Mića Đorđević [1,a], Dragan Đorđević [1], Vladimir Đorđević [1], Nenad Gačić [2], Tomaž Vuherer [3]

RELAKSACIJA ZAOSTALIH NAPONA METODOM EKSPLOZIJE

RELAXATION OF RESIDUAL TENSIONS BY THE EXPLOSION METHOD

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Jul 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Mart 2026.

Adresa autora / Author's address:

[1] Tehweld d.o.o. Loznica, Italijanskih dobrovoljaca 7, 15300 Loznica, Srbija

[2] Eniko d.o.o., Loznica, Srbija

[3] Fakultet za strojarstvo, Maribor, Slovenija

email / ORCID ID:

[a] tehweld@yahoo.com / 0009-0005-7891-1853

Ključne reči: relaksacija zaostalih napona eksplozijom, detonirajući štapin, merenje zaostalih napona

Keywords: relaxation of residual stress by explosion, detonating rod, measurement of residual stress

Rezime

U radu će biti detaljno prikazana nekonvencionalna metoda relaksacije zaostalih napona primenom energije eksplozije koja je primenjena prvi put pri izradi posuda – dekantera, dekompozera i cevovoda u fabrici za dobijanje glinice „Birač“ Zvornik. Fabrika je građena sedamdesetih godina prošlog veka. Za potrebe relaksacije zaostalih napona nakon zavarivanja u E.O.Paton AN (Akademija nauka) u saradnji sa Institutom za zavarivanje „Energoinvest“ Sarajevo, patentiran je postupak relaksacije zaostalih napona eksplozijom na zavarenim spojevima 1976. godine. Ukupna dužina zavara koja je tretirana eksplozijom bila je preko 20.000 m.

Abstract

The paper will present in detail the unconventional method of residual stress relaxation using explosion energy, which was used for the first time during the production of vessels - decanters, decomposers, and pipelines at the "Birač" alumina factory in Zvornik. The factory was built in the seventies of the last century. For the purposes of relaxation of residual stresses after welding, in E.O. Paton AN (Academy of Sciences) in cooperation with the Institute for Welding "Energoinvest" Sarajevo, a procedure for relaxation of residual stresses by explosion on welded joints was patented in 1976. The total length of the weld, which was treated with an explosion, was over 20.000 m.

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

1. Uvod

Energija eksplozije je najviše primenjena pri spajanju raznorodnih metala. Našla je i primenu pri oblikovanju elemenata, presovanju, rezanju, a pokazalo se i da je odlična za relaksaciju zaostalih napona nakon zavarivanja i izradu velikih objekata.

Opšte je poznato da su u procesu zavarivanja neizbežne pojave deformacija i zaostalih napona, veličine jedna drugoj suprotne, gde važi pravilo: što su veće deformacije, manji su zaostali naponi i obrnuto, što su veći naponi, manje su deformacije. Na tehnolozima zavarivanja ostaje odgovornost da pronađu kompromis između pomenutih. U praksi se uspešno sprovodi relaksacija zaostalih napona primenom **termičke obrade i mehaničkih metoda** (vibracija). Pri izgradnji fabrike glinice „Birač“ Zvornik, prvi put je primenjen nekonvencionalni postupak relaksacije zaostalih napona od zavarivanja primenom **energije eksplozije**. Prilikom izrade velikih posuda, spajaju se odgovarajuće table lima od ugljeničnog čelika nekim od postupaka zavarivanja topljenjem. Tom prilikom, zavarivano mesto je uklješteno i okruženo velikom masom hladnog lima, što dovodi do znatne pojave zaostalih napona. U samom zavaru su naponi zatezanja, a u ZUT-u naponi pritiska. Unosom određene energije, toplotne ili mehaničke, u područje sa povišenim zaostalim naponima, elastični naponi prelaze u plastične deformacije, a to rezultira smanjenjem ukupnog naponskog stanja u zavarenom spoju.

Tretiranje zavara eksplozijom ima analogiju u relaksaciji uplivom toplote. U oba slučaja vrši se širenje materijala, što dovodi do delimičnog prelaska elastičnih napona u plastično stanje. Zagrevanjem opadaju mehaničke osobine čelika, smanjuje se nivo granice razvlačenja, pa naprezanja koja su u materijalu nadvladavaju čvrstoću materijala i izazivaju pomeranje kristala u pravcu dejstva napona, što dovodi do smanjenja zaostalih napona.

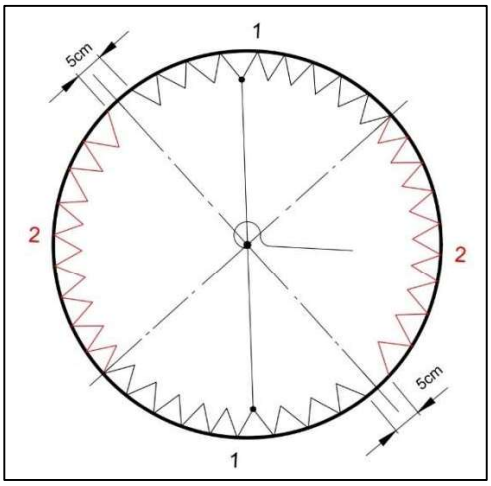
Relaksacija napona termičkom obradom je sporiji i skuplji, ali i kvalitetniji postupak. Relaksacija eksplozijom je mnogo brži i jeftiniji postupak. Karakteristično je za oba slučaja da se postižu bolja mehanička svojstva i eliminiše mogućnost tehnogene havarije usled pojave naponske korozije, što je posebno izraženo u posudama sa agresivnim medijima. Primenjena tehnologija relaksacije napona eksplozijom je uspešno dokazana u praksi tokom višegodišnje eksploatacije.

2. Eksperimentalni deo

Oko šava, zavarenog mesta (područja koja su izložena višim temperaturama od 300-400 °C u unutrašnjosti lima), postavlja se detonirajući štapin u određenoj konfiguraciji slomljene linije koja podseća na sinusoidu. Cilj je da se odredi amplituda, korak i količina eksploziva za određenu vrstu i debljinu materijala uz kontrolu drugih parametara, kao što su vlaga, temperatura, konfiguracija, pozicija (položaj), upetost konstrukcije itd.

