

PRIMENA CADWELD® POSTUPKA ZAVARIVANJA ZA ELEKTRIČNE SPOJEVE UZEMLJIVAČA

Mr Gojko Dotlić, dipl.inž.el.
JP Elektromreža Srbije, Kneza Miloša 11, Beograd

gojko.dotlic@ems.co.yu

U elektroenergetskim objektima napona 110 do 400 kV koriste se horizontalni uzemljivači ukopani u zemlju u obliku mreža, pri čemu se za formiranje mreža najčešće koristi bakarno užje. Kvalitetni spojevi na mestima ukrštanja, račvanja ili nastavaka bakarnog užeta u zemlji su od izuzetnog značaja za funkcionisanje uzemljivača, ali na žalost i „najslabija karika“ uzemljivača.

U radu se daje prikaz egzotermičkog postupka zavarivanja bakarnih provodnika (uključujući užadi za potrebe formiranja mreže horizontalnog uzemljivača), i to bez spoljašnjih izvora toplote ili energije. Suština je primeni odgovarajućih alata, pribora i materijala. Osnovni elementi tog kompleta su: višedelni grafitni kalupi za razne tipove spojeva, punjenja (prašak od bakarnog oksida i aluminijuma), materijal kojim se izazva postupak zavarivanja (tzv. starter) i običan upaljač na bazi kremenca. Postupak se u svetu koristi pod komercijalnim nazivom CADWELD®.

Cljučne reči:

CADWELD®; egzotermički zavareni spojevi; uzemljenje

APPLICATION OF CADWELD® WELDING PROCESS FOR ELECTRICAL GROUNDING CONNECTIONS

Horizontal grounding systems in the net form buried in the ground are used in power substations for voltage levels from 110 to 400 kV. The most used is copper wire conductor for net forming. Good connections on cross points, T-connections or copper conductor splicing in the ground are very important for ground system functioning, otherwise they might be “the most weak loop” of grounding.

This paper presents exothermic method of welding copper conductors (including wire conductors for nets of horizontal grounding systems) in which no outside source of heat or power is required. The essence is in application special tools, accessories and materials. The basic elements of this kit are: semi-permanent graphite molds for different connection types, fillings (powder of copper oxide and aluminum), starting material for initiating the process (starter) and simple flint igniter. The process is applied wide world under commercial name CADWELD®.

Key words:

CADWELD®; exothermic welded connections; grounding

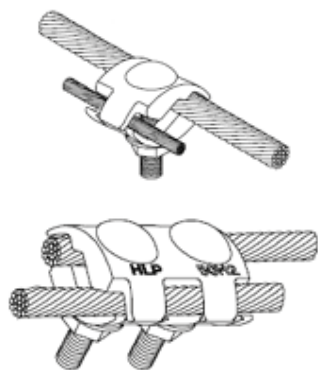
1. UVOD

Poznato je da se hemijska reakcija koja oslobađa toplotu (energiju), naziva se *egzotermička*. Egzotermički zavareni spojevi se prave topljenjem metala bakra pomoću energije oslobođene egzotermičkom reakcijom između praha bakarnog oksida i aluminijuma. Proces je razvijen 1938. godine za zavarivanje signalnih veza od legure bakra za potrebe železnice. Projektovan je od Dr Charles Cadwell-a i ceo process je nazvan CADWELD® po njegovom izumitelju. Egzotermičko

zavarivanje se u literaturi takođe naziva skraćeno *termitsko* zavarivanje ili *aluminotermitsko* zavarivanje.

2. POSTOJEĆA PRAKSA IZVOĐENJA SPOJEVA UZEMLJIVAČA

U elektroenergetskim objektima napona 110 do 400 kV koriste se horizontalni uzemljivači koji se ukopavaju u zemlju na dubini od 0,5 do 1 m. Horizontalni uzemljivači su najčešće u obliku mreža. Kao horizontalni uzemljivač najčešće se koristi bakarno užeta preseka najmanje 35 mm².



