

Marijo Brkić
HEP ODS d.o.o., Zagreb
marijo.brkic@hep.hr

Kruno Trupinić
HEP ODS d.o.o., Zagreb
kruno.trupinic@hep.hr

Renato Ćučić
HEP ODS d.o.o., Zagreb
renato.cucic@hep.hr

Ante Višić
HEP ODS d.o.o., Zagreb
ante.visic@hep.hr

PREGLED UČINKOVITIH RJEŠENJA ZA VODIČE PREMA ASTM

SAŽETAK

U ovom referatu je dan primjer izbora ASTM normi, s općenitim osvrtom na iste, na koje se mi u HEP ODS-u pozivamo kod izrade tehničkih uvjeta za bakreno užje za uzemljenje, kako bi smo imali što učinkovitije rješenje za vodiče od kojih se izrađuje bakreno užje za uzemljenje, odnosno kako bi se dobio što kvalitetniji finalni proizvod prihvatljiv za kasniju uporabu u pogonu u elektroenergetskom sustavu, obzirom na njegovu namjenu.

Ključne riječi: norme, tehnički uvjeti, ASTM, vodiči, bakreno užje

OVERVIEW OF EFFECTIVE SOLUTIONS FOR CONDUCTORS ACCORDING TO ASTM

SUMMARY

This paper provides an example of the selection of ASTM standards, with a general overview of them, which we at HEP ODS refer to when developing technical conditions for copper grounding rope, in order to have the most efficient solution for the conductors from which the copper grounding rope is made, or in order to obtain the highest quality final product acceptable for later use in the power system, given its purpose.

Key words: standards, technical conditions, ASTM, conductors, copper grounding rope

1. UVOD

U nacionalnim i međunarodnim okvirima nastoji se proizvoditi ili prijeći na proizvodnju standardnih roba, tj. onih roba koje odgovaraju unaprijed postavljenim zahtjevima u pogledu svih bitnih karakteristika, sastava, težine, vanjskog izgleda, mehaničkih, kemijskih svojstava i sl., odnosno kvalitativnih svojstava uopće. Norma ili standard je poznata i priznata mjera za određenu kvantitativnu ili kvalitativnu veličinu u okviru određene socijalne zajednice, a zasnovana na uopćenim rezultatima znanosti, tehnologije ili iskustva u cilju promicanja najpovoljnije koristi za zajednicu. U robnoj proizvodnji najčešće se pod normom ili standardom podrazumijeva niz precizno i sažeto danih definicija, tehničkih specifikacija, kriterija, mjera, pravila i karakteristika koji opisuju materijale, proizvode, procese i sustave [1].

U HEP ODS-u za robe (u užem smislu proizvode) ovi zahtjevi se propisuju tehničkim uvjetima ili tehničkim specifikacijama, pisanim dokumentom koji opisuje minimum tehničkih zahtjeva koje mora zadovoljiti traženi tip proizvoda kod izrade ili eksploatacije (pogona u EES-u), a mogu se izraditi za proizvod kao cjelinu, pojedinu njegovu komponentu, materijale od kojih je izrađen, itd. Tehnički uvjeti ili tehničke specifikacije su normativni dokumenti koji mogu biti norme, dio norme ili, najčešće, samostalni dokumenti u kojima se, između ostalog, poziva na određene norme. Te norme mogu biti interne (tvorničke), industrijske, nacionalne, regionalne ili međunarodno prihvaćene. Međunarodne norme su hijerarhijski na vrhu i one daju i preporuke za ujednačavanje nacionalnih normi. Kod pisanja tehničkih uvjeta ili tehničkih specifikacija težnja je pozivati se na nacionalno izrađene ili preuzete norme ili one koje su u postupku usklađivanja s regionalnim ili međunarodnim normama. Međutim, čest je slučaj da se moramo pozivati i na regionalne ili međunarodne norme, iz razloga što za određeni proizvod nemamo prihvaćene odgovarajuće nacionalne norme ili taj isti proizvod ne možemo dovoljno dobro opisati kako bi zadovoljio postavljene tehničke uvjete.

U nastavku referata bit će objašnjene norme na koje se pozivamo kod izrade tehničkih uvjeta za bakreno (Cu) uže za uzemljenje, odnosno na koji način te norme daju učinkovito rješenje za vodiče od kojih se izrađuje bakreno uže za uzemljenje, kako bi njegova izrada i primjena u praksi u smislu namjene i sustava kvalitete bila što bolja.

2. TEHNIČKI UVJETI ZA BAKRENO UŽE ZA UZEMLJENJE

U ovom poglavlju bit će opisano uzemljenje i zahtjevi za uzemljenje, u kojem svoju temeljnu primjenu ima bakreno (Cu) uže, te najvažniji dijelovi Tehničkih uvjeta za bakreno (Cu) uže za uzemljenje koje izrađuje HEP-ODS.

2.1. Uzemljenje i uzemljivački sustavi

Pod uzemljenjem se podrazumijeva galvanski spoj između metalnog dijela električnog uređaja, postrojenja ili neke točke mreže, pomoću uzemljivača, a koja u slučaju kvara može doći pod napon, i zemlje.

Uzemljivači su metalni dijelovi ukopani u zemlju radi ostvarivanja galvanskog spoja uzemljenog dijela sa zemljom.

Uzemljenje se izvodi iz sljedećih razloga:

- da osigura sigurnost živih bića, u prvom redu ljudi, za vrijeme normalnog i/ili poremećenog stanja električnog sustava,
- da osigura ispravan rad električnih uređaja, postrojenja, mreža i instalacija,
- da stabilizira napon za vrijeme prijelaznog stanja uzrokovano kvarom i da svede na najmanju moguću mjeru posljedice takvog stanja,
- da zajamči sigurnost ljudi s obzirom na (pre)napone koji se u uzemljivačkim sustavima javljaju pri najvećim strujama zemljospoja.

Uzemljenje se izvodi sustavom vodiča koji moraju svojim dimenzijama i oblikom, skupa sa slojevima okolišnog tla, spriječiti sve štetne posljedice koje nastaju pri poremećaju sustava i stvaranja napona opasnog po čovjeka. U tu svrhu najčešće se koriste bakrena (Cu) užad i čelično-pocinčane

(FeZn) trake raznih dimenzija. Vodoravno ukopani uzemljivači vodiči su koji se obično polažu u dubinu zemlje od 0,5 do 1 m. U našoj praksi za takve uzemljivače najviše se upotrebljavaju pocinčane čelične trake, pa se takvi uzemljivači nazivaju i trakasti uzemljivači. Najmanji im je presjek 100 mm², a najmanja debljina 3,5 mm. Rjeđe se upotrebljavaju bakrene trake najmanjeg presjeka 50 mm² i najmanje debljine 2 mm, ili bakreno uže najmanjeg presjeka 35 mm². U novije vrijeme sve se više upotrebljavaju uzemljivači od bakrenog užeta i šipki, posebno u agresivnom tlu i pri uzemljenju elektroenergetskih postrojenja s velikom strujom zemljospoja [2].

Zbog svoje konstrukcijske fleksibilnosti i visoke električne vodljivosti, izvrsnih mehaničkih, fizikalnih i kemijskih svojstava, ovakva tzv. meka bakrena užad (upletene bakrene žice, klasične okrugle ili zbijene izvedbe), najčešće se primjenjuju kod sustava zaštite od atmosferskih pražnjenja (gromobranska uzemljenja), za uzemljenje stupova na NN i VN mrežama, uzemljenja ograda postrojenja, izjednačenje potencijala, itd. Tzv. tvrda bakrena užad, koja su sličnog izgleda ali drukčijeg sastava i postupka izrade (potrebna je veća vlačna čvrstoća), koriste se za nadzemne električne vodove i nisu predmet razmatranja u ovom referatu.