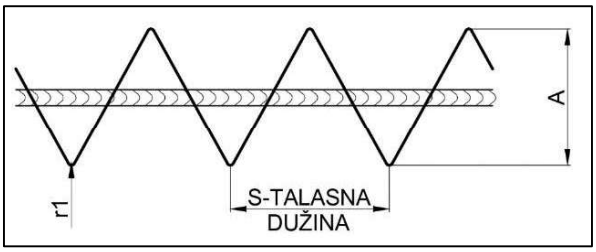
Prilikom istraživanja efekta eksplozije u laboratoriji, u baznu sredinu (NaOH) su potapane zavarene čelične ploče koje su tretirane i koje nisu tretirane eksplozivom. Netretirane ploče su već posle nekoliko sati doživljavale razaranje zavara uz prasak, usled superponiranja zaostalog naponskog stanja nakon zavarivanja i naponske korozije koju je izazvao agresivni medij.

Tretiranje eksplozivom se obavlja sa unutrašnje strane posude nakon završenog zavarivanja, predviđene kontrole i prijema zavarenih pozicija. Nakon relaksacije eksplozijom, više se ne vrši nikakvo zavarivanje, a ako je neophodno dodatno zavarivanje, to mesto se ponovo tretira eksplozijom. U svakom slučaju, treba nastojati da je što manje takvih mesta. Posle relaksacije vrši se merenje zaostalih napona ultrazvukom. Istovremeno se detoniraju dve dijametralno suprotne strane, kao na Slici 1. Na Slici 2 je prikazan detalj postavljenog eksploziva sa Slike 1.



Slika 1. *Šema postavljanja eksploziva (DŠ).*

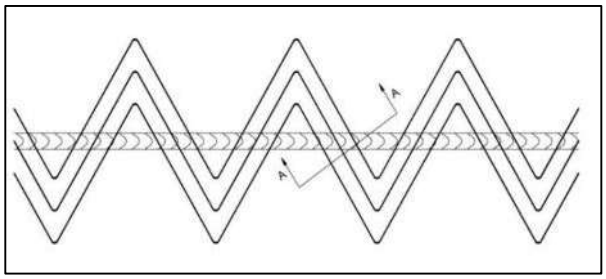
Figure 1. *Explosive placement scheme (DŠ).*



Slika 2. *Detalj postavljenog eksploziva.*

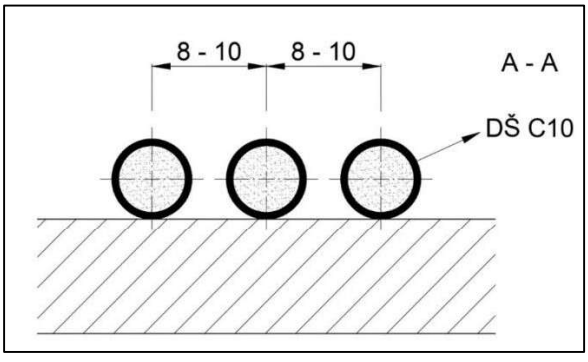
Figure 2. *Detail of the placed explosive.*

Maksimalna količina eksploziva koja istovremeno eksplodira ne sme da pređe 2 kg. Ako je potrebna veća količina eksplozivnog naboja, onda se detonirajući štapini postavljaju paralelno u određenoj konfiguraciji prema niže navedenoj šemi (Slika 3).



Slika 3. *Šema postavljanja eksploziva (tri DŠ).*

Figure 3. *Explosive placement scheme (three DŠ).*

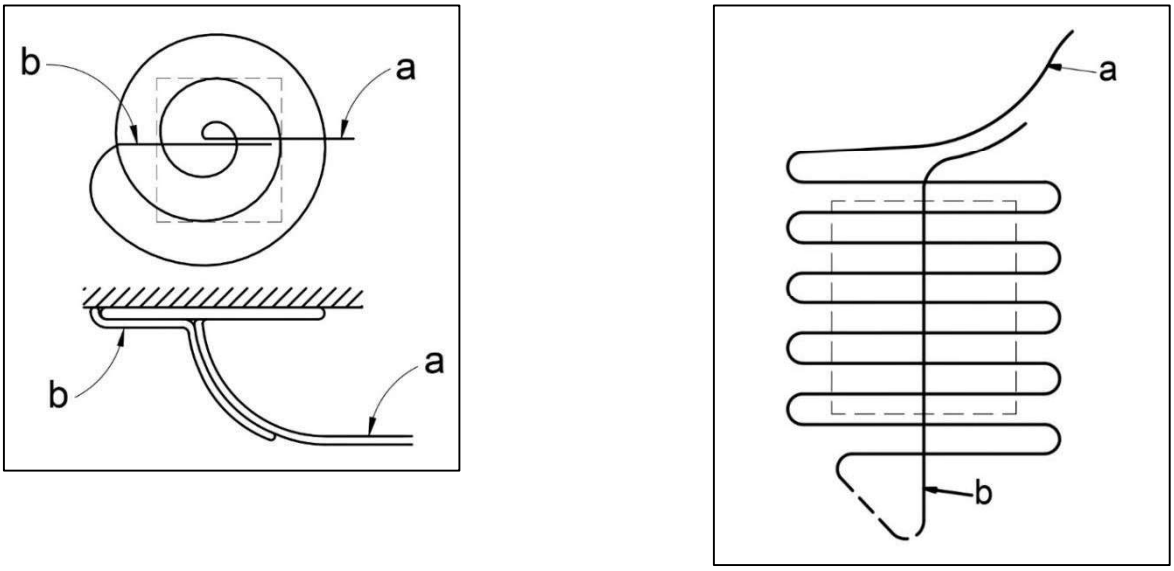


Slika 4. *Presek A-A sa Slike 3.*

Figure 4. *Section A–A from Figure 3.*

2.1. Način relaksacije zaostalih napona na mestima naknadnog zavarivanja (posle izvršene opšte relaksacije i prijema objekta)

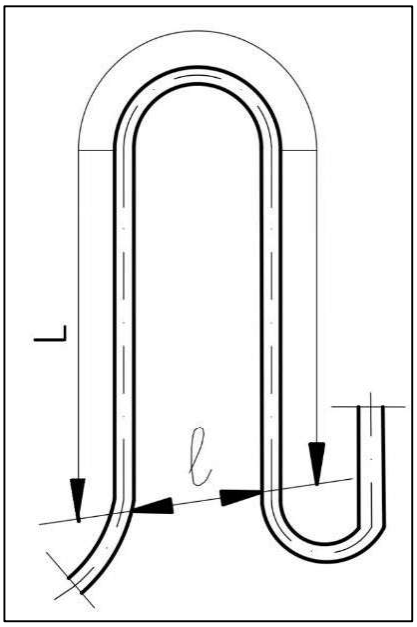
U zoni oko šavova gde su izvedena lokalna zavarivanja treba primeniti konfiguraciju spirala koja obuhvata zone termičkog uticaja, a to su zone koje su dostigle više od 300-400 °C u unutrašnjem sloju metala (Slika 5).