Slika 1. Izvođenje spojeva uzemljivača sa strujnim stezaljkama

Na uzemljivače u elektroenergetskim objektima priključuju se zaštitna uzemljenja, radna (pogonska) uzemljenja i gromobranska uzemljenja. Samim tim od izuzetnog značaja su veze sa uzemljivačem, kao i međusobne veze na mestima ukrštanja, račvanja ili nastavaka bakarnog užeta u postupku formiranja mreže horizontalnog uzemljivača. Iako naši propisi [1, 2] dozvoljavaju da se ti spojevi u zemlji izvedu zavarivanjem, pomoću zavrtnjeva (najmanje M10) ili pomoću tzv. stujnih stezaljki (Sl. 1), a kad je reč o užadima i kompresionim spojevima, ipak se postupak zavarivanja skoro nikad ne primenjuje. Spojevi se pre zatrpavanja zaliju bitumenom (nekada se radilo sa olovom) da bi se usporio efekat korozije.

Za razliku od spojeva iznad zemlje koji treba da su tzv. „pod šraf“ zbog periodičnih potreba da se delovi sistema ili opreme „raz-zemlje“ u postupku raznih ispitivanja (ispitivanje kontinuiteta uzemljivača, merenje otpora uzemljivača, i dr.), spojevi u zemlji su za „vjeke – vjekova“ i ne diraju se sve dok se za to ne pojavi nužda (npr. prilikom proširenja objekata, rekonstrukcija, i sl.).

3. EGZOTERMIČKO ZAVARIVANJE SPOJEVA UZEMLJIVAČA

3.1. Osnovni princip egzotermičkog zavarivanja spojeva

Egzotermičko zavarivanje vrši se toplotom sagorevanja egzotermičke mase koju čini smeša aluminijuma i oksida bakra. Kad se egzotermička masa zagreje na 900°C, nastaje hemijska reakcija kojom se redukuje bakar iz oksida, a oksidira aluminijum, pri čemu se oslobađa toplota i povećava temperature na 2200°C. Kao rezultat ove reakcije je da istopljena legura bakra zavari provodnike i napravi finalne odlivke spojeva (Sl. 2).

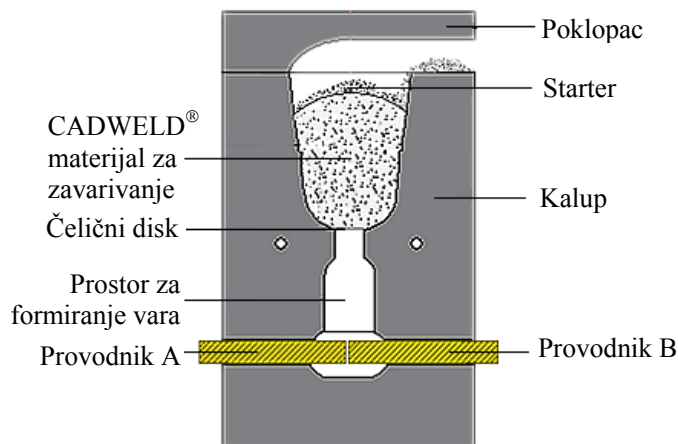
CADWELD[®] patentirani materijal koji se koristi za egzotermičko zavarivanje spojeva sadrži više hemijskih komponenti (Tab. 1). Pored zapaljive smeše metalnog praška (Al - kao goriva) i metalnih oksida (Cu₂O/CuO – kao nosioca kiseonika potrebnog za sagorevanje), tu je i sredstvo (CaF₂) za smanjivanje plamena koji se na visokoj temeperaturi javlja u dodiru gasova

sa vazduhom, kao i kalaj (SnO_2) koji zbog svoje otpornosti na koroziju služi za formiranje zaštitne prevlake na bakarnom varu.

Na kraju, vrlo bitan je i materijal kojim se izazva reakcija egzotermičkog zavarivanja (engl. *starter*). To su smeše na bazi fulminata žive (praskava živa) ili olovnog azida. Potpaljivanje ovih smeša vrši se upaljačem na bazi kremenca ili drugim kratkotrajnim izvorom plamena.

Tabela 1.