2.2. Bakreno (Cu) uže za uzemljenje

Tehnički uvjeti HEP ODS-a za Cu užad za uzemljenje [3] opisuju minimum tehničkih zahtjeva kod izrade i eksploatacije Cu užeta koje mora zadovoljiti traženi tip, što treba biti dokazano u tablici s tehničkim podacima i nadzornim ispitivanjima pri preuzimanju objekta.

Pod pojmom “uže” ili “užad” u ovim tehničkim uvjetima misli se isključivo na “uže izrađeno od Cu, namijenjeno za uzemljenje sustava distribucije električne energije u elektroenergetskim mrežama”.

Tablica I. Konstrukcijske značajke bakrene užadi

Nominalni presjek	Broj žica (okrugla izvedba vodiča)	Broj žica (zbijena izvedba vodiča)	Najveći istosmjerni otpor užeta kod 20 ⁰ C (Ω/km)
35 mm ²	min. 7	min. 6	0,524
50 mm ²	min. 7	min. 6	0,387
70 mm ²	min.19	min. 12	0,268

Bakreno uže mora biti proizvedeno u skladu s normom HRN EN 60228:2007/Ispr.1./2012 (Vodiči za kabele), uvažavajući specifične zahtjeve iz ovih tehničkih uvjeta. Cu žice koje se upotrebljavaju za izradu Cu užeta, trebaju biti napravljene od materijala E-Cu specificiranih u ASTM B49, klase 2. Konstrukcijske značajke užeta određene su sa HRN EN 60228:2007/Ispr.1./2012. Najmanji broj žica u užetu i najveći istosmjerni otpor užeta kod temperature 20°C dani su u tablici I.

Prema klasifikaciji u HRN EN 60228:2007/Ispr.1./2012 u vodiče klase 2. spadaju pleteni vodiči kao cjelina (uže) od bakra, aluminija i aluminijskih legura.

Uže s više od jednog sloja mora biti použeno tako da susjedni slojevi imaju suprotan smjer použenja, s tim da vanjski sloj mora imati lijevi smjer, kada se uže drži uspravno. Žice u svakom sloju moraju biti glatke i použene vrlo blizu jedna drugoj. Dozvoljava se izvedba okruglog i zbijenog (kompaktiranog) vodiča. Gotovo uže ne smije imati nečistoća, zrnaca i drugih stranih nanosa, što se provjerava vizualno. U tablici II. dane su osnovne značajke standardiziranih presjeka Cu užadi za uzemljenje u HEP ODS-u.

Dokumentacija kojom se dokazuje ispunjenje tehničkih zahtjeva je sljedeća:

- Popunjene, potpisane i ovjerene Tablice s tehničkim podacima,
- Prospektni materijali (katalozi, brošure) proizvođača za Cu uže, koje je potrebno priložiti u boji,
- Potvrda o provedenim tipskim ispitivanjima ili Certifikat o ocjenjivanju sukladnosti za Cu uže,
- Izveštaji o tipskim ispitivanjima za sve pojedine nuđene tipove Cu užeta.

Uz svaku isporuku, za svaki isporučeni bubanj Cu užeta, proizvođač je obavezan dostaviti u papirnatom obliku:

- a) Ispitni list s rezultatima ispitivanja tijekom proizvodnje,
- b) Certifikat kojim proizvođač dokazuje da ima uspostavljen sustav upravljanja kvalitetom prema normi HRN EN ISO 9001 ili jednakovrijedno,
- c) Tehničke nacрте pripadnih bubnjeva za pojedine presjeke Cu užeta prema troškovniku,
- d) Izvorni proizvođački Program kontrole kvalitete za tvorničku proizvodnju Cu užeta (Plan osiguranja i kontrole kvalitete (QA i QC),
- e) Certifikat kojim proizvođač dokazuje da ima uspostavljen sustav upravljanja kvalitetom prema normi HRN EN ISO 9001 ili jednakovrijedno,
- f) Izvorni tvornički izvještaj o rutinskim ispitivanjima za predmetno Cu uže, s prikazom mjerenih/ispitnih veličina,
- g) Izvornu proizvodnu foto dokumentaciju svih pojedinih nuđenih Cu užeta prema troškovniku.

Nadzorna ispitivanja, tj. ispitivanja na uzorku (eng. sample test), provode se na 10% bubnjeva od ukupne količine užeta koji je predmet isporuke, u skladu s normom HRN EN 60228:2007/Ispr.1./2012, uz prethodnu najavu, tijekom proizvodnje i/ili pri preuzimanju užeta, na elementima uzetim iz pojedine faze proizvodnje i/ili na uzorcima gotovog užeta. Popis nadzornih ispitivanja nalaze se u „Listi ispitivanja“. Ukoliko se ukaže potreba, Korisnik ima pravo zatražiti, na trošak Ponuditelja, provjeru spornih rezultata ispitivanja u prostorijama proizvođača Cu užeta ili kod ovlaštene neovisne institucije.

Prihvaćena je nova verzija norme HRN EN 60228:2024 (krajnji rok za prihvaćanje od nacionalnih tijela je bio 12.03.2025. god.). Ostavljeno je prijelazno razdoblje do 12.06.2027. god., do kada će biti aktivna i starija verzija ove norme, i tada će se povući iz upotrebe (i svi njezini dodaci/ispravke).

Na slikama 1. i 2. prikazani su izgledi Cu užeta za uzemljenje odgovarajućeg presjeka, klasične okrugle i okrugle zbijene (kompaktirane) izvedbe. Izbor između ove dvije izvedbe Cu užeta za uzemljenje ovisi o potrebi za fleksibilnošću. Zbijena (kompaktirana) izvedba preporučljiva je za trajne, fiksne instalacije, dok je klasična okrugla izvedba bolja za situacije gdje se očekuje savijanje ili pomicanje instalacije (veća fleksibilnost i otpornost na vibracije).



Slika 1. Izgled bakrenog užeta za uzemljenje klasične okrugle izvedbe



Slika 2. Izgled bakrenog užeta za uzemljenje okrugle zbijene (kompaktirane) izvedbe

3. BAKAR ZA ELEKTROTEHNIKU

Bakreno uže za uzemljenje, kao što i samo ime govori, izrađeno je od bakra koji se koristi kao materijal za izradu žica (vodiča) u pletenom užetu (vodiči kl.2 prema HRN EN 60228:2007 (2024)). U ovom poglavlju bit će opisan bakar kao kemijski element, proces dobivanja elektrolitskog bakra (najraširenija vrsta bakra za elektrotehniku), te najvažnija svojstva bakra od kojih ovise i svojstva bakrenog užeta za uzemljenje za primjenu u praksi.

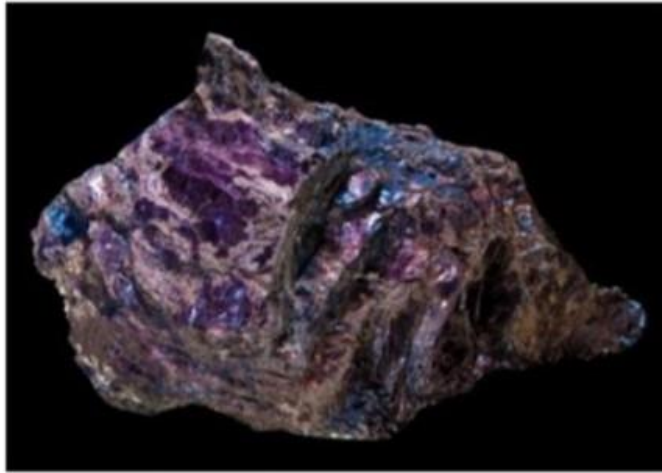
3.1. Bakar kao kemijski element

Bakar [4] je razmjerno mekan, vrlo žilav kemijski metal crvenkastosmeđe boje (spada u skupinu obojenih metala), oznake Cu, atomskog broja 29, gustoće $8,96 \text{ g/cm}^3$, temperature taljenja $1085 \text{ }^\circ\text{C}$ i vrelišta $2562 \text{ }^\circ\text{C}$ (slika 3.).