Slika 5. *Konfiguracija detonirajućeg štapina za relaksaciju lokalnih zavarenih spojeva.*

Figure 5*. Detonating-cord configuration for local welded-joint relaxation.*

Uslov za neprekidan prenos detonacije je korelacija (uzajamni odnos) L/l < 4 – 5 (Slika 6). Ako je odnos L/l > 5, onda je nepohodna primena provodnika detonacije. Detonirajući štapin je namotan na kalem i može da se koristi u većoj dužini.



Slika 6. *Detalj postavljanja DŠ.*

Figure 6. *Detail of detonating-cord placement.*

Priprema štapina se vrši u priručnom magacinu na gradilištu. Priprema se sastoji u obrazovanju lomljene linije koja se lepi na neki flaster, samolepivu traku ili se tako pripremljeni detonirajući

štapin lepi direktno na šav koji je pre nanošenja lepka očišćen od nečistoća (korozija, masnoća, prljavština).

Eksplozivom mogu da rade obučeni radnici koji su završili specijalni kurs ili lice koje ima rudarsko-tehničko obrazovanje.

U ovom radu nisu data uputstva za siguran i bezbedan rad sa eksplozivom.

Dekompenzatori i dekanteri su bili cilindrični sudovi prečnika 10 m i visine 33 m. Zapremina je iznosila V = 2150 m^3. Osnovni materijal je bio čelik Č.0462 (355) i Č1212 (preko 40 kom). Vertikalni zavari posuda pri ukrupnjavanju su zavarivani automatskim postupkom „VERTOMATIK".

Horizontalni pojasevi su rađeni „CIRKOMATIK" postupkom (zavarivanje pod praškom).

Debljine limova koji su zavarivani bile su u rasponu od 6 do 22 mm.

Kao eksplozivno sredstvo upotrebljavaju se detonirajući štapini (DŠ).

- tip detonirajućeg štapina.....npr. PENTRIT,
- brzina detonacije.....6,5 km/s,
- omotač štapina.....polivinil hlorid,
- težina dužinskog metra DŠ.....10, 12, 15, 20 i 25 g/m,
- gipkost DŠ.....do -25 °C,
- otporan na vlagu,
- detoniranje se vrši rudarskom kapislom br. 8 električnim putem.

2.2. Plan izvođenja relaksacije

Prvo se relaksiraju vertikale i to u montažnom položaju, na stendu, gde se vrši ukrupnjavanje tabli. Nakon tretiranja eksplozivom ukrupnjeni pojas se postavlja na mesto izrade posude koja se gradi.

Montirana dva plašta se spajaju horizontalnim zavarom i tek posle predviđenih kontrola varova, pristupa se relaksaciji zaostalih napona eksplozijom.

2.3. Određivanje parametara

2.3.1. Izračunavanje osnovnih veličina

Osnovne veličine za određivanje količine i konfiguracije eksploziva, DŠ za debljinu čelika lima 0,8 cm:

- A – amplituda izlomljene linije
- S – talasna dužina izlomljene linije koju čini DŠ
- n – linearni broj DŠ

Za A se usvaja vrednost *A* = 8 cm. Područje zone unutrašnje temperature lima od 300-400°C. Iz formule za koeficijent rashoda DŠ koji je dobijen eksperimentalnim putem, može se izračunati talasna dužina *S*.

$k_r = 0{,}5+\frac{2A}{S}$, k_r – koeficijent rashoda detonirajućeg štapina (DŠ)

k_r za čelični lim δ = 8 mm je 1,83.

S = 11,86 cm

Usvaja se S = 12cm.

Talasnu dužinu S moguće je izračunati i putem formule:

$S = \frac{2K}{\beta\varepsilon_t} \cdot \frac{q_o}{\delta_1}\ [cm]$

gde su:

K – koeficijent OM (osnovnog materijala) i eksplozivne materije

$K = \frac{\alpha\sqrt{2Q_0}}{\gamma_1 C_0}$

α – koeficijent odraza $1 \le \alpha \le 2$

Q_0 – specifični energetski kapacitet (1400 kkal/kg)

γ_1 – specifična težina čelika

C_0 – brzina zvuka u čeliku

$K \approx 0{,}175\ \frac{cm^3}{g}$.

$\beta = (0{,}7 \div 1{,}5)\frac{cm^3}{g}$ – parametar spoljašnjeg opterećenja

$\varepsilon_t\ \left[\frac{1}{cm}\right]$ – varijabilni koeficijent – zavisi od dužine koja se relaksira

$q_o\ [cm]$ – dužina DŠ

$\delta_1\ [cm]$ – debljina vara zavarenog spoja: $\delta_1 = 1{,}2cm$

$\delta\ [mm]$ – 8 debljina osnovnog materijala (lima)

$n_h = 0{,}1\delta+0{,}2$ – broj niti det.štap.za horizontalne šavove

n_v = 0,25δ-1 – broj niti det.štap.za vertikalne šavove

Prikazani račun za A i S važi za DŠ C10. Primenom DŠ C15 bilo bi S = 20 cm.

2.3.2. Izračunavanje linijskog opterećenja Δσ koje ostvaruje dejstvo eksplozije DŠ C10

$\Delta\sigma = \frac{Q_0}{PK_r\delta} m_0$ – linearno opterećenje

$Q_0 = 0{,}42\frac{Ncm}{g}$ – energetski kapacitet

$P = 20 \div 50$ – koeficijent linearnog naboja (manji iznos P odnosi se na veći broj niti DŠ)

$K_r = 0{,}5 + \frac{2A}{S} = 0{,}5 + \frac{2\cdot 8}{12} = 1{,}83$ – koeficijent rashoda DŠ

$\delta = 0{,}8\ cm$ – debljina osnovnog materijala

$m_0 = \frac{2L}{S} \cdot q_0$ – parametar dužinskog kačanja

L = r A – r < 1 – radijus loma spirale DŠ

A = 8 cm - amplituda DŠ

L = 1·8 = 8 cm

$q_0 = K_r$ C10

C10 – DŠ sa 10g eksploziva po 1m

q_0 = 1,83·10g/m = 18,3g/m

$m_0 = \frac{2\cdot 8}{12} \cdot 0{,}183\ \frac{g}{cm} = 0{,}244\ \frac{g}{cm}$

$$\Delta\sigma = \frac{0{,}42\frac{Ncm}{g} \cdot 0{,}244\frac{g}{cm}}{50 \cdot 1{,}83 \cdot 0{,}8cm}$$

$$\Delta\sigma = \frac{0{,}1N}{73{,}2\ cm} = 0{,}014\frac{N}{cm} = 1{,}4 \cdot 10^{-4}\frac{N}{mm}$$

3. Rezultati i diskusija

3.1. Merenje zaostalih napona

Za potrebe relaksacije i merenja naponskog stanja zavarene su dve ploče dimenzija 2000 mm x 8 mm x 500 mm. Osnovni materijal od koga su ploče izrađene je bio čelik S355. Zavarivanje je izvršeno REL-postupkom (111). Dodatni materijal je bila bazična elektroda EVB 50 prečnika Ø 3 mm i dužine 25 cm.