Hemijska komponenta	Hemijski simbol
Kalaj oksid	SnO_2
Kalcijum florid	CaF_2
Bakarni oksid	$\text{Cu}_2\text{O} / \text{CuO}$
Aluminijum	Al



Slika 2. Osnovni elementi egzotermičkog zavarivanja

3.2. Tehnička regulativa

Evropska regulativa [3] kao i naša [1, 2], takođe preporučuje primenu spojeva zavarivanjem, s tim što se u Evropi to zaista koristi i u praksi. Ipak može se reći da je u primeni spojeva uzemljivača postupkom zavarivanja najdalje otišla američka regulativa [4] koja zahteva da svi spojevi uzemljenja bakar – bakar i bakar na čelične provodnike od 16.510 cmil¹⁾ (8,4 mm²) i provodnika većih dimenzija treba da budu CADWELD® egzotermički zavareni spojevi. Provodnici spojeni sa CADWELD® egzotermički zavarenim spojevima smatraju se kontinualnim provodnicima, kako stoji u odredbama standarda IEEE Std 80 – 2000 [4].

4. DIMENZIONISANJE SPOJEVA UZEMLJIVAČA

4.1. Izbor preseka egzotermički zavarenih spojeva

Izbor preseka bakarnog užeta i proračun gustine mreže horizontalnog uzemljivača radi se u fazi projektovanja i zavisi od specifične otpornosti tla, kao i uslova koje definiše elektroenergetski sistem na mestu priključka objekta. To se pre svega odnosi na maksimalno očekivanu veličinu i trajanje struje kvara (zemljospoja).

¹⁾ Circular mil (skraćeno: cmil) je angloamerička jedinica za površinu kruga sa prečnikom od 1 mila, pri čemu je: 1 mil = 0,001 inč = 0,0254 mm. Iz toga se dobija sledeći odnos mernih veličina za površinu: 1cmil = 0,5064·10⁻³ mm².

Za izbor minimalnog preseka provodnika kojim se izbegava njegovo topljenje u uslovima kvara, u standardu IEEE Std 80-2000 [4] koristi se poznata formula iz elektrotehnike:

$$A = K \cdot I \cdot \sqrt{S}$$

gde je: A – presek provodnika u circular mil-ima¹⁾;
 K – konstanta koja zavisi od vrste materijala (Tab. 2);
 I – efektivna vrednost struje (A);
 S – trajanje kvara (s).

Tabela 2.

Max. temp.	Konstanta K ²⁾		
	Bakar	Koperveld ³⁾	Koperveld ³⁾
	100%	40%	30%
1083 °C	7,01	10,46	12,04
450 °C	9,18	13,74	15,87
350 °C	10,10	15,13	17,46
250 °C	11,65	17,47	20,17

Uz određena uprošćenja, ta ista formula se može primeniti i za izbor tipova spjeva koji se koriste za uzemljivačke sisteme. Naime, gore navedene maksimalno dozvoljene temperature za svaki materijal mogu da se koriste za različite vrste spojeva na sledeći način:

Kompresioni spojevi 250 do 350 °C⁴⁾
 Lemljeni spojevi 450 °C
 Egzotermički zavareni spojevi 1083 °C

Na primer, ako se pretpostavi da je 2 sekunde trajanje očekivane struje kvara od 25.000 A, odgovarajući spoj od bakra treba da ima sledeći presek:

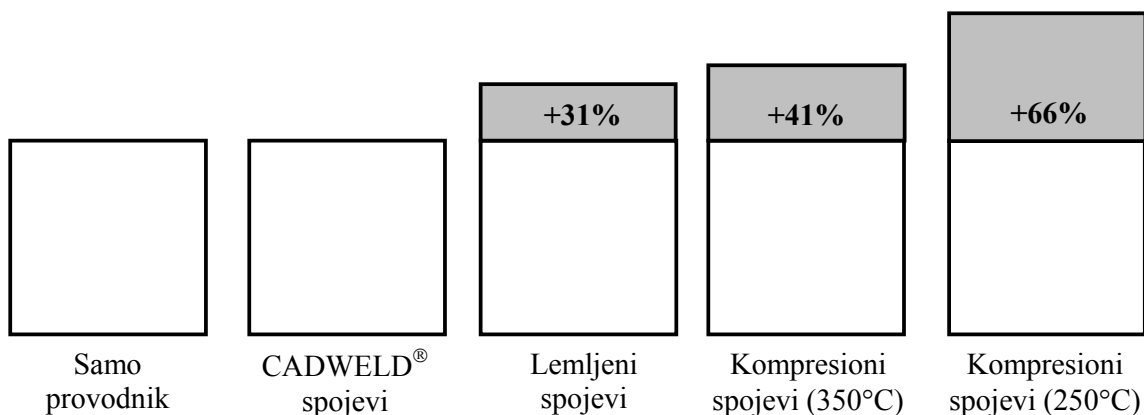
Vrsta spoja	Računski presek	Usvojen standardni presek	
	kcmil	kcmil	mm ²
Kompresini spojevi (na 250 °C)	411	400	208 → 240
Kompresini spojevi (na 350 °C)	357	350	181 → 185
Lemljeni spojevi	325	350	165 → 185
Egzotermički zavareni spojevi	248	250	126 → 120

