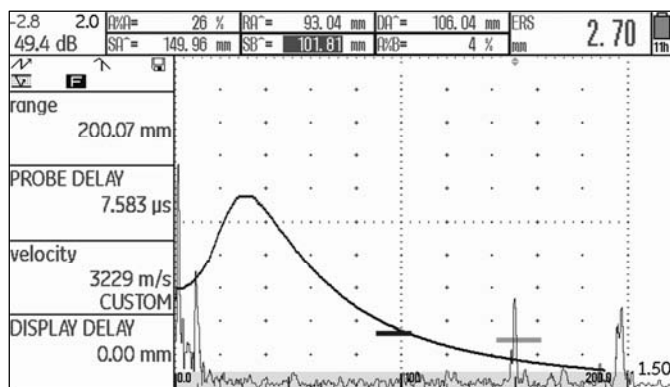
**Slika 5.** Prikaz odjeka od referentnog reflektora SDH1 (SWB 45-2)

**Figure 5.** View of the echo from the reference reflector SDH1 (SWB 45-2)



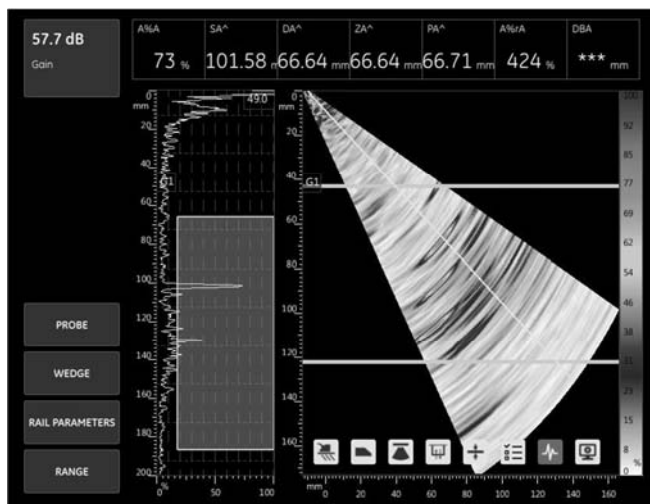
**Slika 6.** Prikaz odjeka od referentnog reflektora SDH2 (SWB 45-2)

**Figure 6.** View of the echo from the reference reflector SDH2 (SWB 45-2)



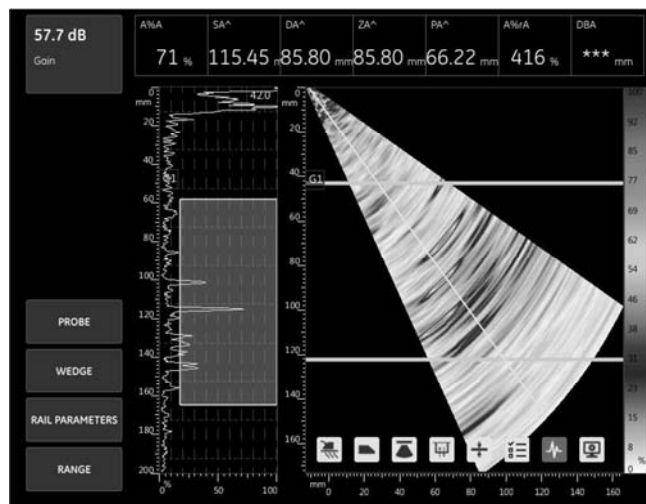
**Slika 7.** Prikaz odjeka od referentnog reflektora SDH3 (SWB 45-2)