Zavar je tretiran eksplozijom koju je izazvao detonirajući štapin (DŠ C10), postavljen po varu u određenoj konfiguraciji koja je prethodno izračunata.



Slika 7. *Postavljanje DŠ na ploču.*

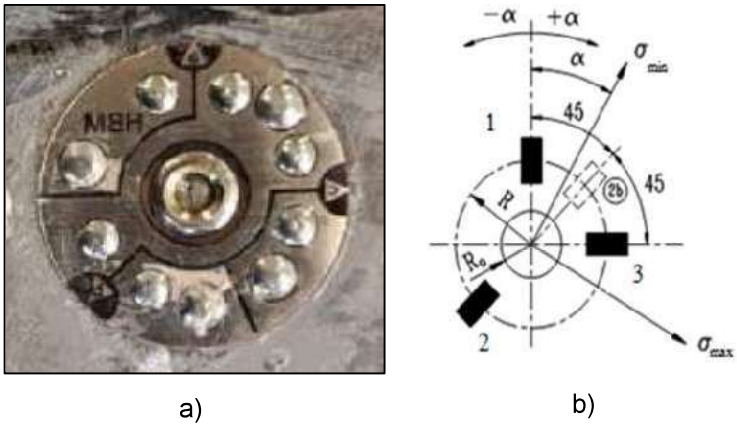
Figure 7. *Placement of the detonating cord on the plate.*

Nakon dejstva eksplozije pristupilo se merenju zaostalih napona metodom zabušivanja rupa i metodom MPM (magnetno pamćenje metala). Merenja su obavljena u ZUT-u.

3.1.1. Merenje naponskog stanja metodom zabušivanja rupa

Metoda merenja zaostalih napona sa zabušivanjem rupe je standardizovana po ASTM

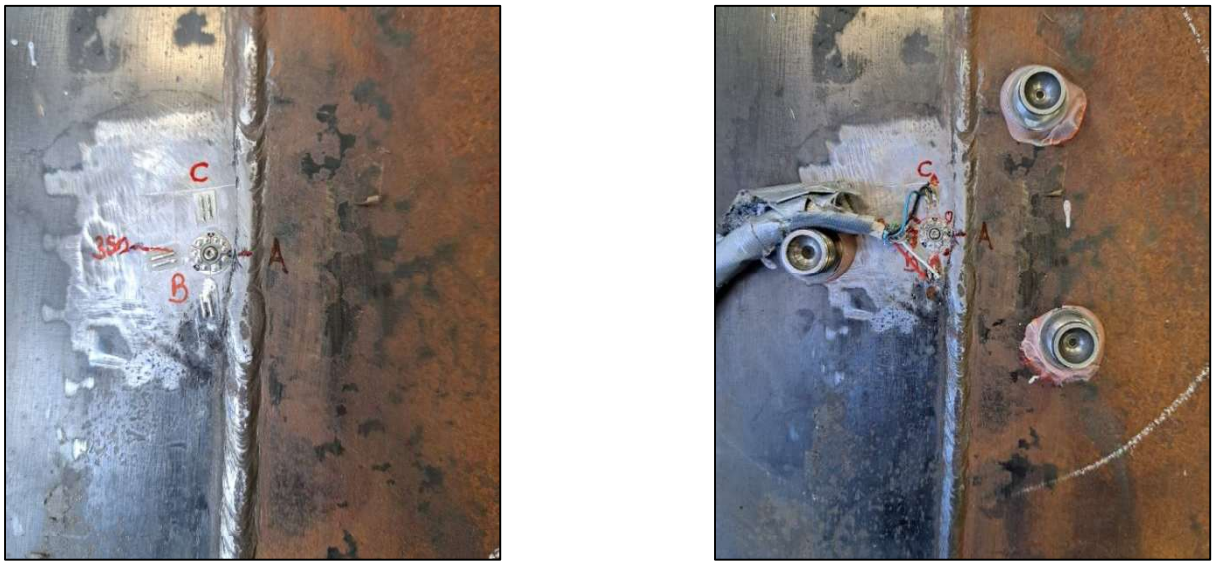
E837 (Slika 8). Prilikom merenja zalepi se merna rozeta, koja se sastoji od 3 merne trake pod uglovima 0°, 90° i 225° ili 0°, 45° i 90°, zavisi od konfiguracije merne rozete. Kod merenja, bila je upotrebljena merna rozeta sa mernim trakama pod uglovima 0°, 90° i 225°. Merne trake su na slici označene sa 1, 2 i 3 (A, B, C). Rezultat mjerenja su glavni naponi S_{min} i S_{max}, koji su takođe označeni na Slici 8b. Za merenje je bila upotrebljena Hottingrova 120-omska merna rozeta RY61 sa mernom površinom pojedine merne trake u rozeti 1,5 x 0,8 mm. Mesto merenja je bilo na sredini zavarenog spoja na ploči dimenzija 1500 mm x 8 mm x 500 mm. Lokacija merenja zaostalih napona bila je u zoni uticaja toplote (ZUT), pored metala šava na sredini zavarene ploče (Slika 9).



a) b)

