

FORENZIČKA ISTRAŽIVANJA
KRATKOG SPOJA KAO UZROKA POŽARA

Milan Blagojević¹
*Radovan Radovanović²
Sreten Roganović³

¹*Fakultet zaštite na radu, Univerzitet u Nišu*

²*Kriminalističko-policijska akademija, Beograd*

³*Ministarstvo unutrašnjih poslova Republike Crne Gore*

Sažetak: U radu je dat prikaz laboratorijskog ispitivanja kratkih spojeva sa idejom otkrivanja prisustva O₂ u provodnicima u kojima je uočeno stapanje u toku požara. Korišćeni su optički mikroskop i skenirajući elektronski mikroskop (SEM) sa energodisperzionim spektrometrom (EDAX), kao i strukturna analiza bazirana na rendgenskoj difrakciji. Priprema uzoraka je obuhvatila brušenje, poliranje i hemijsko nagrivanje. Takođe, u svim slučajevima je utvrđeno da li je provodnik na kome je uočeno topljenje bio u atmosferi koja sadrži ili ne sadrži O₂. Za pravilno tumačenje rezultata laboratorijskog ispitivanja neophodno je poznavanje okolnosti koje su dovele do nastanka požara i dinamike njegovog razvoja. Da bi se doneo pouzdan zaključak o uzroku, potrebno je napraviti ili uviđaj na mesta požara ličnim prisustvom, ili kasniji uvid u mesto događaja uz pomoć foto-dokumentacije, da bi se video centar požara i ocenila dinamika razvoja požara. Samo tada je moguće izjašnjavanje o prirodi ispitivanih kratkih spojeva, tj. donošenje odluke o tome da li je bio u pitanju primarni ili sekundarni kratki spoj.

Ključne reči: kratki spoj, požar, strukturna analiza, SEM, EDAX.

* E-mail: radovan.radovanovic@kpa.edu.rs

1. Uvod

U skoro svakom većem požaru koji se dešava u objektima, vatra vremenom dolazi do električne instalacije, tako da pre ili kasnije dolazi do gorenja električnih kablova i nastanka kratkog spoja. Ako se ovo desi u pretpostavljenom centru požara, lica koja istražuju uzrok nastanka požara neizbežno će se suočiti sa pitanjem da li je „električna aktivnost“ u izgorelim instalacijama uzrok ili posledica požara. Na žalost, veza između struje i nastanka požara se često pogrešno tumači od strane mnogih istraživača. Zbog toga, prema statistici uzroka požara kod nas, 25% pa čak i 40% požara imaju „električno“ poreklo, ali se iza tih podataka krije veliki broj pogrešnih procena o uzroku nastanka požara. Naime, statistika se formira na osnovu izveštaja o požaru u kojima se zahteva da se unese pretpostavljeni uzrok. To može biti urađeno od strane vatrogasca koji nije imao nikakvu obuku u istraživanju uzroka požara i po kome je izgorela instalacija jasan dokaz da je to izazvalo požar, iako je gotovo sigurno požar izazvao gorenje kablova. Dalje, za veliki broj požara se smatra da su „električni“ ukoliko se dogode zbog pogrešnog korišćenja nekog električnog aparata. Na primer, požar izazvan paljenjem odeće koja se nalazila blizu grejalice, može biti okarakterisan kao požar čiji uzrok nastanka je bila električna struja.