Kao što se vidi, u odnosu na presek bakarnog provodnika, samo CADWELD® egzotermički zavareni spojevi mogu da se izvedu sa istim presekom. U svim ostalim slučajevima potrebni su spojevi većeg preseka (Sl. 3).

²⁾ Vrednosti konstante K odnose se na standardnu temperaturu ambijenta od 40°C.

³⁾ Koperveld (engl. *Copperweld*) je čelična žica obložena bakarnim slojem.

⁴⁾ Izuzev spojeva koji su ispitani da zadovolje zahteve iz standarda IEEE Std 837-1989.



Slika 3. Ekvivalentni preseci spojeva u odnosu na sam provodnik

Na osnovu vrste spoja i izračunatog preseka spoja, koristi se odgovarajući kalup (višedelno kućište) za izlivanje CADWELD® egzotermičkih spojeva. Na tržištu postoje čitave familije kalupa koje se naručuju prema kod-broju proizvođača pribora koji sadrži: tip kalupa (Tab. 3), tip klešta za fiksiranje kućišta, kod glavnog provodnika i kod provodnika koji se spaja.

Tabela 3. Tipovi kalupa

Tip TA: Horizontalni T ocep		Tip PT: Paralelisanje (vertikalno ili horizontalno)	
Tip XA: Horizontalno ukrštanje u ravni		Tip SS: Nastavak (engl. splice)	
Tip XB: Horizontalno ukrštanje sa mimoilaženjem		Tip GR: Jednostruki spoj sa štapnim uzemljivačem	
Tip PC: Paralelni ocep		Tip GT: Dvostruki (ili prolazni) spoj sa štapnim uzemljivačem	

4.2. Rezultati ispitivanja spojeva

Spojevi provodnika izvedeni CADWELD® egzotermičkim postupkom zavarivanja ispitani su 1999. godine u nezavisnoj laboratoriji ULA (Underwriters Laboratories Inc.®) u SAD. Ispitivanja su izvedena u skladu sa internim standardom ove laboratorije UL 467, kao i Kanadskim standardom C22.2 Br. 41-M1987, a koji se odnose na uzemljenja i spojnu opremu. Na osnovu ispitivanja izdat je sertifikat o podobnosti za upotrebu [5, 6].

Ispitivanja su pokazala da CADWELD® molekularni spoj nikad ne korodira, ne gubi se i samim tim ne povećava otpornost (kao što je slučaj kod većine kompresionih spojeva). Strujna opteretljivost ovih spojeva je jednaka strujnoj opteretljivosti spojenih provodnika.

Drugim rečima, egzotermičko zavarivanje se pokazalo kao najbolji izbor sigurnog, pouzdanog, strujno opteretljivog i dugotrajnog spoja.

5. IZVOĐENJE SPOJEVA

5.1. Pribor za egzotermičko zavarivanje spojeva

Pribor za CADWELD® egzotermičko zavarivanje spojeva sastoji se od sledećih elemenata:

1. Materijal

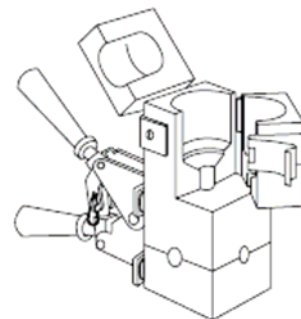
CADWELD® materijal za zavarivanje u obliku smeše praha od bakarnog oksida i aluminijuma, pakuje se u plastične tube (Sl. 4). Svaka tuba sadrži na dnu materijal za iniciranje egzotermičkog procesa zavarivanja, dok je materijal za zavarivanje na vrhu. Ti materijali nisu eksplozivni i ne mogu da budu povod spontanog paljenja [7]. Tube se pakuju u kutije zajedno sa metalnim diskovima (Sl. 6).