Slika 8. *Zalepljena merna rozeta RY61 i prikaz merenja sa zabušivanjem rupa.*

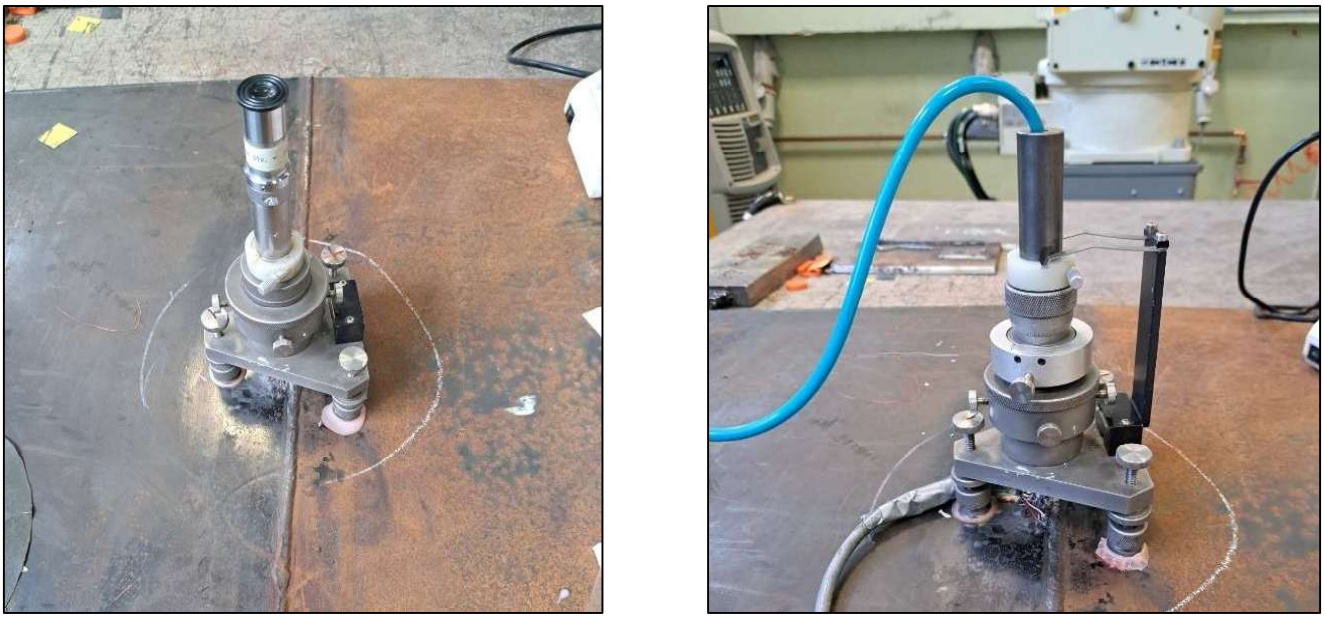
Figure 8. *Bonded RY61 strain-gage rosette and measurement by the hole-drilling method.*



a) b)

Slika 9. *(a) Mesto merenja zaostalih napona zabušivanjem rupe na sredini zavarene ploče u ZUT-u i (b) orijentacija zalepljene merne rozete i ožičavanje merne rozete.*

Figure 9. *(a) Measurement location for residual stresses by the hole-drilling method at the center of the welded plate in the HAZ and (b) orientation of the bonded strain-gage rosette and rosette wiring.*



a) b)

Slika 10. *Pojedine faze merenja zaostalih napona sa metodom zabušivanja rupe, centriranje postolja i merne rozete sa mikroskopom (a) i zabušivanje rupe (b). Uređaj za zabušivanje rupice – VISHAY RS 200.*

Figure 10. *Individual stages of residual-stress measurement by the hole-drilling method: centering of the support and strain-gage rosette using a microscope (a) and hole drilling (b). Hole-drilling device: VISHAY RS 200.*

U svakoj mernoj traci u mernoj rozeti se mere deformacije $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ *i* ε_3 prilikom zabušivanja rupice, što se vrši postepeno sa korakom po 0,1 mm od 0 do 2 mm.

$$\sigma_{max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B}\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}$$

$$\sigma_{min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B}\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

gde su ε_1, ε_2 i ε_3 - deformacije u pojedinim mernim trakama u mernoj rozeti, *A i B* - kalibracijski koeficijenti koji zavise od modula elastičnosti, Poisson-ovog broja, tipa merne rozete, promera izbušene rupe i dubine izbušene rupe, α - pravac glavnih zaostalih napona i σ_{max} *i* σ_{mim} – glavni zaostali naponi.

Uzdužne poprečne komponente zaostalih napona i komponente napona na smicanje može da se izračuna korišćenjem Mohreve teorije (Tabela 1).

$$\sigma_{longitudinal} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} + \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}\cos\alpha$$

$$\sigma_{transversal} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} - \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}\cos\alpha$$

$$\tau = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}\sin\alpha$$

gde su $\sigma_{longitudinal}$ – uzdužna komponenta zaostalih napona uzduž zavarenog spoja, $\sigma_{transversal}$ – poprečna komponenta zaostalih napona poprečno na zavareni spoj i τ – komponenta zaostalih napona na smicanje.

Tabela 1. *Automatska obrada podataka nakon merenja naponskog stanja.*

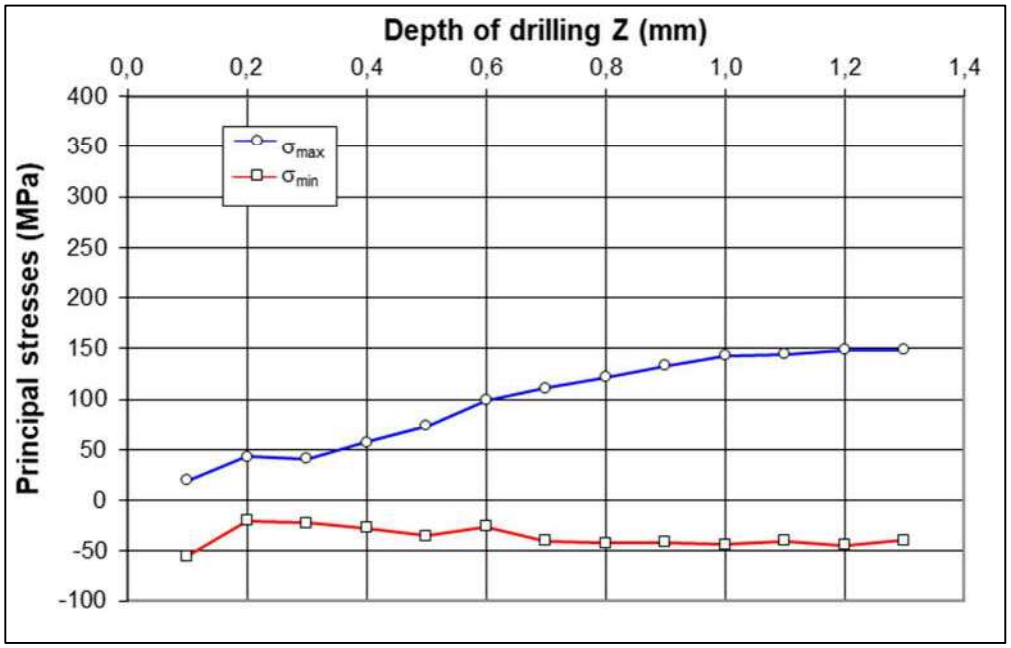
Table 1. *Automatic data processing after measurement of the stress state.*

Specimen: T - weld - DARC
Measurement: M1
$R_{p0,2}$: 355 (MPa)