Slika 3. Bakar (Cu) u neobrađenom stanju

Bakar je u prirodi u elementarnom stanju vrlo rijedak, raspršen u stijenkama, najčešće kemijski čist ili s malo primjesa srebra (Ag) i bizmuta (Bi), u obliku sitnog zrnja, pločica, grančica ili mahovinasto isprepletenih niti. Stoga se uglavnom dobiva iz bakrenih ruda, kojih je poznato oko 240, a prednjače sulfidne (slika 4.), zatim oksidne i karbonatne rude. U tim rudama ima ga relativno malo (najčešće 2-5%, a u bogatijim rudama i 3-10%), ali zahvaljujući djelotvornim metodama obogaćivanja, danas se bakar može dobivati čak iz siromašnih ruda koje sadržavaju 0,5 do 2% bakra.



Ruda bakra – kovelin (lokacija: rudnik Leonard, Montana, SAD)

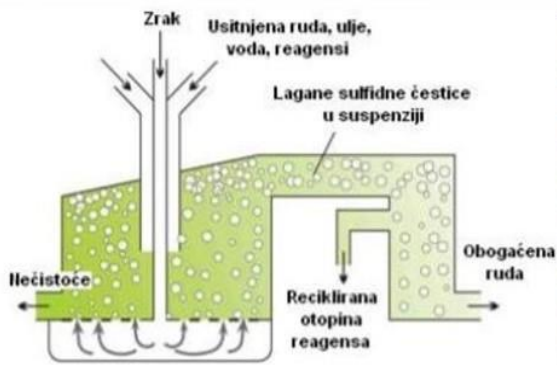
Slika 4. Sulfidna ruda bakra - kovelin (CuS)

Zbog iznimno visoke električne i toplinske vodljivosti, te odličnih mehaničkih, kemijskih i tehnoloških svojstava, bakar ima vrlo široku primjenu, posebice u elektrotehnici (smatra se da preko 50% proizvedenog bakra svoju primjenu nalazi u elektro-industriji), ponajprije za električne vodiče, te u gradnji generatora, motora, transformatora, itd., a svoju primjenu nalazi i u mnogim drugim industrijskim granama za različite namjene.

Uz čisti bakar (koji sadrži najmanje 97% bakra) dosta raširena je i upotreba bakrenih slitina (legura) te spojeva. Bakrene slitine s različitim kemijskim elementima razlikuju se od čistog bakra prije svega po činjenici da slabije vode elektricitet i toplinu, a koriste se ponajviše za poboljšanje mehaničkih svojstava (čvrstoća, tvrdoća), kemijskih svojstava (otpornost na koroziju i habanje), tehnoloških svojstava (lakše lijevanje i zavarivanje), itd. Neke od najpoznatijih bakrenih slitina su one s cinkom (Zn) (mjed ili mesing), s niklom (Ni) (novo srebro ili bijeli bakar), dok su bronce općenito sve bakrene slitine koje ne sadrže cink kao glavni legirni dodatak. Najčešće bronce su slitine bakra i kositra (Sn). S druge strane, bakar se kao legirni element dodaje slitinama plemenitih metala i aluminijskim slitinama za poboljšanje njihovih mehaničkih svojstava. U spojevima je bakar uglavnom jednovalentan i dvovalentan, a bakreni spojevi imaju različitu primjenu u naftnoj industriji, staklarstvu, poljoprivredi, vinogradarstvu, proizvodnji lakova i boja, galvanotehnici, tekstilnoj industriji, kožarstvu, i dr. Na ovaj način se postižu i određeni kompromisi, tako da određene bakrene slitine, unatoč smanjenoj električnoj vodljivosti kao glavnom fizikalnom svojstvu bakra, mogu naći različite primjene i u elektro-industriji, npr. tamo gdje se je umjerena vodljivost prihvatljiva a potencijalno je niža cijena finalnog proizvoda.

3.2. Elektrolitski bakar

Zbog malog udjela u rudama bakar se prethodno mora koncentrirati čime se uklanja jalovina, a to se postiže postupkom flotacije (lat. fluo – plivati) (slika 5.), na način da se sitno samljevena ruda pomiješa s puno vode u koju je dodano sredstvo za pjenjenje (posebna vrsta ulja). Ruda zaostaje u površinskom pjenećem sloju jer se ne kvasi, a jalovina pada na dno. Mehanička priprema rude obuhvaća operacije drobljenja i klasiranja, sušenja, briketiranja i miješanja rude s talioničkim dodatkom, dok se tehnološko-kemijska priprema svodi na žarenje i prilagođavanje sastava talioničkog dodatka.



Slika 5. Proces flotacije i flotacijske peći

U metalurgiji bakra primjenjuje se obično žarenje (uklanjanje konstitucijske vode iz karbonatnih ruda i koncentrata), klorirajuće žarenje (oksidne i sulfidne rude prevode se u klorid topljiv u vodi), ulfatizirajuće žarenje (prevodi sulfidne rude u sulfat bakra topljiv u vodi), oksidirajuće žarenje (uklanjanje suvišnog sumpora u sulfidnim rudama) i aglomerirajuće žarenje (okrupnjavanje materijala kako bi se mogao taliti u pećima).

Za dobivanje bakra koristi se nekoliko metoda:

- pirometalurška ili suha metoda
- hidrometalurška ili mokra metoda
- elektrometalurška metoda

Nakon proizvodnje bakra, jednom od navedenih metoda, dobiva se kao međuproizvod bakrenac (bakreni kamen s oko 30 do 40% bakra), iz kojeg se zatim oksidacijom uz kremeni pijesak ukoni gotovo svo željezo i dobiva sirovi bakar ili blister. On sadrži minimalno 97% bakra, koji se definira kao čisti bakar, ali nije još za upotrebu jer ima primjesa, koje se moraju ukloniti – ili zbog njihove vrijednosti (zlatu, srebro, selenij, platina) ili zbog štetnog utjecaja (željezo, arsen, sumpor, olovo, i dr.).

Postupak uklanjanja ili rafinacije primjesa obavlja se na dva načina:

- rafinacija taljenjem (uz selektivnu oksidaciju)
- elektrolitska rafinacija (postupak elektrolize)

Kao konačni proizvod, nakon svih ovih postupaka dobiva se elektrolitski bakar s najmanje 99,90% bakra, dok su ostalo primjese. To je najzastupljenija vrsta bakra koja svoju primjenu ima u elektrotehnici.

Načelno razlikujemo sljedeće najvažnije vrste bakra za primjenu u elektrotehnici:

- ETP-Cu (electrolytic tough-pitch cooper) – visokovodljivi elektrolitički bakar (sadržaj: min. 99,90% bakra (Cu), sadrži srebro (Ag), max. 0,04% kisika (O))
- OFHC-Cu (oxygen free high conductivity copper) – visokovodljivi bakar bez kisika (sadržaj: min. 99,95% bakra (Cu), sadrži srebro (Ag), bez ili s vrlo malim postotkom zaostalog kisika (O) (max. 0,001%))
- HCP-Cu (high conductivity phosphorous cooper) – deozoksidirani bakar (dezoksidiran fosforom) (sadržaj: min. 99,95% bakra (Cu), sadrži srebro (Ag), 0,002-0,007% fosfora (P))

Postoji i dosta drugih vrsta i podvrsta bakra (meka, polutvrda ili tvrda izvedba [5]) i bakrenih legura, ovisno u prisustvu primjesa (kemijskih elemenata) u njemu, i kao takvi imaju različite nazive i oznake (označavanje bakra prema različitim normama bit će objašnjeno u poglavlju 5.). Kompromis između različitih svojstava svake pojedine vrste ili podvrste bakra, ovisno o stanju i potrebama, posebice u smislu kvalitete, omogućuje stručnjacima da odaberu odgovarajući bakar za specifične zahtjeve. Općenito se smatra da tehnički bakar, koji služi za opću namjenu, sadrži najmanje 99,5% bakra.

