

Zdravko Pamić, dipl.ing.el.  
HEP ODS d.o.o. ELEKTRA ZAGREB  
[zdravko.pamic@hep.hr](mailto:zdravko.pamic@hep.hr)

## USPOREDBA BAKRA I ALUMINIJA KAO MATERIJALA ZA VODIČE NN I SN KABELA

### SAŽETAK

Najčešće upotrebljavani materijali za izradu vodiča za NN i SN kabele su bakar i aluminij. Često se postavlja pitanje: koji od vodiča upotrijebiti za NN i SN kabele?

Nedvojbeno je da je cijena jedna od bitnih značajki i tu je aluminij svakako u prednosti u odnosu na bakar. Značajke, poput problema prilikom spajanja, montaže spojnice i kabelaških završetaka, idu u korist bakra dok manja specifična težina i kompatibilnost s drugim kabelima daju prednost aluminiju pred bakrom. Naime, većina korisnika NN i SN kabela usredotočena su prvenstveno na početne troškove kabela a ne i na prednosti bakra ili aluminijem pred onim drugim materijalom.

**Ključne riječi:** bakar, aluminij, NN kabele, SN kabele

## COMPARATION OF COPPER AND ALUMINIUM AS MATERIAL FOR LV AND MV CABLES

### SUMMARY

The most commonly used materials for making LV and MV cables are copper and aluminium. The often question is: which of the material used for LV and MV cables?

There is no doubt that the price of one of the essential features and the aluminium is definitely an advantage compared to copper. Features, such as problems when connecting, mounting clamp and the termination, are in favour of copper while less specific weight and compatibility with other cables prefer aluminium to copper. In fact, most users of the LV and MV cables are focused primarily on the initial costs of cables, not to the advantages of copper or aluminium from those other material.

**Key words:** copper, aluminium, LV cables, MV cables

## 1. UVOD

Istražujući položaj bakra u odnosu na aluminij, kao materijala za izradu vodiča NN i SN kabela (u daljnjem tekstu: energetski kabel), često se postavlja pitanje: koji od vodiča upotrijebiti za koji od energetskih kabela? Jedna od bitnih značajki je svakako cijena i tu je aluminij svakako u prednosti u odnosu na bakar. Kako je većina korisnika energetskih kabela, pa tako i u HEP ODS-u, previše usredotočena prvenstveno na početne troškove kabela, a ne i na prednosti bakra pred aluminijem, prednost se daje aluminiju. Neke značajke, poput problema prilikom spajanja, montaže spojnica i kablskih završetaka, idu u korist bakra dok manja specifična težina i kompatibilnost s drugim kabelima daju prednost aluminija pred bakrom. Ipak, upotreba bakra, umjesto aluminija, bit će i dalje prisutna zbog određenih tehničkih razloga kao i konačnih troškova samog objekta gdje se ugrađuju ti kabeli.

U nastavku referata detaljnije se govori o svakom od spomenutih i ostalih značajki svakog od ovih materijala kako bi se dobila jasnija slika u kojoj prilici, kao vodič za energetske kabele, koristiti bakar a u kojoj aluminij.

## 2. ZNAČAJKE BAKRA I ALUMINIJA

### 2.1. Općenito

Svaki od ovih materijala ima svoje prednosti i mane pred onim drugim. Početno se koristio samo bakar dok se je kasnije počeo koristiti i aluminij za istu namjenu. Tako i danas neki korisnici ugrađuju u svojim kablskim mrežama više energetske kabele izrađene s vodičima od bakra a drugi više od aluminija. Zato je potrebno prvo obraditi glavne značajke jednog i drugo materijala koji su navedeni u normi HRN EN 60228:2007 [2].

### 2.2. Oblik vodiča

Proizvođači energetskih kabela izrađuju vodiče prema normi HRN EN 60228:2007 koji mogu biti: jednožični vodiči presjeka od  $0,5 \text{ mm}^2$  –  $400 \text{ mm}^2$  za vodiče od bakra dok se ovakvi vodiči od aluminija izrađuju od  $10 \text{ mm}^2$  –  $1200 \text{ mm}^2$ . Vodiči su zbijenog okruglog ili sektorski oblikovanog vodiča presjeka od  $0,5 \text{ mm}^2$  –  $1000 \text{ mm}^2$  za vodiče od bakra dok se od aluminija izrađuju vodiči presjeka od  $10 \text{ mm}^2$  –  $2500 \text{ mm}^2$ . Neke konstrukcije, uglavnom NN kabela, izrađuju s aluminijским vodičima izrađenim od sektorski oblikovanih jednožičnih vodiča, tzv. solid vodiči, presjeka od  $95 \text{ mm}^2$  –  $1200 \text{ mm}^2$ .