**Figure 7.** View of the echo from the reference reflector SDH3 (SWB 45-2)



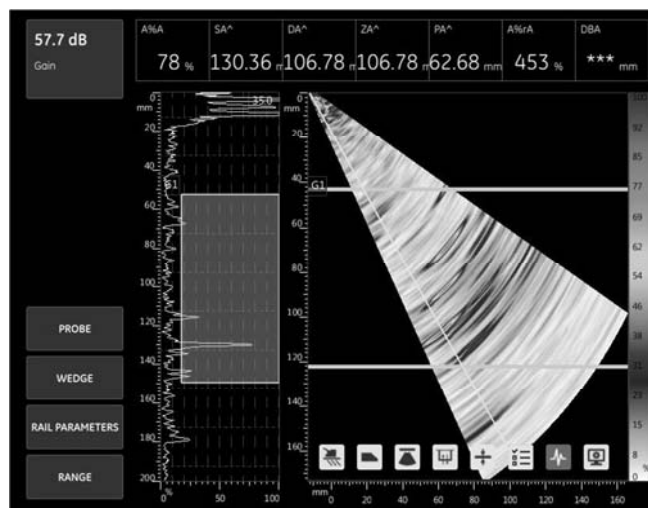
**Slika 8.** Prikaz odjeka od referentnog reflektora SDH1 (PA-2M8E1P)

**Figure 8.** View of the echo from the reference reflector SDH1 (PA-2M8E1P)



**Slika 9.** Prikaz odjeka od referentnog reflektora SDH2 (PA-2M8E1P)

**Figure 9.** View of the echo from the reference reflector SDH2 (PA-2M8E1P)



**Slika 10.** Prikaz odjeka od referentnog reflektora SDH3 (PA-2M8E1P)

**Figure 10.** View of the echo from the reference reflector SDH3 (PA-2M8E1P)

### 1.2. Zaključak provjere podešavanja osjetljivosti na referentnom etalonu

Podešavanje osjetljivosti primjenom konvencionalnog ultrazvučnog sustava (dvije ultrazvučne sonde) provedeno je prema beskonačnom reflektoru na etalonu V2 – R50 i V1-R100 te je konstruirana DGS krivulja na promjeru  $\varnothing$  1,5 mm. S ciljem provjere podešenosti osjetljivosti konstruirana je krivulja prema bočnom provrtu SDH2. Usporedbom amplitudnih odziva nisu uočene značajne razlike u procjeni veličine reflektora (ERS).

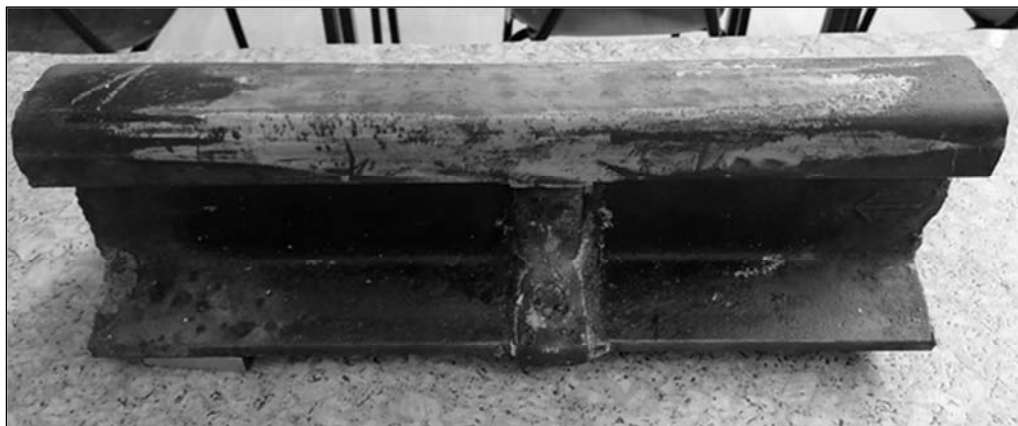
Prema dobivenim rezultatima i odjecima na A prikazu uređaja može se zaključiti da su rezultati ostvareni sa sondom SWB 45-2 za ovu vrstu tračnice i referentnih reflektora bolji u odnosu na rezultate ostvarene sa sondom MWB 45-2 kako je prikazano u Tabeli 2 [2].

Podešavanje osjetljivosti PAUT sustava provedeno je prema bočnim provrtima na referentnom uzorku SDH1, SDH2 i SDH3. U svrhu boljeg podešavanja osjetljivosti korištena je funkcija TCG-a (Time Corrected Gain), te je dobivena ujednačena osjetljivost uzimajući u obzir poziciju reflektora u vratu tračnice (Slika 8, Slika 9 i Slika 10) [1].