Ovdje je ukratko opisan postupak dobivanja elektrolitskog bakra, zbog načelne slike o dobivanju bakra iz ruda, a i zbog činjenice da će u poglavlju 5. kroz tzv. ASTM norme biti objašnjeno kako se elektrolitski bakar koristi za izradu poluproizvoda kao što su bakrene šipke, koje se kasnije obrađuju i od njih se dobivaju žice (vodiči) za primjenu u bakrenom užetu za uzemljenje. U proizvodnji bakrene žice (vodiča) danas se koriste sljedeći postupci: Southwire, Contirod, Properzi/Sector, Upcast, DIP Forming. ETP-Cu se najčešće proizvodi u procesom kontinuiranog lijevanja u Contirod procesu, dok se za OFHC-Cu koristi postupak DIP Forming ili Upcast.

3.3. Svojstva bakra za elektrotehniku

Zbog svoje jedinstvene kombinacije fizikalnih, mehaničkih, kemijskih i tehnoloških svojstava, učinila je bakar nezamjenjivim za širok raspon primjena, od proizvodnje i distribucije električne energije do složenih elektroničkih sklopova, pa je bakar odigrao temeljnu ulogu u području elektrotehnike još od samih početaka električnih tehnologija.

3.3.1. Fizikalna svojstva

a) Električna svojstva

- visoka električna vodljivost (približno 58×10^6 S/m na 20 °C) (definicija: električna vodljivost je sposobnost materijala da provodi električnu struju) – bolje karakteristike i učinkovitost električnih sustava zbog manjih gubitaka. Električna vodljivost bakra ovisi o čistoći (primjesama drugih elemenata) i pokretljivosti slobodnih elektrona. Elementi koji su bliže bakru u periodnom sustavu elemenata manje utječu na smanjenje električne vodljivosti, a udaljeniji elementi više.

U tablici II. je dana usporedba bakra se nekim drugim elementima prema IACS (Međunarodni standard za žareni bakar), usvojenog 1913. god., koji ne samo da pruža ključnu referentnu točku kao univerzalni okvir za usporedbu električne vodljivosti različitih metala, nego naglašava važnost bakra kao primarnog metala u odnosu na koji se procjenjuju drugi vodljivi materijali u elektrotehnici.

b) Toplinska svojstva

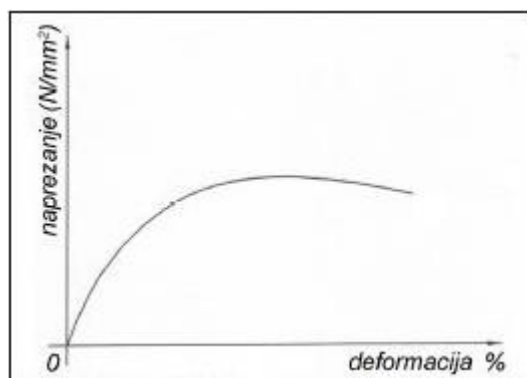
- visoka toplinska vodljivost (približno 400 W/m·K) (definicija: toplinska vodljivost je sposobnost materijala da odvodi toplinu) – bolje karakteristike i životni vijek električnih sustava zbog dobrog odvođenja topline (npr. spriječavanje pregrijavanja i osiguranje pouzdanog rada).

Tablica II. Usporedba električne vodljivosti bakra s drugim materijalima prema IACS

Materijal	Električna vodljivost (S/m na 20 °C)	IACS (% na 20 °C)
Bakar	$\approx 58,0 \times 10^6$	100+ (ETP-Cu: 100-101%; OFHC-Cu:101-102,5%)
Srebro	$\approx 63,0 \times 10^6$	≈ 106
Zlato	$\approx 41,1 \times 10^6$	≈ 76
Aluminij	$\approx 35,0 \times 10^6$	≈ 61
Mjed (mesing)	$15,0-40,0 \times 10^6$	23,0-44,0
Čelik	$\approx 10 \times 10^6$	3,0 -15,0
Ugljična vlakna	$\approx 1 \times 10^6$	-

3.3.2. Mehanička svojstva

- žilav i relativno mekan kao čisti bakar. Pri većem povećanju temperature naglo mu se smanjuje tvrdoća.
- rastezljiv, visoke vlačne čvrstoće (definicija: vlačna čvrstoća predstavlja maksimalnu silu koju materijal može izdržati dok se rasteže prije pucanja) – ovo je kritično mehaničko svojstvo bakra jer su npr. vodiči često izloženi mehaničkim naprezanjima tijekom instalacije, rada i unutar opreme. Dovoljno dobra vlačna čvrstoća osigurava strukturalni integritet vodiča i smanjuje „zamor“ materijala, sprječavajući istežanje, sužavanje (smanjenje poprečnog presjeka), puzanje (postupna deformacija pod stalnim naprezanjem), oštećenja i prekide, čime se izbjegavaju kvarovi i prekidi u radu. Rastezljivost mu ovisi o stanju i iznosi 2-45% (Slika 6.).
- savitljiv, visoke duktilnosti (definicija: duktilnost je sposobnost materijala da se plastično deformira pod vlačnim naprezanjem bez lomljenja) – praktično jednako kritično mehaničko svojstvo kao i vlačna čvrstoća jer omogućava da se bakar lako vuče u žice (vodiče) različitih presjeka s vrlo uskim tolerancijama, što je temeljni zahtjev za proizvodnju električnih kabela i komponenti. Također, visoka duktilnost omogućava da se žice (vodiči) savijaju, uvijaju i povlače tijekom instalacije, čak i u uskim prostorima ili oko prepreka, bez pucanja ili lomljenja, čime se pojednostavljuje proces instalacije i poboljšava pouzdanost električnih spojeva.



Slika 6. Ilustracija dijagrama naprezanja bakra

3.3.3. Kemijska svojstva

- relativno visoka otpornost na atmosferske utjecaje (voda i zrak). Pod utjecajem atmosfere s vremenom se prevlači zelenim slojem, tzv. patinom, koja ga štiti od daljnje oksidacije (Slika 7.).
- relativno visoka otpornost na koroziju i habanje.
- na povišenim temperaturama nije postojan jer se stvoreni oksidni slojevi ljušte i neprestano stvaraju nove, što dovodi do smanjivanja debljine bakra.
- ako se u atmosferi nalazi velika količina sumpordioksida, umjesto zelenog sloja patine stvara se crni sloj bakar-sulfida.
- napadaju ga otopine nekih soli. U kontekstu bakrenog užeta za uzemljenje, ako se ugrađuje u vlažnim i morskim okruženjima, preporučljivo je koristiti pokositreno bakreno uže zbog bolje otpornosti na koroziju.
- kemijski je postojan u neutralnim i lužnatim vodenim otopinama, a nagrizaju ga kiseline, naročito oksidirajuće (Slika 8.)