Data:
Diametre of the rosete (D): 5,13 (mm)
Diametre of the hole (Do): 1,60 (mm)
Poisson ratio (ν): 0,30 (-)
Young modulus (E): 210000 (MPa)
Do/D 0,3119 (-)

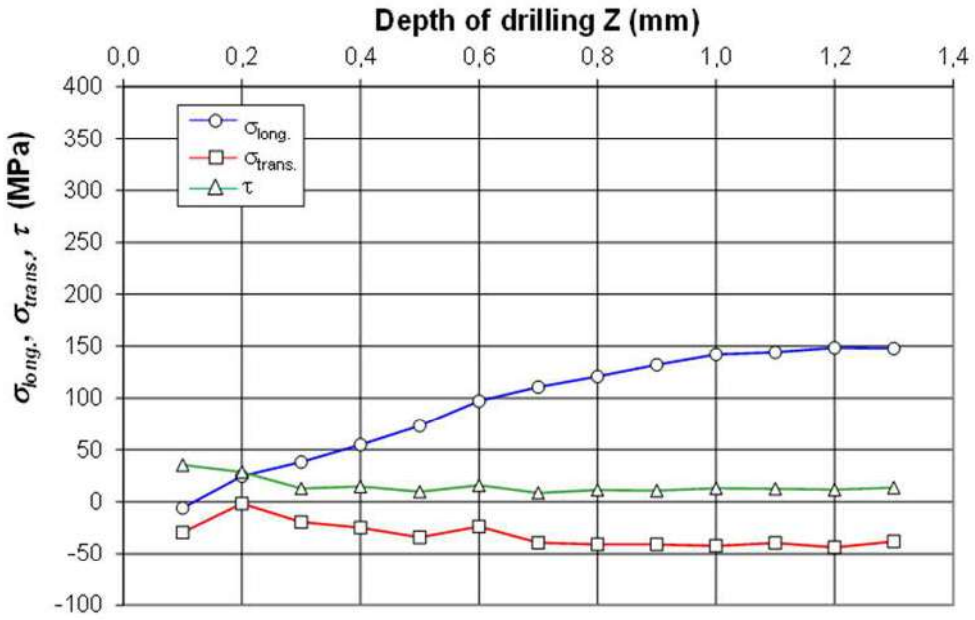
Depth	Deformation			Angle	Principal stesses		Transv, long. and shear stress		
Z	ε1	ε2	ε3	α	σ_{min}	σ_{max}	$\sigma_{transversal}$	$\sigma_{longitudinal}$	τ
(mm)	(μm)	(μm)	(μm)	(°)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0	4	2	-35,8	-54,7	19,7	-29,3	-5,8	35,3
0,2	-4	4	1	-32,8	-20,0	42,9	-1,6	24,5	28,6
0,3	-11	2	7	-12,0	-22,1	40,8	-19,4	38,1	12,8
0,4	-22	2	13	-10,2	-27,4	57,3	-24,7	54,7	14,7
0,5	-38	-2	23	-5,1	-34,9	73,9	-34,0	73,1	9,7
0,6	-59	-6	25	-7,3	-25,6	99,3	-23,6	97,2	15,8
0,7	-80	-12	42	-3,3	-39,7	111,3	-39,2	110,8	8,6
0,8	-98	-13	51	-4,0	-41,8	121,6	-41,0	120,8	11,4
0,9	-117	-18	59	-3,6	-41,5	132,8	-40,9	132,2	10,8
1,0	-135	-19	68	-4,1	-43,2	143,1	-42,3	142,1	13,2
1,1	-144	-22	71	-3,8	-40,2	144,8	-39,3	144,0	12,4
1,2	-156	-23	81	-3,5	-44,5	148,9	-43,8	148,2	11,7
1,3	-161	-23	80	-4,1	-39,0	148,7	-38,0	147,7	13,5
1,4	-167	-24	91	-3,1	-45,3	145,5	-44,7	145,0	10,3
1,5	-174	-25	94	-3,2	-43,3	146,2	-42,8	145,6	10,5
1,6	-180	-25	101	-2,9	-45,6	144,6	-45,1	144,1	9,8
2,0	-196	-78	108	6,3	-39,5	139,9	-37,4	137,8	-19,6

U nastavku su dati dijagrami glavnih zaostalih napona u izmerenom mernom mestu u zavisnosti od dubine bušenja (Slika 11) i uzdužne, poprečne komponente zaostalih napona, kao i komponente zaostalih napona na smicanja (Slika 12).



Slika 11. *Glavni zaostali naponi.*

Figure 11. *Principal residual stresses*



Slika 12. *Uzdužne i poprečne komponente zaostalih napona i komponete zaostalih napona na smicanje.*

Figure 12. *Longitudinal and transverse residual-stress components and residual shear-stress components.*

Maksimalna izmerena uzdužna komponenta relaksiranih napona je σ_{max}=150 MPa, a u poprečnom pravcu skoro -50 MPa.



Slika 13. *Način merenja zaostalih napona.*

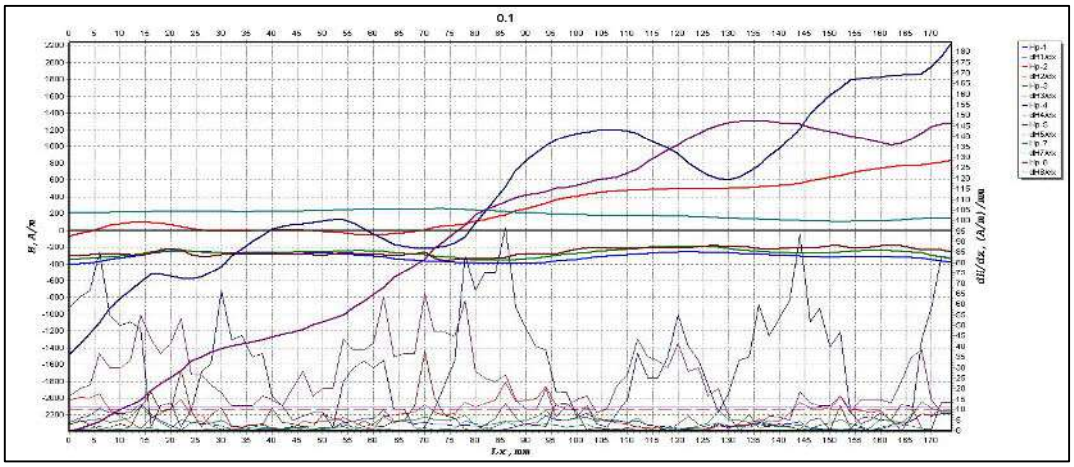
Figure 13. *Residual-stress measurement method.*

3.1.2. Merenje naponskog stanja metodom MPM

Metodom MPM izvršeno je uporedno merenje zaostalih napona (Slika 13) pre (Slika 14, Tabela 2) i posle (Slika 15, Tabela 3) dejstva eksplozije, K_{gr1} i K_{gr2}, respektivno, gde je K_{gr} – granična vrednost gradijenta.