### 2. Referentni uzorak s nepravilnostima u vratu tračnice

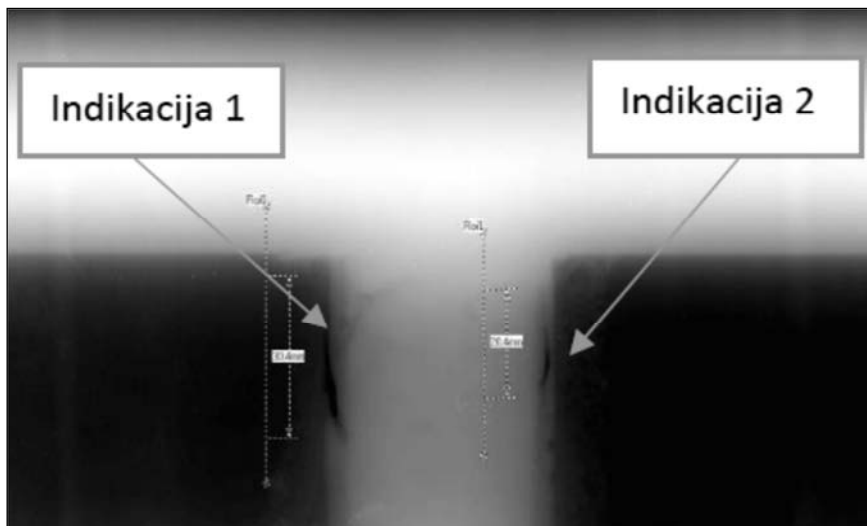
Referentni uzorak aluminotermijski zavarenih tračnica (Slika 11) ima više vrsti nepravilnosti u vratu tračnica, te je prethodno ultrazvučnom ispitivanju provedeno računalno radiografsko ispitivanje – cRT s ciljem točnijeg određivanja vrste nepravilnosti (Tabela 3).

Dobiveni odzivi od nepravilnosti primjenom UT i PAUT ultrazvučnog ispitivanja usporedit će se s onima dobivenim primjenom računalne radiografije.



**Slika 11.** Referentni uzorak tračnice

**Figure 11.** Rail reference sample



**Slika 12.** Radiogram referentnog uzorka tračnice s prikazanim vrijednostima parametara nepravilnosti  
**Figure 12.** Radiogram of the rail reference sample with the irregularity parameter values shown

**Tabela 3.** Korištena oprema i ispitni parametri cRT sistema

**Table 3.** Used equipment and test parameters of the cRT system

Metoda	Oprema	Ispitni parametri
cRT	rendgenski uređaj – Balteau 300d	veličina fokusa: 2x2,5 mm FF: 700 mm, napon: 175 kV struja: 4 mA vrijeme ekspozicije: 2,5 min
	skener – VMI 5100	napon lasera: 15 V napon fotomultiplikatora: 5,25 V rezolucija skeniranja: 50 μm
	slikovna ploča	kodak industrex flex Blue 10 x 12"

#### *Pogreške u aluminotermijskim zavarenim spojevima tračnica*

Od nepravilnosti se pri aluminotermijskom zavarivanju najčešće pojavljuju:

- Pukotine; pukotine nastaju kao posljedica vlačnih naprezanja prilikom hlađenja. To je posebno naglašeno u području metala zavara pri solidifikaciji i situaciji niskih okolišnih temperatura.
- Porozitet i plinski uključci; najčešće nastaju kao posljedica vlage u području spoja koja može doći iz nečistoća i masnoće te kondenzata u kalupu. Također, ako je dodatni materijal (porcija) kontaminiran u metalu zavara je česta pojava pora.
- Šupljine; nastaju kod skrućivanja rastaljenog materijala u kalupu posebno kada nema dovoljno