Slika 7. Oksidacija bakra i stvaranje patine

Aktivna tvar	Cu
Solna kiselina	☐
Sumporna kiselina	☐
Dušična kiselina	○
Lužina	●
Zrak vlažni	☐
Zrak vrući	☐

Slika 8. Otpornost bakra na agresivne tvari (● otporan; ○ neotporan)

3.3.3. Tehnološka svojstva

- dobro se kuje, valja, oblikuje (na hladno i vruće) i izvlači. Obradom putem hladne deformacije, tj. hladnim valjanjem, vučenjem, kovanjem i dubokim izvlačenjem poluproizvoda kao što su limovi, trake, cijevi, šipke, profili, žice i sl. ovi materijali postaju čvrsti i tvrdi, a daljnom termičkom obradom, tzv. žarenjem (rekristalizacija u intervalima 400 do 700 °C; metode opisane u 3.2.) može se postići željena „elastičnost“ (čvrstoća i tvrdoća), ovisno o namjeni ovih materijala. Razlikujemo meki, polutvrđi i tvrdi elektrolitski bakar [5] – meki bakar (meko stanje) ima veću duktilnost ali smanjenu čvrstoću, polutvrđi bakar (H02 stanje) ima ravnotežu duktilnosti i čvrstoće, dok tvrdi bakar (H04 stanje) ima veću čvrstoću i smanjenu duktilnost. Također, ovisno o namjeni ovih materijala, obradom toplom deformacijom, tj. toplim valjanjem, presovanjem i kovanjem, njihovo oblikovanje se u znatnoj mjeri može popraviti dobrom kontrolom kemijskog sastava i čistoće materijala.
- može se meko i tvrdo lemiti i elektrolučno zavarivati.
- elektrootporno zavarivanje je otežano zbog njegove visoke električne i toplinske vodljivosti.
- ne preporučuje se plinski zavarivati, jer vodik iz plina s kisikom iz bakra (posebice kod ETP-Cu bakra) stvara vodenu paru, a tlak vodene pare izaziva pore i odvajanja na granicama zrna, pa bakar postaje neupotrebljiv. Najčešće u bakru nalazimo kisik u obliku spoja Cu_2O i u dodiru s vodikom stvara se vodena para „zarobljena“ u bakru (tzv. vodikova bolest) koja bitno smanjuje rastezljivost i čvrstoću bakra, odnosno njegovu upotrebljivost.
- loše se lijeva, u rastaljenom stanju upija plinove koji mu povećavaju žitkost i stvaraju se šupljine, odnosno degradira materijal.

4. AMERIČKO DRUŠTVO ZA ISPTIVANJA I MATERIJALE

Kod razrade Tehničkih uvjeta HEP-ODS-a za bakrenu užad za uzemljenje (poglavlje 2.) pozivamo se, između ostalog, i na normu ASTM B49, za specifikaciju materijala bakrenih žica (vodiča) od kojih se izrađuje bakreno uže za uzemljenje. U ovom poglavlju bit će općenita razrada o Američkom

društvu za ispitivanja i materijale, vrstama normativnih dokumenata koje obrađuju i objavljuju, te klasifikaciji i označavanju istih.

4.1. Povijest i ustrojstvo

ASTM [6] je kratica za Američko društvo (udruženje) za ispitivanja i materijale. Idejno je nastalo koncem 19. stoljeća, iz potrebe da se uspostave smjernice za stručne odbore, koji bi okupljali stručnjake iz različitih aspekata društva i poticalo ih da sudjeluju na različitim stručnim simpozijima, konferencijama i sl., gdje bi raspravljali i rješavali pitanja vezana uz standarde podataka, eksperimentalne postupke i sl. Tako je nastalo Međunarodno udruženje za ispitivanje materijala (IATM), koje je svoju prvu konferenciju održalo u Europi 1882. god., a primarni fokus u početku djelovanja su bile rasprave o temama iz metalurgije (ponajprije eksperimentalne metode obrade čelika). Već 1902 god., na petom godišnjem sastanku IATM, pod nazivom Američko društvo za ispitivanje materijala (*American Society for Testing Materials*) je proglasilo svoju neovisnost (osnovano je 1898. god. kao neprofitna organizacija), onda je sporazumom iz 1961. godine društvo promijenilo svoj naziv u sadašnji (*American Society for Testing and Materials*), a od 2001. god. postalo je *ASTM International*. Preko 30000 članova iz više od 155 svjetskih država, kroz oko 140 tehničkih odbora i više od 2000 pododбора, razrađuje i ažurira približno 13000 normativnih dokumenata, iz vrlo širokog spektra materijala, proizvoda, sustava i usluga, kako bi se zadovoljile specifične norme kvalitete i sigurnosti.

ASTM objavljuje šest različitih vrsta normativnih dokumenata, prihvaćenih kao norme a definiranih kao:

- Specifikacije – zahtjevi koje proizvod, materijal, sustav ili usluga moraju ispuniti.
- Metode ispitivanja – utvrđeni postupak koji daje rezultat ispitivanja.
- Klasifikacija – sustavno uređenje ili podjela proizvoda, materijala, sustava ili usluga u skupine prema sličnim karakteristikama kao što su podrijetlo, sastav, svojstvo ili namjena.
- Praktične upute – definiran skup uputa za izvođenje jedne ili više specifičnih radnji koje nisu povezane s rezultatima testa (opće načelo uporabe).
- Smjernice – informacije o nizu drugih opcija, osim specifičnog tijeka djelovanja.
- Terminologija – definicija pojmova i objašnjenje simbola, kratica ili akronima.

4.2. Označavanje i klasifikacija ASTM normi

Označavanje ASTM normativnih dokumenata provodi se jedinstvenom oznakom koja se sastoji od fiksne slovne oznake – ASTM, slovne oznake za skupine materijala, proizvoda, sustava i usluga – od A do G, proizvoljnog serijskog broja – od 1 do 4 znamenke, crtice, godine izdanja (uz eventualni dodatak male slovne oznake a, b..., ako je tijekom iste godine bila jedna ili više revizija iste norme), godine aktualne verzije norme navedene u zagradi i punog naziva norme na engleskom jeziku.

Velika abecedna slova od A do G predstavljaju opću klasifikaciju, a prema svakoj klasifikaciji navedene su brojne norme za različite proizvode, materijale, postupke testiranja i mnoge druge teme (Tablica III.)

Tablica III. Opća klasifikacija ASTM normi

Slovna oznaka	Načelna područja obuhvata ASTM normi
A	Željezni materijali i proizvodi, uključivo čelik, i njihove različite karakteristike (kemijski sastav, mehanička svojstva, tehnološka svojstva, dimenzije, i dr.) i metode ispitivanja.
B	Obojeni metali i proizvodi (bakar, aluminij, magnezij i dr. i njihove legure, cink, kositar, itd.), i njihove različite karakteristike i metode ispitivanja.
C	Cementni, keramički, betonski, zidarski materijali i sl., i njihove različite karakteristike i metode ispitivanja.
D	Nafta i naftni proizvodi, plastika, guma, boje i premazi, tekstil, ljepila, asfalt, i dr., i njihove različite karakteristike i metode ispitivanja.
E	Metode ispitivanja različitih svojstava materijala (mehanička, termička, optička, električna) kao što su vlačna čvrstoća, tvrdoća, toplinska vodljivost, električna otpornost; analitičke metode (spektroskopija, mikroskopija i kromatografija), procjene stanja i ispitivanja okoliša; opće teme vezane za ispitivanje, evaluaciju i normizaciju.
F	Materijali i proizvodi za krajnju uporabu (unaprijed definirane primjene): medicinski uređaji, kirurški materijali, sportski i rekreacijski materijali, elektronika, različita ambalaža, podne obloge, itd.
G	Korozija, propadanje, trošenje, trajnost i degradacija materijala i proizvoda, smjernice i upute za ispitivanje istih.

Iz opisanog u ovom poglavlju vidljivo je da ASTM International obuhvaćaju vrlo širok raspon industrijskih područja i predstavljaju „više od normi“, jer nude razne usluge poput obuka, testiranja, programa certificiranja i još puno toga, dodatno podržavajući industrije u implementaciji i korištenju njihovih normi. Također, iako se kao i svake norme donose dobrovoljno (konsenzusom), razvijaju se kroz rigorozan proces koji uključuje doprinos različitih dionika, a kroz svoj globalni međunarodni utjecaj osiguravaju da su norme tehnički ispravne i široko prihvaćene, uz stalno ažuriranje istih, prateći razvoj tehnologija i tehnoloških procesa u različitim područjima.

Bakar kao materijal od kojeg se izrađuju vodiči za bakreno uže za uzemljenje spada u skupinu obojenih metala, zato, u skladu s općom klasifikacijom ASTM normi (Tablica III.), ASTM norme za bakar i bakrene legure započinju oznakom B, a u nadležnosti su ASTM odbora B05.