Principi MPM metode. Mehanički naponi izazivaju magnetnu anizotropiju koja se po pravcu podudara sa vektorom maksimalnog momenta. Uticaj opterećenja na izmenu namagnetisanosti poznat je kao MAGNETOMEHANIČKI EFEKAT. Magnetomehanički efekat se pojavljuje u uslovima kada je energija deformacije viša od energije magnetnog polja Zemlje. Ovaj efekat je prikazan formulom:

$$m = \frac{K_{gr}}{K_{sr}} = \left[\frac{\sigma_v}{\sigma_{0,2}}\right]^2$$



Slika 14. *Magnetogram pre relaksacije.*

Figure 14. *Magnetogram before relaxation.*

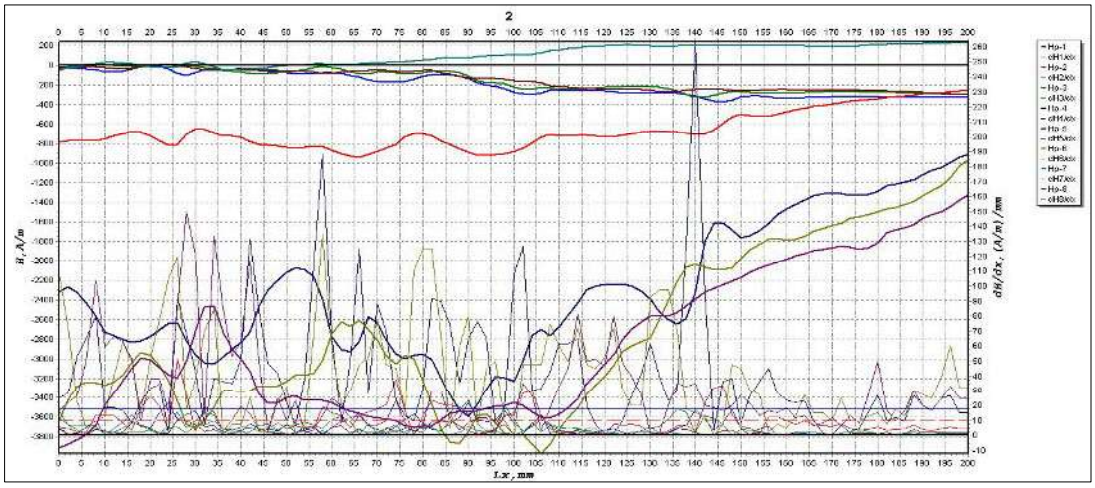
Tabela 2. *Automatska obrada podataka pre relaksacije.*

Table 2. *Automatic data processing before relaxation.*

Analysis of the file "0 1.mms" on all length.

Gradient H
Maximum value of gradient H on the segment : K(x,z)max = **608.261**
Point coordinates with maximum value of gradient H : X = **71.0** Z = **100.0**
Medium value of gradient H on the segment : K(x,z)med = **62.414**
Coefficient of a limit metal state : m = **9.746**

Channel Name	H min	H max	H med	S(H)	K med	K max	m max	S(K)
Hp-1	-400.6	-240.9	-311.2	53995.9	3.518	12.813	3.642	607.2
Hp-2	-65.6	837.3	287.7	51502.4	7.244	23.188	3.201	1250.4
Hp-3	-353.1	-184.1	-264.6	45900.4	3.989	13.813	3.462	689.3
Hp-4	-1476.5	2236.4	479.1	139328.3	33.479	96.625	2.886	5750.6
Hp-5	-358.9	-169.9	-249.2	43297.8	5.518	37.625	6.819	954.9
Hp-6	-2485.0	2335.0	340.9	247703.3	79.176	490.000	6.189	13815.0
Hp-7	109.5	257.6	194.8	33925.8	1.434	5.438	3.792	251.9
Hp-8	-2399.8	1313.1	-74.7	186741.5	24.371	65.000	2.667	4264.4



Slika 15. Magnetogram nakon relaksacije.

Figure 15. Magnetogram after relaxation.

Tabela 3. *Automatska obrada podataka nakon relaksacije.*

Table 3. *Automatic data processing after relaxation.*

Analysis of the file "2.mms" on the segment from 0 mm to 200 mm.

Gradient H
Maximum value of gradient H on the segment : K(x,z)max = **291.043**
Point coordinates with maximum value of gradient H : X = **107.0** Z = **110.0**
Medium value of gradient H on the segment : K(x,z)med = **105.553**
Coefficient of a limit metal state : m = **2.757**

Channel Name	H min	H max	H med	S(H)	K med	K max	m max	S(K)
Hp-1	-372.3	-0.9	-198.6	39767.6	5.225	22.125	4.234	1050.8
Hp-2	-938.0	-250.5	-664.8	133252.4	10.340	51.375	4.968	2078.8
Hp-3	-329.4	11.4	-160.8	32232.7	4.621	23.813	5.153	917.7
Hp-4	-3592.9	-909.9	-2303.0	461979.6	42.571	263.313	6.185	8559.4
Hp-5	-297.0	10.4	-151.5	30387.9	2.884	13.813	4.789	576.4
Hp-6	-3970.0	-965.0	-2744.3	549735.0	40.149	135.000	3.363	7970.0
Hp-7	-50.4	235.9	105.1	22527.4	3.077	15.625	5.078	607.4
Hp-8	-3909.5	-1326.5	-2855.8	571642.3	30.262	150.000	4.957	6071.4

Na Slikama 14 i 15, kao i Tabelama 2 i 3, važi sledeće:

m – dijagnostički parametar magneto-mehaničkog efekta

K_{gr} – granična vrednost gradijenta (Ako je K_{gr} približno jednako K_{max} – maksimalna vrednost gradijenata, onda se ispitivani predmet nalazi pred havarijom)

K_{sr} – srednja vrednost gradijenata u datom segmentu kontrole

σ_v – prekidna čvrstoća

$K_{gr} = m\ K_{sr}$

K_{sr} se očitava iz analize snimljenih magnetograma, a takođe i vrednosti **m**. Obe vrednosti se daju kroz automatsku obradu podataka.