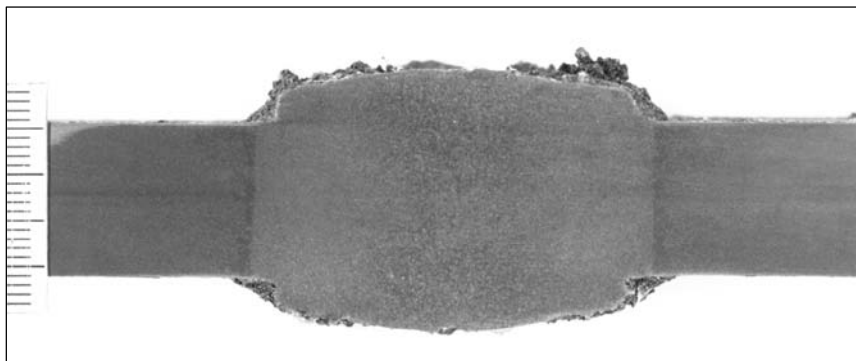
dodatnog materijala (neodgovarajuća porcija ili istjecanje kroz neodgovarajuće postavljene, zabrtvljeni ili puknuti kalup.). Prilikom solidifikacije dolazi do smanjenja volumena (fenomen skupljanja zavara) pa ako prilikom zavarivanja nije postignuto dovoljno miješanje veća je i vjerojatnost pojave šupljina.

- Naljepljivanje; nastaje kao posljedica nedovoljnog predgrijavanja osnovnog materijala ili neprilagođavanja tehnologiji niskim temperaturama okoliša. Iz tog razloga se striktno traži ovisno o gradaciji čelika postizanje i držanje temperature predgrijavanja kako bi se postiglo dobro miješanje sa stranicama žlijeba tj. osnovnim materijalom tračnice.



- Uključci; u metalu zavara mogu se pojaviti i nemetalni uključci nastali iz kontaminiranog praška u porciji ili npr. oksidni uključci nastali kao rezultat loše pripreme spojne površine te neodgovarajuće kvalitete rezanja plinskim plamenom. Također, mogu ostati i uključci od pijeska za brtvljenje.

- Nepravilna geometrija zavara na stopi, vratu i kruni tračnice; nastaju zbog lošeg postavljanja ili krive geometrije kalupa. Pri ovome je svakako važna uvježbanost i vještina operatera koji postavljaju kalup.



**Slika 13.** Prikaz makrostrukture u vratu tračnice bez nepravilnosti

**Figure 13.** View of the macrostructure in the neck of the rail without irregularities

Na slici 12. vidljiva je šupljina uz područje intenzivnog nepovezivanja rastaljenog metala i stijenke tračnice. Uzrok predmetnoj nepravilnosti može se tražiti u neodgovarajućem toku rastaljenog metala u kalup pri čemu je došlo do turbulencije

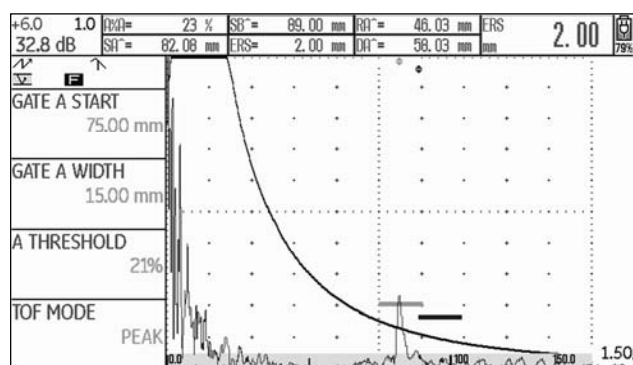
taline i neravnomjernog skrućivanja. Dodatno, ako stijenka tračnice nije dovoljno predgrijana ne dolazi do dovoljnog miješanja. Iz ove situacije dodatno se naglašava važnost adekvatne pripreme i predgrijavanja stijenke te savjesnosti i uvježbanosti operatera.

### 3. Rezultat ispitivanja referentnog uzorka tračnice

**Tabela 4.** Rezultati ispitivanja referentnog uzorka tračnice

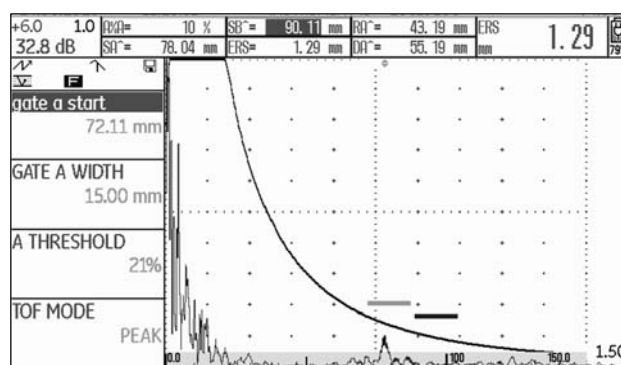
**Table 4.** Test results of the rail reference sample