5. ASTM NORME ZA BAKRENO UŽE ZA UZEMLJENJE

U ovom poglavlju bit će opisana temeljna ASTM norma za bakreno uže za uzemljenje, prema Tehničkim uvjetima za bakreno uže za uzemljenje HEP-ODS-a, te ostale referentne norme na koje se ista poziva.

5.1. Norma ASTM B49

Bakrene šipke za električne namjene definirane su normom ASTM B49, na koju se pozivamo u [3]. Puni, originalni naziv norme je „Standard Specification for Copper Rod for Electrical Purposes“, odnosno „Standardna specifikacija za bakrene šipke za električne namjene“. Prema dostupnim informacijama u [6], zadnje, tj. aktivno izdanje ove norme je iz travnja 2020. god., te je, sukladno označavanju iz potpoglavlja 4.2., oznaka norme ASTM B49-20 [7]. Navedena norma u nadležnosti je ASTM pododbora B05.07 (za rafinirani bakar), a razvijena je u skladu s međunarodno priznatim načelima o normizaciji, prema Odluci o načelima za razvoj međunarodnih normi, smjernicama i preporukama

Odbora za tehničke prepreke trgovini Svjetske trgovinske organizacije (WTO), kojoj je članica i Republika Hrvatska od 2000. god, što joj daje vjerodostojnost i globalnu relevantnost.

Opseg primjene ove norme detaljno opisuje vrste bakrenih proizvoda na koje se norma odnosi, a pokriva zahtjeve za bakrene šipke s promjerima u rasponu od 1/4 do 1 3/8 inča (6,4 mm do 35 mm). Ključno je da su ove bakrene šipke (vruće valjane) definirane kao poluproizvod od visoko vodljivih vrsta bakra, budući su namijenjene za daljnju preradu u električne žice i vodiče.

Mjerne jedinice u ovoj normi su prema američkom (anglosaksonskom, imperijalnom) sustavu jedinica (zbog povijesne povezanosti s industrijskim praksama u SAD-u), dok su vrijednosti dane u zgradama matematičke pretvorbe u SI sustav jedinica (koji je globalno najrašireniji) i služe samo za informaciju, a ukazuju na nastojanje prema međunarodnoj harmonizaciji normi i olakšanom pristupu istima.

Jedinstveni sustav označavanja (UNS) prihvaćeni je sustav označavanja u SAD-u za kovane i lijevane proizvode od bakra i bakrenih legura. To je peteroznamenasti sustav s prefiksom „C“, koji pruža jedinstveni indetifikator za svaku vrstu bakra ili bakrenu leguru, olakšavajući nedvosmisleni specifikaciju i prepoznavanje materijala u različitim normama i industrijskim područjima. Npr. oznake UNS 10100 do UNS 13000 odnose se na čisti ili gotovo čisti bakar za električne namjene.

Norma ASTM B49-20 precizno definira i razrađuje sljedeće vrste visokovodljivog bakra:

- elektrolitski bakar (ETP) (UNS oznake C11000, C11040)
- bakar bez kisika (OFE, OF) (UNS oznake C10100, C10200)
- vruće rafinirani visokovodljivi bakar (FRHC) (UNS oznake C11020, C11025)

Osim ovih specifičnih vrsta, norma dopušta i upotrebu bakra posebnih kvaliteta, oblika ili tipova, pod uvjetom da je to dogovoreno između proizvođača i kupca (korisnika), te da materijal udovoljava posebnim zahtjevima specifikacije.

Norma propisuje specifičan kemijski sastav za pojedine uzorke bakrene šipke, uključujući ograničenja za prisustvo pojedinih kemijskih elemenata u bakru, kako bi se ograničile nečistoće koje mogu negativno utjecati na električnu vodljivost i druga svojstva bakra. Prisustvo svakog od tih kemijskih elemenata ima poznat utjecaj na karakteristike bakra za elektrotehničke primjene, te se stoga zahtijevaju stroga ograničenja unutar norme.

Na slici 10. prikazana je originalna tablica iz norme [7] sa zahtjevima za kemijska svojstva elektrolitskog bakra i bakra bez kisika, te vruće rafiniranog visokovodljivog bakra.

Primjetno je kako za bakrene šipke ETP C11000 (slika 9.), odnosno FRHC C11020, nisu propisani udjeli pojedinih elemenata, osim da moraju sadržavati najmanje 99,90% bakra, s udjelom kisika do max. 0,04% i da uključuju srebro (Ag) (opisano i u 3.2.). Postotak elemenata u tragovima ovisi od procesa izrade. Za ostale vrste bakrenih šipki prema ovoj normi je točno definiran postotak udjela kemijskih elemenata, uz vrlo visok temeljni postotak bakra. Zato se ove potonje koriste za izradu osjetljivih elektrotehničkih komponenti (npr. u elektronici), teže i preciznije se izrađuju i skuplje su od prvih.



Slika 9. Bakrene šipke ETP C11000 prema ASTM B49-20

UNS Number Copper Type	C11000 ETP	C11040 ETP	C10100 OFE ^B	C10200 OF ^C
Copper, min	99.90 % ^D incl silver	99.90 % ^E	99.99 % ^E	99.95 % ^D incl silver
	ppm	ppm	ppm	ppm
Tellurium, max	...	2	2	...
Selenium, max	...	2	3	...
Bismuth, max	...	1.0	1.0	...
Group total, max	...	3	...	...
Antimony, max	...	4	4	...
Arsenic, max	...	5	5	...
Tin, max	...	5	2	...
Lead, max	...	5	5	...
Iron, max	...	10	10	...
Nickel, max	...	10	10	...
Sulfur, max	...	15	15	...
Silver, max	...	25	25	...
Oxygen	...	100–650	5 max	10 max
Maximum allowable total	...	65 ^F	...	...
Cadmium, max	...	...	1	...
Phosphorus, max	...	...	3	...
Zinc, max	...	...	1	...
Manganese, max	...	...	0.5	...
Fire-Refined Coppers				
UNS Number Copper Type	C11020 FRHC	C11025 FRHC		
Copper, min	99.90 % ^D	99.90 % ^D		
	incl silver			
Tellurium, max	...	10		
Selenium, max	...	10		
Bismuth, max	...	5		
Group total, max	...	...		
Antimony, max	...	50		
Arsenic, max	...	10		
Tin, max	...	150		
Lead	...	150–450		
Iron, max	...	20		
Nickel, max	...	150		
Sulfur, max	...	20		
Silver, max	...	150		
Oxygen	...	100–400		
Maximum allowable total	...	750 ^F		
Cadmium, max	...	100		
Phosphorus, max	...	...		
Zinc, max	...	80		
Manganese, max	...	...		

Slika. 10. Kemijska svojstva bakra za primjenu u elektrotehnici prema ASTM B49-20

5.1.1. Referentni dokumenti

Norma ASTM B49-20 se poziva na različite normativne dokumente, te ih se, pokraj specifičnih zahtjeva same norme, jednako tako treba pridržavati, odnosno uzima ih se u obzir kao sastavni dio norme u onoj mjeri kako ih temeljna norma navodi. To su sljedeće ASTM norme:

- B5 – Specifikacija za rafinerijske oblike visokovodljivog žilavog bakra,
- B115 – Specifikacija za elektrolitsku bakrenu katodu,
- B170 – Specifikacija za rafinerijske oblike elektrolitskog bakra bez kisika
- B193 – Metoda ispitivanja električne otpornosti materijala električnih vodiča,
- B224 – Klasifikacija bakra,
- B577 – Metode ispitivanja za otkrivanje bakrenog oksida (osjetljivost na vodikovu krtost) u bakru,

- B846 – Terminologija za bakar i bakrene legure,
- E8/E8M – Metode ispitivanja naprezanja metalnih materijala,
- E18 – Metoda ispitivanja Rockwellove tvrdoće metalnih materijala,
- E29 – Praksa korištenja značajnih znamenki u ispitnim podacima za utvrđivanje sukladnosti sa specifikacijama,
- E53 – Metoda ispitivanja za određivanje bakra u nelegiranom bakru gravimetrijom,
- E478 – Metode ispitivanja za kemijsku analizu bakrenih legura,
- E1004 – Metoda ispitivanja za određivanje električne vodljivosti korištenjem elektromagnetske (vrtložne) metode,
- E1606 – Praksa za elektromagnetsko (vrtložno) ispitivanje bakrene i aluminijske šipke za ponovno izvlačenje u električne svrhe,
- E2575 – Metoda ispitivanja za određivanje kisika u bakru i bakrenim legurama fuzijom inertnog plina.