Opseg pogrešnih izveštaja i njihov uticaj na statistiku može se videti kroz skorašnje ispitivanje požara od strane *Forensic Science Service* (FSS) laboratorije „Hantigdon“ u Velikoj Britaniji u periodu od pet godina. Ispitivanje je pokazalo da je samo za 2% ispitivanih požara dokazano da imaju poreklo u električnoj struji. Ovde se ne radi o tome da je FSS laboratorija pozivana da ispita samo sumnjive požare, već je za vreme ispitivanja policija imala naređenja da od laboratorije traži ispitivanje uzroka svih požara. Moglo bi se očekivati da bi, ukoliko bi struja bila glavni uzrok nastanka požara, to značajno uticalo na statistiku uzroka požara, ali se uvidelo da požari za koje je električna struja utvrđena kao uzrok, imaju udeo od samo 6% od ukupno ispitanih fatalnih požara. Takođe, izveštaji američke organizacije NFPA (*National Fire Protection Association*) pokazuju da je, na primer, za 52.500 požara koji su se dogodili 2006. godine u privatnim kućama i stanovima, utvrđeno da samo 13 % imaju „električni“ uzrok. Međutim, u skoro polovini požara (46%) koji su se desili u periodu od 2003. do 2006. godine, registrovani su tragovi na električnim instalacijama i uređajima (Hall, 2009).

Poteškoće u interpretaciji tragova koji nastaju na provodnicima imaju za posledicu stalne pokušaje da se pronađu bolji naučni metodi za ispitivanje uzroka koji ukazuju postojanje kratkog spoja, koji bi kategorično

odgovorili na postavljeno pitanje o uzroku požara. Na taj način, moguće je pokazati da su provodnici zagrevani usled nekog drugog kvara (a ne od strane požara) pre nastanka kratkog spoja. Najkorišćeniji metodi koriste analizu bakra u provodniku kako bi utvrdili nivo kiseonika ili drugog nemetala koji je „pokupljen” u procesu zagrevanja, ili koriste skenirajuće elektronske mikroskopske (SEM) da bi ispitali mikrokristalnu strukturu.

U ovom radu obrađena su dva najpouzdanija metoda koji se koriste u laboratoriji za utvrđivanje kratkog spoja kao uzroka požara: prvi metod se oslanja na ispitivanja optičkih karakteristika provodnika na mestu kratkog spoja pomoću elektronskih mikroskopa; drugi metod koristi difrakciju X-zraka za utvrđivanje prisustva drugih hemijskih elemenata u bakru, na mestu na kome je nastao kratki spoj.

2. Laboratorijsko ispitivanje kratkih spojeva

2.1. Metalografska priprema i vizuelno ispitivanje

Da bi se sproveo postupak laboratorijskog ispitivanja vrste nastalog kratkog spoja na provodniku koji je uzet iz požara, potrebno je na uzorku koji je uzet za ispitivanje prvo izvršiti metalografsku pripremu.¹ Metalografska priprema obuhvata nekoliko koraka.

1) Izrezivanje uzorka. Posle vizuelnog posmatranja bira se mesto izrezivanja uzorka, zavisno od cilja ispitivanja. Pri sečenju uzorka (mehaničkim ili termičkim metodima) treba voditi računa da ne dođe do strukturnih promena. Preporučljivo je da se ivice uzorka zaoble, da uzorak pri daljoj pripremi ne bi ošteti sredstva za brušenje i poliranje, brusni papir, filc, itd.

2) Brušenje uzorka. Najpre se izvodi turpijama ili na brusilicama (grubo brušenje), a nadalje pomoću brusnih papira, do željene hrapavosti. Pri brušenju treba voditi računa o zagrevanju uzorka i obezbediti potrebno hlađenje.

¹ *Metalografija* je deo nauke o metalima i legurama, koji se bavi vezama između dijagrama stanja, struktura i osobina metala i legura. Njen je zadatak da pri određenom hemijskom sastavu, iz pregleda makrostrukture i mikrostrukture, unapred proceni svojstva i ponašanje metala ili legure i da ukaže na najpovoljniju strukturu za proces prerade ili primene. Metalografska ispitivanja se u svakodnevnoj praksi primenjuju u svim slučajevima prijemne, tekuće i završne kontrole, u cilju provere kvaliteta i uočavanja eventualnih grešaka. Metalografska ispitivanja se najčešće dopunjuju ostalim vidovima ispitivanja sa razaranjem i bez razaranja, čime se dobija kompletna slika o strukturi i stanju metala i legura.