Slika 4. Pakovanje materijala

2. Kućište

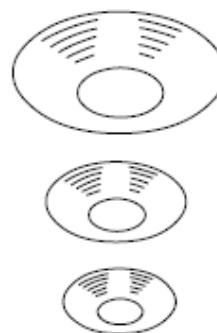
Većinom se koristi više-delno kućište od grafitu za pravljenje CADWELD® spojeva. Kućište reguliše smer i brzinu topljenja smeše tečnog metala, kao i njegov konačan oblik. Grafit se koristi za izradu kućišta zbog velike temperature. U normalnim uslovima upotrebe, jedno kućište može da se koristi za 50 i više CADWELD® spojeva.



Slika 5. Više-delno kućište sa poklopcem

3. Diskovi

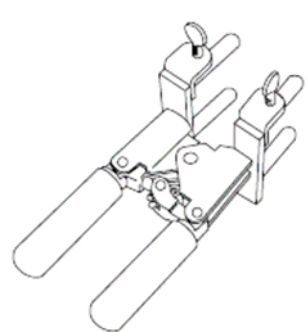
Svaki put kada se radi zavarivanje spojeva, koristi se novi disk. Disk se postavlja na dno šupljine za smešu. Njegova svrha je zadržava prah metala za zavarivanje sve dok ne počne reakcija. Troska dobijena kroz reakciju zadržava se na površini, a istopljeni bakar se spušta na dno šupljine gde taj disk topi i proteče preko provodnika praveći trajni molekularni spoj. Diskovi se prave u tri dimenzije, u zavisnosti od željenog preseka spoja.



Slika 6. Diskovi

4. Klešta za fiksiranje kućišta

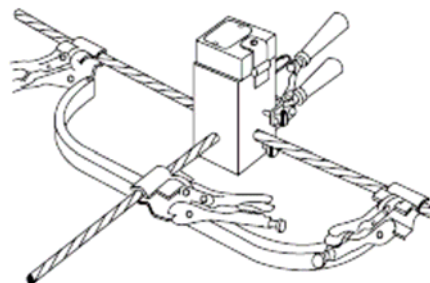
Više-delno grafitno kućište se fiksira (učvršćuje) pomoću specijalnih klešta. Fiksiranje se radi u horizontalnoj i/ili vertikalnoj ravni, tako da se kompletu alata nalaze po dva komada fiksacionih klešta.



Slika 7. Klešta za fiksiranje kućišta

5. Klešta za fiksiranje provodnika

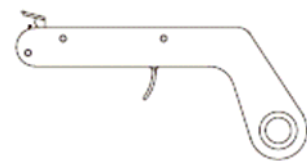
Klešta za fiksiranje provodnika koriste se u cilju sprečavanja pomeranja provodnika za vreme pravljenja CADWELD® spojeva.



Slika 8. Klešta za fiksiranje provodnika

6. Upaljač

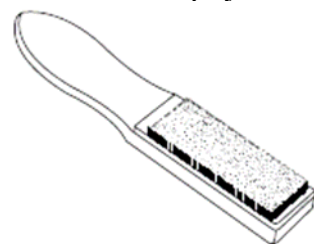
Upaljač se koristi za potpalu materijala za iniciranje egzotermičkog procesa zavarivanja. To može da bude običan upaljač na bazi kremena ili bilo koji kratkotrajni izvor plamena.



Slika 9. Upaljač

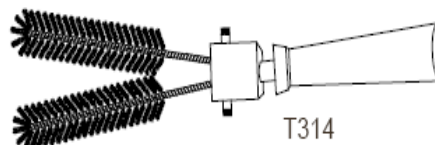
7. Pribor za pripremu površine provodnika

Za pripremu površine provodnika koji se spajaju, koriste se dva tipa četki za skidanje oksida sa površine bakra. Jedna je četka sa kratkom i jakim hrapavošću (Sl. 10) koja se u opštem slučaju koristi za čišćenje okruglih provodnika koji nisu mnogo oksidirali.