5.1.2. Terminologija

Definicija općih pojmova koji se odnose na bakar i bakrene legure nalazi se u normi ASTM B846. Standardizirana terminologija od iznimne je važnosti za osiguravanje jasnoće, točnosti i dosljednosti u raznim dokumentima, uključujući specifikacije proizvoda, metode ispitivanja i istraživačke radove koji se odnose na bakar i njegove legure. Jako bitno je da je primjenjivost ove norme ograničena na ASTM odbor B05, budući da terminologija koja se koristi u drugim kontekstima, čak i ako se odnosi na bakrene legure, može imati različito značenje i može doći do pogrešne primjene definicija izvan nadležnosti ovog odbora.

Neki od pojmova koji su opširno definirani ovom normom, a spominju se i u referatu, odnose se na specifične legure (npr. mjed, bronca, itd.), oblike proizvoda (npr. bakrene šipke, cijevi, itd.), proizvodne procese (npr. žarenje, valjanje, prešanje, lemljenje, lijevanje, itd.), stanja i završne obrade (npr. čišćenje, poliranje, itd.), svojstva (npr. vodljivost, otpornost na koroziju, čvrstoća, tvrdoća, duktilnost, itd.), ispitivanja (npr. ispitivanje tvrdoće po Brinellu, ispitivanja savijanja, ispitivanje vlačne čvrstoće, itd.). Definicije nekih najvažnijih pojmova opisane su u 3.3.

5.1.3. Materijal i izrada

Bakrene šipke koje se koriste za izradu žica (vodiča) prema ovoj normi moraju biti od bakra takve kvalitete i čistoće da će gotov proizvod imati svojstva i karakteristike propisane u normi. Materijali prikladni za upotrebu definirani su u normama B224 ili B5 ili B115 ili B170.

Za klasifikaciju bakra prema normi ASTM B224-16(2022) [8] temeljni kriterij je kemijski sastav, uključujući razine čistoće i postotak legirajućih elemenata. Navode se i električna i mehanička svojstva, kao i ostala svojstva i namjene (otpornost na koroziju, obradivost, antimikrobna svojstva, itd.). Bakar se klasificira u nekoliko glavnih kategorija na temelju njihovih proizvodnih metoda i karakteristika. Tablica na slici 11. (izvadak iz originalne norme [8]) pruža strukturirani pregled ovih klasifikacija. Ona uključuje stupce za oznake (standardne industrijske kratice kao ETP, OF, OFE, itd.), vrste bakra (opisni naziv koji odgovara oznaci), UNS brojeve (jedinstveni sustav označavanja), oblik u kojem je bakar dostupan, podijeljeno na „od rafinerije“ kao primarnog proizvođača (uključuju bakrene katode kao početni rafinirani oblik, šipke, brikete, ingote i ingotne šipke), i od „prerađivača“ koji prerađuju bakar u različite oblike (plosnati proizvodi (limovi, trake, ploče i folije), cijevi, šipke, žice i profile), te njegovu komercijalnu dostupnost.

Designations	Type of Copper ^A	UNS Nos. ^B	Form in which Copper is Available ^C						
			From Refiners ^D			From Fabricators ^E			
			Wire Bars	Billets	Cakes	Ingots and Ingot Bars	Flat Products	Pipe and Tube	Rod and Wire Shapes
CATH	Electrolytic cathode								
			Cathodes only						
			Tough-Pitch Coppers						
ETP	Electrolytic tough-pitch	C11000	X	X	X	X	X	X	X
RHC	Remelted, high-conductivity tough pitch	C11010	X	X	X	X	X	X	X
ETP	Electrolytic tough-pitch (anneal resist)	C11100	X	X	X	X	X	X	X
FRHC	Fire-refined, high-conductivity tough-pitch	C11020	X	X	X	X	X	X	X
STP	Silver-bearing, tough-pitch	C11300, C11400, C11500, C11600	X	X	X	X	X	X	X
FRTPT	Fire-refined, tough-pitch	C12500		X	X	X	X	X	X
FRSTPT	Fire-refined tough-pitch with silver	C12900		X	X	X	X		X
			Oxygen-Free Coppers (Without use of Deoxidants)						
OFE	Oxygen-free, electronic	C10100	X	X	X		X	X	X
OF	Oxygen-free	C10200	X	X	X		X	X	X
OFS	Oxygen-free, silver-bearing	C10400, C10500, C10700	X	X	X		X	X	X
OFXLP	Oxygen-free, extra low phosphorus	C10300	X	X	X		X	X	X
OFLP	Oxygen-free, low-phosphorus	C10800	X	X	X		X	X	X
			Deoxidized Coppers						
DLP	Phosphorized, low-residual phosphorus	C12000		X			X	X	X
DLPS ^F	Phosphorized, low-residual phosphorus silver-bearing	C12100		X			X	X	X
DHP ^G	Phosphorized, high-residual phosphorus	C12200		X	X		X	X	X
DHPS ^F	Phosphorized, high-residual phosphorus silver-bearing	C12300					X	X	X
DPTE ^H	Phosphorized, tellurium-bearing	C14520		X					X
			Other Coppers						
	Sulfur-bearing	C14700		X					X
	Zirconium-bearing	C15000		X	X		X		X
PTE	Tellurium-bearing	C14500		X					X

Slika 11. Klasifikacija bakra prema ASTM B224-16(2022)

5.1.4. Temeljni zahtjevi i ispitivanja

Norma ASTM B49-20 opisuje zahtjeve za materijale obuhvaćene ovom normom, te potrebna ispitivanja, od kojih su neka neobavezna i praktično se koriste za internu kontrolu procesa.

- analiza kemijskog sastava – opisana ranije i prikazana na slici 9.
- ispitivanje električne otpornosti - zahtjevana električna otpornost (na 20 °C, u žarenom stanju, meki bakar) za UNS C10100 je 101,00% IACS min., dok je za sve ostale 100,00% IACS min.
- provjera dimenzija – osigurava se da bakrena šipka zadovoljava specificirani promjer i dopuštena odstupanja.
- analiza mikrostrukture – ovim se ispitivanjem analizira unutarnja struktura bakra pomoću mikroskopa.
- ispitivanje na vlačno istezanje – minimalno produljenje za bakrenu šipku obrađenu vrućim valjanjem ili žarenjem iznosi 30% na duljini od 10 inča (250 mm)
- ispitivanje krutosti (savijanje) – provodi se samo na bakru bez kisika kako bi se procijenila njegova osjetljivost na vodikovu krutost. OFE bakar mora izdržati najmanje deset (10) obrnutih savijanja bez pucanja, a OF bakar najmanje osam (8).
- ispitivanje površinskog oksida – mjeri se debljina oksidnog sloja na površini šipke (očišćene, žarene ili hladno obrađene) koja ne smije prelaziti 7.5×10^{-8} m.
- ispitivanje torzijom (uvijanjem) – koristi se za internu kontrolu procesa, nije obavezno.
- elektromagnetsko ispitivanje vrtložnim strujama - koristi se za otkrivanje površinskih diskontinuiteta, nije obavezno.