3) Poliranje uzorka. Poliranje ima za cilj da sa površine uzorka ukloni tragove koji su ostali posle brušenja i da površini dâ ogledalasti metalni sjaj. Može se izvesti *mehaničkim* ili *elektrolitičkim* postupkom. Kao sredstvo za poliranje koristi se suspenzija glinice (Al_2O_3) ili magnezijum-oksida (MgO).

4) Nagrizanje uzorka. Hemijsko nagrizanje uzorka ima za cilj bolje uočavanje mikrostrukture (određivanja veličine zrna). Kao sredstva za nagrizanje primenjuju se odgovarajući *hemijski reaktivi* i nagrizaju se isključivo granice zrna.

Posle metalografske pripreme uzorka slede vizuelna ispitivanja koja se, generalno gledajući, obavljaju pomoću sledeće dve grupe metoda.

1) **Makroskopska ispitivanja** – obuhvataju vizuelnu kontrolu i uvećanje do 20 puta.

2) **Mikroskopska ispitivanja** – primenjuju se za detaljniju analizu unutrašnje građe i to:

- optičkim mikroskopima sa uvećanjem od 20 do 2.000 puta i
- elektronskim mikroskopima sa uvećanjem od 50 do 1.500.000 puta.

2.2. Postupak ispitivanja kratkog spoja u laboratoriji

Postupak ispitivanja vrste kratkog spoja u laboratoriji podrazumeva, pre svega, simuliranje primarnih i sekundarnih serijskih kratkih spojeva. Iz provodnika koji je neoštećen (u fabričkom stanju), uzima se uzorak na kome su takođe izvršena sva mikrostrukturna ispitivanja, da bi se uočile razlike u provodniku koje nastaju kao posledica požara. Za simulaciju kratkih spojeva najčešće se koristi provodnik punog preseka od $1,5\text{ mm}^2$ – lak žica. Komadi žice su preko izolovanih klema i kabla utaknuti u komandnu tablu preko 25 A sklopke na 220 V.

Primarni kratki spoj (spoj pre požara), do koga dolazi na vazduhu u sredini koja je bogata kiseonikom, ostvaren je dodirivanjem žica pri kojem je došlo do stvaranja električnog luka i stapanja materijala provodnika – Cu. **Sekundarni kratki spoj** (spoj u toku požara), do koga dolazi u odsustvu kiseonika, a u prisustvu N_2 i gasovitih produkata sagorevanja (CO, CO_2 itd), ostvaren je dodirivanjem provodnika u laboratorijskom boksu, koji je prethodno doveden do pritiska od 10^{-2} mbar i u koji je ubačen N_2 do pritiska od 100 mbar (slika 1). I u ovom slučaju dolazilo je do stvaranja električnog luka i stapanja Cu.



Slika 1. Boks u kome je simuliran sekundarni kratki spoj i izgled prespojenih provodnika

Metalografska priprema uzorka za makroskopska i mikroskopska ispitivanja izvršena je na *Buhler*-ovom stolu za brušenje i poliranje, sledećim redosledom:

1. brušenje je izvršeno sa SiC papirima finoće od 80, 120, 220, 360, 400, 600, 800 i 1000;
2. poliranje je izvršeno dijamantskom pastom finoće od 10, 5 i 1 μm na *Buhler*-ovoj *micro cloth* tkanini uz dodavanje parafinskog ulja;
3. ispolirani uzorci oprani su u etanolu u ultrazvučnoj kadi;
4. za posmatranje na optičkom mikroskopu uzorci su hemijski nagriženi u rastvoru HCl i FeCl_3 u etanolu.