Slika 10. Četka za fine površine

Druga četka (Sl. 11) se koristi za čišćenje bilo kog provodnika, a njena upotreba je posebno korisna u slučaju neobrađenih ili vrlo prljavih provodnika.



Slika 11. Četka za grube površine

Za čišćenje čeličnih provodnika ili površina na koje se primenjuje CADWELD® egzotermičko zavarivanje spojeva, koriste se turpije (Sl. 12).










Slika 12. Turpija za čelične podloge

5.2. Postupak egzotermičkog zavarivanja spojeva

Ceo postupak CADWELD[®] egzotermičkog zavarivanja spojeva sastoji se od 7 koraka (Sl. 13). Na kraju se saglasno uputstvu proizvođača pribora, vrši vizuelni pregled kvaliteta spoja [8].

Slika 13.

Postupak CADWELD[®] egzotermičkog zavarivanja spojeva

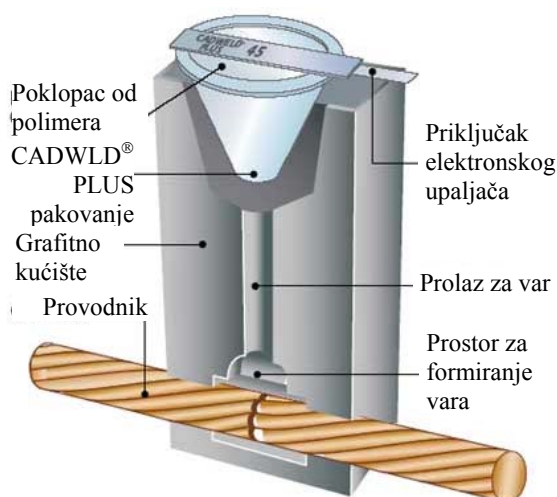
		1. korak: – Čišćenje i sušenje provodnika i kalupa. – Ubacivanje provodnika u kalup	
	2. korak: – Zatvaranje ručnih klešta i fiksiranje kalupa. – Ubacivanje diska u kalup.		3. korak: – Sipanje smeše metala za zavarivanje u kalup.
	4. korak: – Posipanje materijala za iniciranje procesa preko smeše metala za zavarivanje i zatvaranje poklopca.		5. korak: – Iniciranje procesa korišćenjem upaljača.
	6. korak: – Kad se reakcija završi, otvaranje kalupa i oslobađanje spoja.		7. korak: – Pregled kvaliteta CADWELD [®] spoja. – Otklanjanje troske sa kalupa pre stavljanja sledećeg spoja.

5.3. Neka usavršavanja postupka

Normalno je da od 1938. godine kada je postupak CADWELD[®] za egzotermičko zavarivanje spojeva razvijen, postupak je usavršen pre svega sa aspekta lakšeg izvođenja spojeva i veće bezbednosti pri rukovanju priborom. Tako se danas mogu naći na tržištu proizvođača pribora za CADWELD[®] egzotermičko zavarivanje spojeva sledeće dve podverzije:

a) CADWELD® PLUS metoda

CADWELD® PLUS je uprošćena metoda egzotermičkog zavarivanja spojeva. Pribor za zavarivanje je pripremljen tako da se process izvodi bez materijala sa iniciranje egzotermičkog procesa i na taj način smanjuje potrebno vreme pripreme čak za 20%. Kako? U pakovanju materijala za zavarivanje integrisani su: čelična čaša (u obliku kupe) koja sadrži CADWELD® mešavinu materijala za zavarivanje i izvor za iniciranje procesa (Sl. 14). Zavarivanje metala se elektronski inicira korišćenjem upravljačke jedinice koja se napaja iz obične baterije (Sl. 15).