K_{1sr} = 62,414 [A/m/mm] (pre relaksacije)

K_{2sr} = 105,55 [A/m/mm] (nakon relaksacije)

m_1 = 9,746

m_2 = 2,757

$K_{gr1} = m_1 \cdot K_{1sr} = 9{,}746 \cdot 62{,}414 = 608{,}35$ [A/m/mm], pre relaksacije

$K_{gr2} = m_2 \cdot K_{2sr} = 2{,}757 \cdot 105{,}55 = 291$ [A/m/mm], posle relaksacije

Zaostali naponi su se smanjili za 608,35/291 = 2,09 puta ili ako je početna vrednost σ_{02} za datu marku čelika 355MPa, onda su relaksirani zaostali naponi jednaki 355/2,09 = 169,86 MPa.

Uporednim merenjem se dokazalo da se izmerene vrednosti približno podudaraju.

Kvalitetnom relaksacijom zaostali naponi ne bi trebalo da pređu vrednost od 60MPa i to se u praksi dokazalo pri relaksaciji posuda (merenja su obavljana ultrazvučnom metodom prema odgovarajućoj šemi merenja).

Razlog kvalitetnije relaksacije na objektu je zbog dejstva eksplozije u zatvorenoj konstrukciji posude jer u tim uslovima eksplozija izaziva odgovarajuće vibracije koje se prostiru duž celog zavarenog spoja i te vibracije čine da se zaostali naponi znatno relaksiraju. Eksperiment na ograničenoj ploči nije imao dovoljan efekat razvijanja vibracija.

3.2. Prijem šavova obrađenih eksplozijom

Osnovni pregled je vizuelna kontrola, pri čemu se zapažaju tragovi eksplozivnog dejstva na metal u obimu 100%.

Ultrazvučnom tenzometrijom ocenjuje se stanje zaostalih napona nakon dejstva eksplozije.Veličina pratećih napona ne bi trebalo da pređe 60 MPa (60 N/mm^2).

Kontrola ultrazvučnom tenzometrijom je obavljana na materijalima debljine 10, 14, 18 i 22 mm. Mereno je jedno mesto na vertilanom i dva na prstenastom šavu, od čega je obavezno ukrsno mesto vertikale i horizontale.

Merenje je vršeno na prva četiri u seriji od 10 dekompenzatora, na 3 od 10 drugih i na jednom od sledećih dekompenzatora.

Podaci o eksplozivnom opterećenju i ultrazvučne tenzometrije pratećih napona zapisuju se u sertifikat dekompenzatora.

4. Zaključak

Relaksacija zaostalih napona primenom energije eksplozije se pokazala vrlo uspešnom na objektima Fabrike glinice „Birač“ u Zvorniku. Prednosti u odnosu na druge metode su značajne. Pre svega, cena je znatno niža, vreme izvođenja mnogo kraće, a eksplozijom se može vršiti i relaksacija austenitnih materijala. Nedostatak je u tome što je primena uglavnom moguća prilikom izgradnje velikih objekata..

Metoda najverovatnije nije naišla na širu primenu zbog specifičnih zahteva po pitanju sigurnosti i obuci operatera, a moguće je i da zbog svoje „zatvorenosti“ tehnologije nije dovoljno promovisana i prezentovana javnosti.

Izloženi podaci bi trebalo da animiraju stručnjake iz oblasti zavarivanja da primene ovu metodu u praksi. U ovom tekstu su dati osnovni podaci za operativnu tehnologiju, a detalje bi trebalo dodatno razraditi prilikom primene u konkretnom slučaju.

5. Zahvalnica

Osnovna saznanja o radu sa eksplozivom stekli smo od pok. Zorana Gligorića koji je bio višegodišnji član TEHWELD-a i na tome smo mu veoma zahvalni.

Neizmerno smo zahvalni i pok. dr. Brani Beatoviću na ostavljenoj literaturi u vezi sa primenom eksplozije pri relaksaciji zaostalih napona nakon zavarivanja.

Dr Brano Beatović je neposredno zaslužan što je bivši Energoinvest stekao pravo da paralelno sa Patonom AN iz Kijeva patentira relaksaciju napona primenom energije eksplozije. U Patonu su već vršili eksperimente po pitanju relaksacije tako što su detonirajuće štapine postavljali paralelno sa varom, u ZUT-u. Neki efekti su bili evidentni, ali je postojala nehomogenost po pitanju prisutnih, zaostalih napona.

Dr Brano Beatović je predložio da se promeni paralelna konfiguracija u sinusoidalnu i to se pokazalo kao delotvorno i odmah je bilo prihvaćeno.

Ovo je kratak istorijat koji je dr Brano Beatović ispričao članovima Tehweld-a.

U ime zahvalnih članova Tehweld-a,
Mića Đorđević

4. Conclusion

Residual-stress relaxation using explosive energy proved highly successful on structures at the “Birač” Alumina Factory in Zvornik. This method offers significant advantages over other techniques. Above all, the cost is much lower, the execution time is much shorter, and explosive treatment can also be used to relax residual stresses in austenitic materials. Its main limitation is that its application is generally feasible during the construction of large structures.

The method has most likely not achieved wider application because of specific safety requirements and the need for operator training. It is also possible that, due to the restricted nature of the technology, it has not been sufficiently promoted or presented to the professional public.

The presented data should encourage welding specialists to apply this method in practice. This text provides the basic information needed for operational technology, while the details should be further developed for each specific application.

5. Acknowledgements

We gained our basic knowledge of working with explosives from the late Zoran Gligorić, who was a long-standing member of TEHWELD, and we are very grateful to him for this.

We are also deeply grateful to the late Dr. Brano Beatović for the literature he left concerning the use of explosive energy for residual-stress relaxation after welding.

Dr. Brano Beatović was directly responsible for enabling the former Energoinvest to obtain the right, in parallel with the Paton Institute of Electric Welding from Kyiv, to patent stress relaxation using explosive energy. At the Paton Institute, experiments on stress relaxation had already been carried out by placing detonating cords parallel to the weld, in the HAZ. Some effects were evident, but inhomogeneity remained in the existing residual stresses.

Dr. Brano Beatović proposed replacing the parallel configuration with a sinusoidal one. This proved effective and was immediately accepted.

This is a brief historical account that Dr. Brano Beatović shared with the members of TEHWELD.

On behalf of the grateful members of TEHWELD,
Mića Đorđević.

Literatura / References

[1] „Projekat proizvodnje eksplozivnih radova i uklanjanja propratnih napona u zavarenim spojevima korpusa dekompenzatora obima 2,150m3 preduzeća glinice „BIRAČ“ (grad Zvornik), 1976.god.

[2] Muncaster, Peter W. A Practical Guide to TIG (GTA) Welding. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1991