Na Slikama 1 - 4 prikazani su neki od oblika vodiča koji se koriste u HEP ODS-u.



Slika 1.: Višežični zbijeni vodiči od Al i Cu



Slika 2.: 4-žilni NN kabel sa sektorski oblikovanim višežičnim vodičima od bakra



Slika 3.: SN kabel sa zbijenim višežičnim vodičem od aluminija



Slika 4.: Segmentirani sektorski oblikovan višežični vodič (tzv Miliken) VN kabela

### 2.3. Značajke bakra i aluminija

Osnovne značajke bakra i aluminija dane su u Tablici I.

Tablica I. Osnovne značajke bakra i aluminija

Značajka materijala	Jedinica	Materijal	
		Bakar	Aluminij
Električna vodljivost kod 20°C	MS/m	58,0	35,38
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	8,92	2,7
Tvrdoća	MPa	369	167
Prekidna čvrstoća prije použenja	MPa	200-280	127-206
Modul elastičnosti	GPa	125	69
Talište	°C	1084,62	660,32
Linearni termički koeficijent istezanja	K <sup>-1</sup>	1,7·10 <sup>-5</sup>	2,3·10 <sup>-5</sup>
Temperaturni koeficijent električnog otpora	K <sup>-1</sup>	0,00393	0,00403

### 2.4. Tipične razlike u značajkama bakra i aluminija

Bakar i aluminij razlikuju se u mnogim svojim značajkama – više u Tablici II.

Tablica II. Relativna usporedba nekih značajki bakra i aluminija

Značajka materijala	Materijal	
	Bakar	Aluminij
Električni otpor	100	164
Gustoća	100	30
Težina / jedinica otpora	100	53
Promjer / jedinica otpora	100	129
Modul elastičnosti	100	55
Tvrdoća	100	44
Talište	100	61
Toplinski otpor	100	158
Toplinska ekspanzija	100	135

Napomena: radi lakšeg objašnjenja slijedećih zaključaka, navedene značajke za bakar su upisane s iznosom 100% dok su vrijednosti za aluminij umanjene ili uvećane za određeni postotak od vrijednosti bakra za istu značajku.

Kako je gustoća aluminija za oko trećinu manja od bakra (30%), za jednaku vodljivost težine vodiča izrađenog od aluminija gotovo su prepolovljena (53%). U tom slučaju presjek vodiča od aluminija treba povećati za faktor 1,6 tj. za 60% u odnosu na presjek vodiča izrađenog od bakra, a to opet znači veću upotrebu materijala za izolaciju vodiča i za vanjski plašt kabela, kao i eventualnog unutrašnjeg omotača, električne zaštite i armature kabela (ako ih ima).

Zbog manjeg presjeka vodiča izrađenog od bakra, u odnosu na kabel s vodičem izrađenim od aluminija, za jednaku vodljivost ovi kabeli imaju manji vanjski promjer, a time se dobiju veće duljine kabela (za isti promjer bubnja s vodičem izrađenim iz aluminija). To je posebno značajno kod podmorskih

kabela jer se s kabelima izrađenim s vodičima od bakra u tom slučaju koristi manji broj spojnika za istu duljinu kabela trase.

Značajno je spomenuti i da su kabeli izrađeni s vodičima od bakra savitljiviji od kabela izrađenih s vodičima od aluminijske, ujedno i manje osjetljivosti na moguće probleme pri spajanju vodiča čime se dobije veća sigurnost tih spojeva od istih kod kabela izrađenih s vodičima od aluminijske.

Zbog manjeg promjera kabela izrađenog s vodičima iz bakra, u usporedbi s kabelom izrađenim s vodičima iz aluminijske, ovi kabeli će se lakše položiti jer krutost kabela zavisi o kvadratu presjeka vodiča a time i o četvrtini promjera kabela.