3. Oprema koja je korišćena za izvođenje eksperimenta

3.1. Optički mikroskop

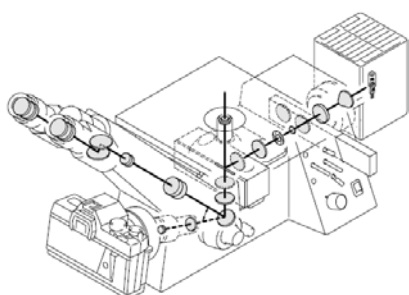
Princip rada optičkih mikroskopa zasniva se na usmeravanju i propuštanju svetlosnog zraka kroz sistem sočiva, prizmi, filtera, propusnih ogledala i odbijanja zraka od pripremljene površine uzorka ka objektivu i okularu, na kome se posmatra uvećana slika strukture. Pored posmatranja mikrostruktura pojedinih zona uzorka na optičkim mikroskopima, moguće je i fotografisanje mikrostrukture. Postoji veliki broj tehnika za kvantitativnu analizu metalografskih uzoraka koje se mogu primenjivati na uzorcima od metala, na nemetalima i kompozitnim materijalima. Američko društvo za ispitivanje materijala (ASTM - *American Society for Testing and Materials*)

izdalo je standarde kojima se definišu test-metodi za kvantitativno opisivanje mikrostrukture materijala.²

Određivanje veličine metalnog zrna u skladu sa ASTM standardima izvodi se merenjem pojedinih zrna na optičkom mikroskopu. Najčešće korišćeni metodi su:

- metod poređenja veličine zrna uzorka sa slikama etalona i
- metod brojanja zrna obuhvaćenih površinom i brojanja po liniji.

Metod poređenja veličine zrna najčešće se koristi; ASTM je dao standard za metod poređenja veličine zrna koji se zasniva na poređenju slike zrna i etalona pri uvećanju 100:1. Uzorci koji su pripremljeni na način koji je opisan u prethodnom tekstu posmatrani su na *Axiovert 25 C*³ optičkom mikroskopu u polarizovanom svetlu (slika 2). Ovaj mikroskop pruža uvećanja od 50, 100, 200, 500 i 1000 puta i ima moć razlaganja od 2 μm .



Slika 2. *Axiovert 25 C* mikroskop - optička konstrukcija i spoljni izgled

Na osnovu rezultata eksperimenata načinjene su mikrofotografije koje su snimane pomoću analognog *Contax* fotoaparata pri različitim uvećanjima. Fotografije koje su dobijene tokom eksperimenata su prikazane u poglavlju 4.

3.2. Skenirajući elektronski mikroskop

Skenirajući elektronski mikroskopi (SEM) koriste se za dobijanje znatno uvećane slike objekta čija je veličina daleko ispod granice vidljivosti optičkih mikroskopa. Pomoću SEM mikroskopa mogu se dobiti informacije o morfologiji i rasporedu kristala unutar uzorka, kao i za dobijanje hemijskog sastava uzorka. Isti uzorci koji su ispitivani na optičkom mikroskopu

² Standardi ASTM E 112, ASTM E 1182, ASTM E 138, ASTM E 45 itd.

³ Carl Zeiss: *Axiovert 25 C - Inverted Reflected Light Microscope*.

ponovo su zatopljeni i prepolirani za analizu ovim mikroskopom. Izgled SEM mikroskopa *PHILIPS XL 20* sa EDAX-om koji je korišćen za analizu dat je na slici 3.



Slika 3. *PHILIPS XL 20* skenirajući elektronski mikroskop sa EDAX-om

SEM mikroskop postiže uvećanja do 100.000 puta, tj. ima moć razlaganja od ~ 2 nm uz napone ubrzanja od 30 keV. Energodisperziju spektroskopsku analizu (kvalitativnu i kvantitativnu) moguće je uraditi u tački po liniji i po površini, i to za elemente od rednog broja 4 tj. od Be. Osetljivost uređaja na prisustvo nekog elementa u uzorku iznosi 0.01 %. Uzorci su posle pripreme izvađeni iz mase za zatapanje i provodnom grafitnom trakom zalepljeni za nosače. Mikrografije strukture provodnika dobijene su pomoću ili skenirajućih ili rasutih elektrona, dok je energodisperziona analiza rađena po površini.