Sustav	Reflektor	Prikaz reflektora na radnom etalonu		Procjena veličine (ERS)		Procjena duljine
		MWB 45 - 2	SWB 45 - 2	MWB 45 - 2	SWB 45 - 2	
UT	Nepravilnost 1	Slika 14	Slika 16	2.00	2,05	3-5 mm
	Nepravilnost 2	Slika 15	Slika 17	1.29	1.50	2-4 mm
		PA-2M8E1P				
PA-UT	Nepravilnost 1	Slika 18				21 mm
	Nepravilnost 2	Slika 19				12,6 mm



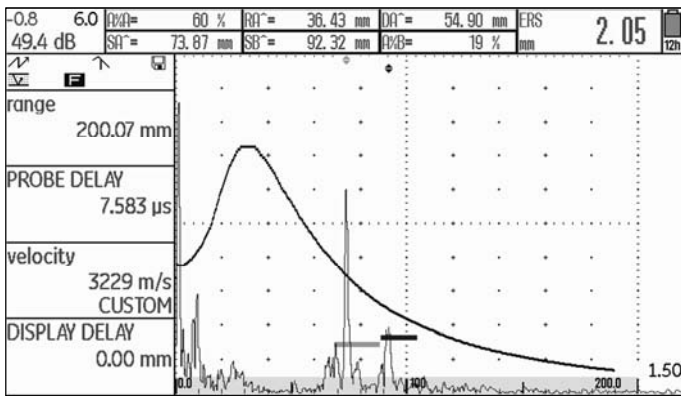
**Slika 14.** Prikaz odjeka od indikacije 1 (MWB 45-2)

**Figure 14.** View of the echo from the indication 1 (MWB 45-2)



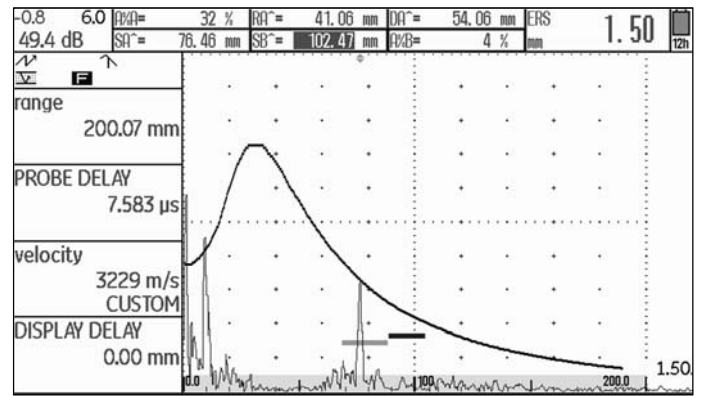
**Slika 15.** Prikaz odjeka od indikacije 2 (MWB 45-2)

**Figure 15.** View of the echo from the indication 2 (MWB 45-2)



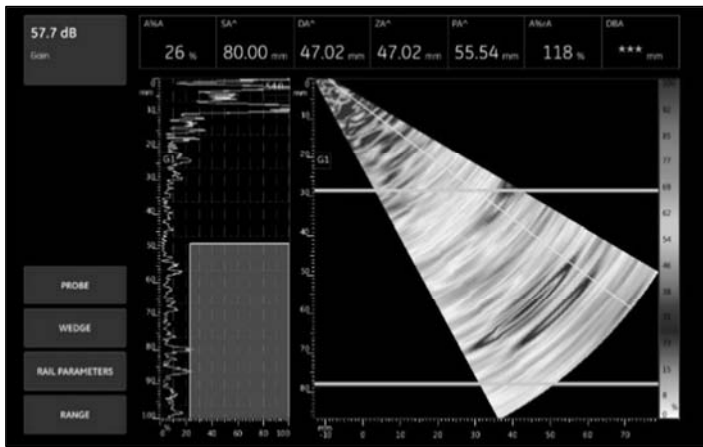
Slika 16. Prikaz odjeka od indikacije 1 (SWB 45-2)