Ne manje važna činjenica je i da se mogu proizvoditi vrlo mali promjeri kabela izrađenih s vodičima od bakra jer je uobičajeno da se vodiči od aluminijske izrađuju zbijeni tek od 10 mm<sup>2</sup> a pojedinačni promjer jedne žice zbijenog vodiča od aluminijske je većeg promjera nego vodiča izrađenog od bakra.

Iz tehničkih razloga značajno je istaknuti da se savitljivi vodiči (tzv. „finožični“ vodiči) i posebno savitljivi vodiči (tzv. „ekstra finožični“ vodiči) izrađuju samo od bakra u presjecima od 0,5 mm<sup>2</sup> - 630 mm<sup>2</sup>.

## 2.5. Ostale manje razlike u značajkama bakra i aluminijske

Efekt starenja materijala kod vodiča kabela, bez obzira bili oni izrađeni iz bakra ili aluminijske, ide sporije u odnosu na starenje raznih vrsta izolacijskih i materijala za izradu vanjskih plašteva kabela. Smanjenje pojedinih značajki, pa i pojave same greške kod nekog od tih materijala, svakako je vrlo mala kod vodiča, posebno kod vodiča SN i VN kabela gdje su pojedinačne žice vodiča većih promjera nego kod NN kabela. Naime, kod vodiča NN kabela su pojedinačne žice vodiča manje te može doći i do pucanja samog vodiča uslijed zamora materijala od kojeg je napravljen vodič, a uzrokovano dugotrajnom izlaganju vibracijama i/ili oksidaciji uslijed ulaska vode u vodič kabela. Kod kabela, koji su položeni u našem priobalju, posebno na mjestima s izraženim utjecajem zasoljivanja, gdje postoji mogućnost prodora slane vode do vodiča kroz sve slojeve kabela, jednako kao i prilikom susnežice gdje je dodatan problem hladnoća, sve ovo predstavlja ozbiljan problem i povećani utjecaj na starenje samog materijala od kojeg je napravljen vodič.

Kod spajanja vodiča u kabelskom spojniku, sam spojnik može biti najslabije mjesto u kabelskoj trasi zbog starenja materijala samog spojnika, izrađenog bilo od bakra, aluminijske, ili od njihove kombinacije (Al-Cu kabelski spojnik), zbog mogućeg dugotrajnog izlaganja vibracijama, mehaničkim udarcima i/ili termo-mehaničkim cikličkim promjenama u samom materijalu kabelskog spojnika. Kao rezultat svega nabrojanog može doći do povećanog zamora samog materijala kabelskog spojnika i/ili popuštanja samog spoja. Moguće ulazanje vlage u sam spoj kabelskog spojnika može uzrokovati koroziju i formiranje oksida u spojniku (već i vrlo tanak sloj, nanometarskih vrijednosti) što će uzrokovati povećani električni otpor i povećano grijanje samog spoja, a što opet može prouzročiti povećanje parcijalnih izboja (PI), pa i sam proboj na kabelskom spojniku. Posebno je to izraženo kod vodiča izrađenih od aluminijske kod kojeg se, u slučaju oksidacije, stvara sloj oksida koji je dobar izolator, volumnog otpora  $> 1.1 \cdot 10^{17} \Omega \cdot m$  te koji time teže zaustaviti daljnju oksidaciju što je brže moguće, dok je oksid na vodičima izrađenim iz bakra permeabilan prema nastalom oksidu sve dok se ne „potroši“ sav bakar.

## 3. ISTRAŽIVANJE DNV KEMA ZA POTREBE ECI

Iz svega navedenog može se zaključiti da svaki od ovih materijala ima svoje prednosti ali i lošije značajke pred onim drugim. U početku se koristio samo bakar kao zajednički vodič svih energetskih kabela, dok se je kasnije počeo koristiti i aluminij, tako da i danas neki korisnici koriste više bakar a drugi više aluminij u energetskim kabelima koje koriste u svojim mrežama. Zbog toga je na zahtjev ECI (European Copper Institute) DNV KEMA napravila istraživanje na način da je poslan određen upitnik u preko 100 distributivnih tvrtki iz 25 zemalja u cijelom svijetu sa zadatkom da se vidi na temelju čega najveće svjetske distributivne tvrtke odlučuju pri odabiru vodiča energetskih kabela [1.].