3.3. Difraktometar

Strukturna analiza uzoraka koji su nastali kratkim spojem izvršena je rendgenskom difrakcionom analizom na difraktometru *Siemens D500* (slika 4).

Difraktometar sa slike 4, *Siemens D500*, projektovan je za određivanje kristalografske strukture materijala, sastoji se od izvora monohromatskog rendgenskog zračenja kome se izlaže materijal i meri ugao difrakcije koji nastaje kao posledica same veličine kristalne rešetke i rastojanja između čvorova u kristalnoj rešetki (Cullity, 1960).

Pre rendgenske difrakcione analize uzorci su izvađeni iz mase za zatapanje. Difrakciona analiza izvršena je sa $K\text{Cu}_{\alpha}$, filtriranim zračenjem u opsegu uglova 2θ od 10° do 90° sa brzinom skeniranja od $0.02^\circ/\text{s}$.



Slika 4. Difraktometar Siemens D500

4. Rezultati laboratorijskih ispitivanja

4.1. SLUČAJ 1 - Sekundarni kratki spoj

Za laboratorijsko ispitivanje korišćeni su uzorci koji su uzeti sa mesta požara – bakarni provodnici, koji su za ispitivanje (i u ovom tekstu) obeleženi kao U0, U1 i U2. Cilj ispitivanja uzoraka bilo je utvrđivanje vrste, vremena i okolnosti nastanka termičkih oštećenja, tj. bilo je potrebno utvrditi da li su oštećenja na bakarnim provodnicima nastala pre, u toku ili posle završetka požara. Bilo je potrebno proceniti do koje temperature su uzorci bili zagrejani i, na osnovu vrste utvrđenih termičkih oštećenja, doneti zaključke o eventualnom uzorku nastanka požara.

Pre početka laboratorijskih ispitivanja, vizuelnim ispitivanjem bakarnih provodnika sa oznakama U0, U1 i U2, uočene su kuglice istopljenog metala na krajevima provodnika, kao posledica kratkog spoja.

4.1.1. Priprema uzoraka za analizu i metodi ispitivanja

Sa svih bakarnih provodnika sečicama su isečena po dva uzorka, po jedan sa svakog kraja provodnika. Uzorci su zatopljeni u hladno-polimerizujući dvokomponentni akrilat, zatim brušeni „na moko“, SiC papirima finoće od 80 do 800, do približno polovine prečnika provodnika i, na kraju, polirani u pravcu dužine provodnika dijamantskom pastom finoće od 2-5 μm i od 0-2 μm . Uzorci čeličnih cevi isečeni su modelarskom testericom, po dva uzorka iz svake cevi. I ovi uzorci su zatapani, brušeni i polirani.

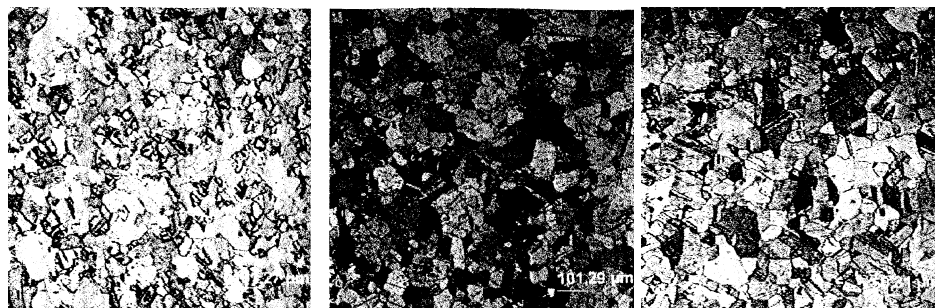
Metalografska priprema uzoraka bakarnih provodnika završena je hemijskim nagrivanjem u rastvoru 50 ml HNO_3 , 50 ml H_2O . Priprema uzo-

raka cevi za metalografsku analizu izvršena je hemijskim nagrizanjem u rastvoru 2ml HNO₃, 98 ml etil-alkohola.