Figure 16. View of the echo from the indication 1 (SWB 45-2)



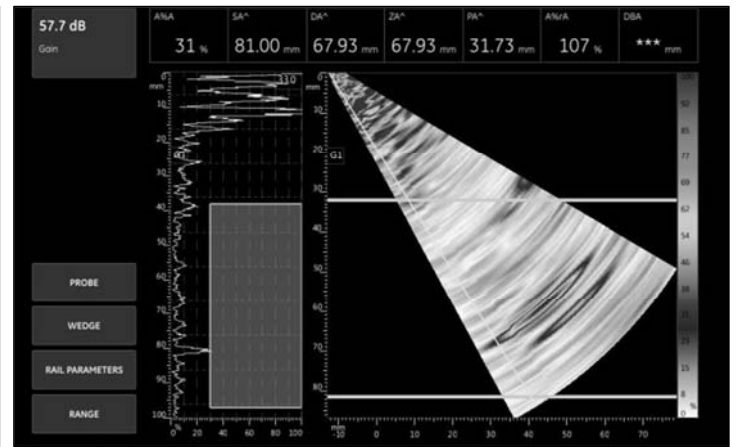
Slika 17. Prikaz odjeka od indikacije 2 (SWB 45-2)

Figure 17. View of the echo from the indication 2 (SWB 45-2)



Slika 18. Prikaz odjeka od indikacije 1 (PA-2M8E1P)

Figure 18. View of the echo from the indication 1 (PA-2M8E1P)



Slika 19. Prikaz odjeka od indikacije 2 (PA-2M8E1P)

Figure 19. View of the echo from the indication 2 (PA-2M8E1P)



#### 4. Zaključak

Uslijed eksploatacije može doći do razvoja pukotina unutar zavara tračnice te je odabir odgovarajuće metode i tehnike provedbe neraznog ispitivanja od velikog značaja.

S obzirom na ograničenja ultrazvučnih sustava prikazanih u ovom radu, rezultati ispitivanja ukazuju na prednost višepretvorničkog ultrazvučnog sustava (PAUT) u odnosu na konvencionalni sustav. Prednost spomenutog sustava posebno je vidljiv prilikom pronalaska nepovoljno orijentiranih indikacija u uskim dijelovima vrata tračnice. Prema ostvarenim rezultatima procjene veličine nepravilnosti kao i njezine uvjetne duljine primjenom konvencionalnog ultrazvučnog sustava može se zaključiti da se ne radi o značajnim nepravilnostima.

Prema spomenutom, zavareni spoj sukladno kriteriju prihvatljivosti može se ocijeniti kao prihvatljiv za daljnju uporabu u uvjetima eksploatacije. Međutim, rezultati ostvareni primjenom višepretvorničkog sustava jasno ukazuju suprotno.

#### Literatura / References

[1] HRN EN 14730-1: (2010) Željeznički sustav — Željeznički gornji ustroj — Aluminotermijsko zavarivanje tračnica — 1. dio: Odobravanje postupaka zavarivanja (EN 14730-1:2010)

[2] Jagodić N. (2022), Ispitivanje ultrazvukom aluminotermijskih zavarenih tračnica. Diplomski rad Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

#### 4. Conclusion

As a result of exploitation, cracks may develop within the rail welds, and the selection of the appropriate method and technique for non-destructive testing is of great importance.

Considering the limitations of the ultrasound systems presented in this paper, the test results indicate the advantage of the multi-transducer ultrasound system (PAUT) compared to the conventional system. The advantage of the mentioned system is especially visible when finding unfavourable oriented indications in narrow parts of the rail neck. According to the obtained results of the assessment of the size of the irregularity as well as its conditional length using a conventional ultrasound system, it can be concluded that these are not significant irregularities.

According to the aforementioned, the welded joint in accordance with the acceptance criteria can be evaluated as acceptable for further use in the conditions of exploitation. However, the results obtained using the multi-converter system clearly indicates the opposite.