U normi je detaljno opisano kako se provodi svaka ova analiza i ispitivanje, izrada izvješća o ispitivanju i izrada certifikata kojim se dokazuje ispunjenje zahtjeva iz norme, a sve kako bi se osigurao sveobuhvatan pristup kvaliteti proizvoda za njegovu pouzdanu upotrebu u električnim sustavima. Upravljanje otpadom koji nastaje prilikom prerade bakrenih šipki opisanih ovom normom nije dio zahtjeva norme, ali su primjeri dobre prakse objašnjeni u dodatku norme, kao informacije koje nisu obavezne..

5.1.5. Revizije i ažuriranja

ASTM norme podliježu periodičnim pregledima i ažuriranjima, kako bi ostale relevantne i odražavale najnovija industrijska i tehnološka dostignuća.

Prethodna verzija ASTM B49, prije ove aktualne, imala je oznaku ASTM B49-17, tj. potvrđena je službenom 2017. god. Izvorna verzija norme nastala je 1923. god. pod nazivom „Standardna specifikacija za bakrenu žicu za izvlačenje za električne namjene“. Napredak u tehnologijama proizvodnje i ispitivanja bakra, te promjenjive i zahtjevnije potrebe elektro industrije, dovele su do brojnih revizija ove norme i promjena u nazivu. Npr. tijekom godina B49 je proširen kako bi uključio zahtjeve i metode ispitivanja tankog oksidnog sloja prisutnog na površini šipke ili žice.

Trenutno je unutar odbora B05 u tijeku rasprava za reviziju posljednje verzije norme, pod oznakom ASTM WK85830, započeta u travnju 2023. god. Cilj ove revizije je uključivanje recikliranog bakra (ETP-R, UNS C11050) u normu, zbog sve veće upotrebe recikliranog bakra u proizvodnji električnih bakrenih šipki, ali i većeg fokusa na ekološki održivi razvoj. Međutim, to zahtijeva prilagodbu kemijskog sastava bakra kako bi se uzele u obzir potencijalne nečistoće (razmatraju se veće dopuštene količine za željezo (Fe), kositar (Sn) i nikal (Ni)), ali i kako bi se zadržala ključna fizikalna svojstva poput električne vodljivosti ili tehnološka poput sposobnosti žarenja. Revizija je još uvijek nije usvojena jer nije postignut konsenzus, a norme se, kao što znamo, i usvajaju općim slaganjem ili suglasnošću svih relevantnih dionika s jednakim pravom glasa.

5.2. Usporedba označavanja bakra i bakrenih legura prema ASTM i EN normama

Radi boljeg prepoznavanja različitih vrsta bakra opisanih u normi ASTM B49-20 u tablici IV. prikazana je usporedba istih s europskim EN normama, odnosno normama koje su usvojene i kao hrvatski normativni dokumenti [7], [9] .

Za razliku od ASTM normi, u kojima se koristi opisani jedinstveni sustav označavanja UNS, kod europskih normi primjenjuje se CEN sustav numeriranja prema normi HRN EN 1412:2016 „Bakar i legure bakra - - Europski sustav obrojčivanja“. CEN sustav koristi šesteroznakovnu oznaku – prve dvije oznake su slovne (prvo slovo „C“ označava bakar i legure, drugo slovo označava oblik proizvoda (npr. W – valjani, C – lijevani)), zatim slijede tri znamenke koje identificiraju materijal, a posljednje slovo označava klasifikaciju skupine legura. Međutim, vrlo često su unutar EN normi poziva i na tzv. kompozicijski sustav označavanja, koji je opisan u ISO 1190-1:1982, a temelji se na simbolima elemenata i redoslijedu udjela legirajućih elemenata prema veličini (npr. oznaka CuZn38Pb2 označava olovnu mjed koja sadrži 60% bakra i 2% olova). CEN sustav označavanja pruža strukturiraniju i detaljniju klasifikaciju u usporedbi s ISO kompozicijskim sustavom, ali je potrebno dobro razumijevanja oba sustava za prepoznavanje materijala. Važno je napomenuti da se u smislu prepoznavanja koristi i označavanje stanja materijala (npr. R za vlačnu čvrstoću, H za tvrdoću), prema normi HRN EN 1713:2008 „Bakar i legure bakra - - Uvjeti označavanja materijala“.

Tablica IV. Usporedba oznaka bakra prema ASTM i EN normama

ASTM kratka oznaka	ASTM(UNS) oznaka materijala	EN kratka oznaka	EN (CEN) oznaka materijala
ETP	C11000	Cu-ETP	CW004A
ETP	C11040	Cu-ETP1	CW003A
OFE	C10100	Cu-OFE	CW009A
OF	C10200	Cu-OF	CW008A
FRHC	C11020	Cu-FRHC	CW005A
FRHC	C11025	Cu-FRHC	CW005A

6. ZAKLJUČAK

Zbog svog širokog raspona primjene i velikog broja različitih vrsta bakra i bakrenih legura, relativno široke dostupnosti, pa i prihvatljivosti u cijeni, svestranost bakra čini ga izvrsnim metalom za inženjerske svrhe. Međutim, male ali suptilne razlike različitih vrsta bakra i bakrenih legura, kao i tehnologija izrade pojedinih proizvoda od bakra, mogu značajno utjecati na njegova opća svojstva i učinkovitost u primjeni. Kod propisivanja Tehničkih uvjeta za bakreno uže za uzemljenje koje se koristi u HEP-ODS-u moraju se dobro prepoznati norme koje se odnose na konstrukcijske značajke užeta, ali jednako tako i za materijal od kojeg se izrađuju žice, odnosno vodiči koji sačinjavaju uže. To je jako važno s aspekta namjene bakrenog užeta za uzemljenje u električnim sustavima, jer se ispravnim odabirom bakra postižu njegova optimalna svojstva, ovisno o načinu i mjestu primjene. Pri tome se neizbježno postižu kompromisi u smislu električne i toplinske vodljivosti, mehaničkih svojstava (čvrstoća, tvrdoća, i sl.), kemijskih svojstava (otpornost na koroziju, i sl.), itd., a nije zanemariv ni ekonomski utjecaj u smislu cijene, budući da vrlo male nečistoće ili postotak legirajućih elemenata u bakru i užetu u cjelini, ovisno o prisustvu kojeg kemijskog elementa se radi, značajno utječu na njegove karakteristike u pogonu. ASTM norme, sa svojim globalnim pristupom i značajem, pokrivaju vrlo širok spektar različitih normi za materijale primjenjive u elektrotehnici, a bakar je u tom pogledu neprikosnoven i nezamjenjiv. Norma ASTM B49-20 propisuje detaljne zahtjeve za bakrene šipke kao poluproizvode iz kojih se „izvlače“ žice (vodiči) koje se ugrađuju u bakreno uže, a obzirom na sve obrađeno u referatu kao najprikladniji se pokazuje elektrolitski bakar ASTM oznake ETP-Cu, jedinstvenog broja C11000, odnosno po EN normama Cu-ETP bakar, oznake CW004A.

7. LITERATURA

- [1] N. Trbojević, „Normizacija i razvoj proizvodnih sustava“, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2014.
- [2] F. Majdandžić, „Uzemljivači i sustavi uzemljenja“, GRAPHIS, lipanj 2004.
- [3] Tehnička specifikacija za Cu užad za uzemljenje, HEP-ODS, svibanj 2022.
- [4] Bakar, Hrvatska tehnička enciklopedija, mrežno izdanje, LZMK, 2013.-2025.
- [5] Tehnički priručnik, Končar, studeni 1991.
- [6] ASTM International, www.astm.org
- [7] ASTM B49-20, „Standardna specifikacija za bakrene šipke za električne namjene“, mrežno izdanje, travanj 2020.
- [8] ASTM B224-16(2022), „Klasifikacija bakra“, mrežno izdanje, listopad 2022.
- [9] HRN EN 1412:2016, „Bakar i legure bakra – Europski sustav označivanja“, HZN, prosinac 2016.