Izveštaj tih ispitivanja napravljen je na temelju kompletnih odgovora iz 9 distributivnih tvrtki iz Europe, 2 distributivnih tvrtki iz Afrike, 2 distributivnih tvrtki iz Azije i 3 distributivnih tvrtki iz Amerike. Poseban naglasak dan je na slijedeće njihov zahtjev na odgovore:

- Cijena po m kabela,
- Radikalna veličina kabela,

- Težina po m kabela,
- Mehaničke značajke,
- Jednostavnost ugradnje kablenskog pribora,
- Jednostavnost popravka kabela i pribora,
- Troškovi korektivnog održavanja (popravak nakon kvara),
- Standardi ili procedure distributivne tvrtke,
- Kompatibilnost s postojećim kabelima u mreži,
- Briga za okoliš (gubici),
- Očekivani problemi s kablskim spojnikom,
- Bilo koji drugi faktor.

Od ispitanika se tražilo da ocjene važnost pojedinog faktora u pitanju od 1 do 5, gdje je ocjena 1 bila najmanja važnost a ocjena 5 najveća važnost pojedinog faktora distributivne tvrtke. Zanimljivo: nijedan od ispitanika nije naveo nijedan drugi dodatni faktor od ponuđenih.

Za očekivati je bilo da će cijena kabela, za oba tipa energetske kabele s vodičima izrađenim iz aluminija, biti na prvom mjestu ovog istraživanja i dominirati pred svim ostalim kriterijima. Tako je čak 44% ispitanika dalo prednost aluminiju pred bakrom kod NN kabela a kod SN kabela čak 48% ispitanika dalo je prednost upotrebe aluminija pred bakrom. Kod navedenih kabela velika je sličnost između ostalih kriterija odlučivanja i nijedan nije dominantan pred ostalim ponuđenim kriterijima kao što je cijena kabela pred svim ostalim kriterijima zajedno.

Kod oba tipa energetske kabele s vodičima izrađenim iz bakra nijedan od ponuđenih kriterija nije bitno dominantan pred ostalim ponuđenim kriterijima. Među svim kriterijima tih kabela dominantni su mehanički kriteriji, potom su tu manji problemi s vodičima od bakra kod kablskih spojnika, posebno za Al-Cu izvedbu spojnika kao i lakše održavanje istih.

#### 4. ZAKLJUČAK

Cijena kabela je dominantan kriterij za većinu distributivnih tvrtki, tako i u HEP OD-u. Zbog toga je u tehničkim uvjetima za odabir i korištenje oba tipa energetske kabele HEP ODS uvrstio upotrebu isključivo aluminija kao materijala za NN i SN kabele, jednako kao i kod SKS kabela.

Problemi prilikom spajanja, montaže spojnica i kablskih završetaka, idu u korist bakra dok manja specifična težina i kompatibilnost s drugim kabelima daju prednost aluminiju pred bakrom. Ipak, upotreba bakra, umjesto aluminija, bit će i dalje prisutna zbog određenih tehničkih razloga, ali i kao i konačnih troškova samog objekta gdje se ugrađuju ti kabele.

Postoji veliki broj mogućih negativnih utjecaja okoliša na starenje materijala od kojih je izrađen kabel, tako i na vodiče. Prvenstveno se to odnosi na zasolicu i koronu kod vodiča izrađenih iz aluminija. Od iznimne važnosti izrada je kvalitetnog spoja vodiča te se predlaže da to bude prvenstveno vijčana izrada gdje je potrebno striktno poštivanje montažnih uputstava proizvođača te opreme, posebno zatezanje vijaka uz obavezno korištenje moment-ključa.

#### 5. LITERATURA

- [1] Wim BOONE i CHRISTIAN SONDEREN (DNV GL-The Netherlands), „COPPER IN COMPARISON WITH ALUMINIUM AS COMMON MATERIAL IN CONDUCTORS OF LV AND MV CABLES“, 23<sup>rd</sup> CIRED konferenciji, Lyon, Francuska, June 2015., Paper 0026
- [2] HRN EN 60228:2007 Vodiči za kabele (IEC 60228:2004, EN 60228:2005), travanj 2007.
- [3] HRN IEC 60050-461:2011 Međunarodni elektrotehnički rječnik – 461.dio: Električni kabele, prosinac 2011