Slika 14. CADWELD® PLUS metoda



Slika 15. Postupak CADWELD® PLUS egzotermičkog zavarivanja spojeva

b) CADWELD® za jednokratnu upotrebu

CADWELD® za jednokratnu upotrebu (engl. *one shot*) je metoda koja se radi sa keramičkim kućištem (Sl. 16). Na taj način se eliminiše potreba za kalupom i grafitnim kućištem i/ili kleštima za fiksiranje višedelnog kućiša. Kao i kod klasične metode, veličina keramičkog kućišta zavisi od dimenzija provodnika koji se zavaruju (spajaju). Posle egzotermičkog zavarivanja spoja, keramičko kućište se razbija. Ova metoda se koristi za zavarivanje manjih preseka provodnika. Prednost joj je u većoj brzini pravljenja CADWELD® spojeva.



Slika 16. CADWELD® za jednokratnu upotrebu

6. ZAKLJUČCI

6.1. CADWELD® egzotermičko zavarivanje električnih spojeva uzemljivača ima niz prednosti u odnosu na ostale vrste električnih spojeva, kao što su:

- Strujna provodljivost spoja je jednaka kao kod provodnika.
- Spojevi ne slabe sa godinama, jer su zavareni i stoga dugotrajni.
- Spoj je dugotrajna molekularna veza koja se ne može izgubiti.

- Spojevi su neosetljivi na koroziju do istog stepena kao bakar.
- Spojevi su izdržljivi na ponavljanja visoko-strujnih udara (kvarova) bez oštećenja.
- Materijal za pravljenje spojeva je lagan i prenosiv.
- Potrebno je minimalno vreme obuke za pravljenje spojeva.
- Ne zahteva se spoljašnji izvor energije ili toplote za pravljenje spojeva.
- Kvalitet spojeva se može proveriti vizuelnim pregledom.
- Spojevi se mogu koristiti za zavarivanje bakra, legure bakra, bakra obloženog čelikom i raznih legura čelika (uključujući nerđajući čelik).

6.2. CADWELD® egzotermičko zavarivanje električnih spojeva uzemljivača treba uvesti u primenu u našim elektroenergetskim objektima.

6.3. Preporučije se domaćim izvođačima elektromontažnih radova u elektroenergetskim objektima da osvoje CADWELD® postupak egzotermičkog zavarivanja električnih spojeva.

LITERATURA

- [1] Pravilnik o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V (Sl. list SRJ, br. 61/1995)
- [2] Tehnička preporuka br. TP-7: Izvođenje uzemljenja i uzemljivača u elektrodistributivnim transformatorskim stanicama 35/10 kV, 35/20 kV, 10/0,4 kV, 20/0,4 kV i 35/0,4 kV (III izdanje, jun 1996)
- [3] Earthing Systems for Power Installations with Nominal Voltages above 1 kV (original language version: Erdungen für Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV), DIN VDE 0141 (replaces DIN VDE 0141: 1989-07), Issued by: VDE VERLAG GmbH, Germany, Date: January 2000
- [4] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Std 80-2000 (Revision of IEEE Std 80-1986), Approved 30 January 2000 by IEEE-SA Standards Board
- [5] Certificate of Compliance of investigation by Underwriters Laboratories Inc.® (North Carolina, USA) of representative samples of CADWELD® series in accordance with Standard for Safety UL 467 - Grounding and Bonding Equipment (Certificate Number 030999 – E63251, Issue Date: September 3, 1999)
- [6] Certificate of Compliance of investigation by Underwriters Laboratories Inc.® (North Carolina, USA) of representative samples of CADWELD® series in accordance with Canadian Standard for Grounding and Bonding Equipment, C22.2 No. 41-M1987 (Certificate Number 030999 – E63251, Issue Date: September 3, 1999)
- [7] Material Safety Data Sheet for CADWELD® Aluminum Welding Material of the Company ERICO International Corporation (Ohio, USA) in accordance with: guidelines 91/155/EEG - NEN ISO 11014-1, 29 CFR 1910.1200, 29 CFR 1926.59, Controlled Products Regulations (MSDS: 234; Inclusive of material types: A22; Applicable prefixes: ACB, ACC; Revision: P; Issue Date: March 1, 2007)
- [8] Installers and Inspectors Guide for CADWELD® Electrical Connections, ERICO International Corporation, Handbook, 2005