Primenjeni metodi ispitivanja posle vizuelnog pregleda bili su: mikrostrukturno ispitivanje optičkim mikroskopom i rendgenska strukturalna analiza rendgenskom difrakcijom. Mikrostrukturna ispitivanja vršena su optičkim mikroskopom *Carl Zeiss Axioplan 25 C* pri različitim uvećanjima, dok je za rendgensku strukturalnu analizu korišćen uređaj za rendgensku difrakciju – difraktometar *Siemens D500*. Sva ispitivanja obavljena su sa Ni filtrovanim CuK_α zračenjem i to u opsegu uglova 2θ od 10 do 90°. Za identifikaciju prisutnih faza, korišćena je JCP baza podataka za standarde.

4.1.2. Rezultati ispitivanja bakarnih provodnika optičkim mikroskopom

Mikrostrukture ispitivanih bakarnih provodnika prikazane su na slikama koje slede.



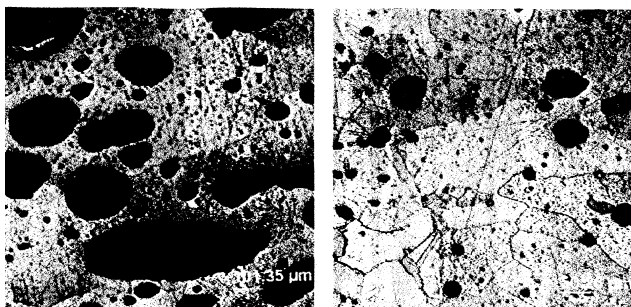
Uzorak U0

Uzorak U1

Slika 5. *Uzorci U0 i U1*

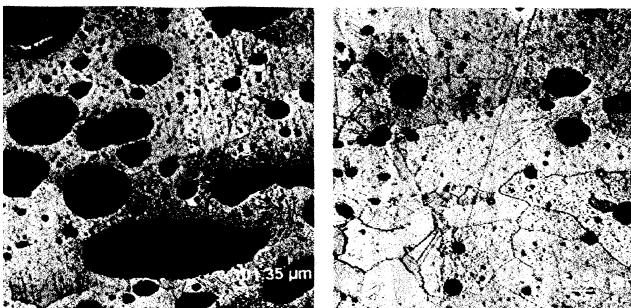
Sa slike 5. vidi se da mikrostrukturu uzorka U0 čine poligonalna zrna bakra, dok se kod uzorka U1 zapaža uticaj dejstva visoke temperature, koji se ogleda u posledicima žarenja unutar zrna.

Kod uzorka U2,1 (slika 6) zapaža se da je došlo do stapanja materijala ($T > 1083^{\circ}\text{C}$), a takođe u kapljici stopljenog i očvrnutog bakra zapažaju se „krateri“ nastali dejstvom električnog luka. U strukturi ovog provodnika ne zapaža se prisustvo oksida i bakra Cu₂O.



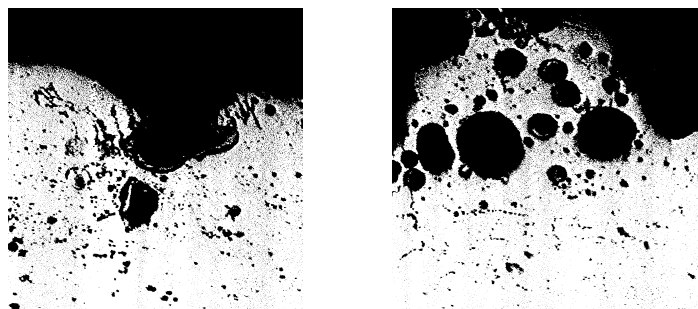
Slika 6. *Uzorak U2,1*

U uzorku U2,2 (slika 7) se zapaža da je došlo do stapanja provodnika, odn. struktura stopljene kapljice je dendritna (slika 7. desno). U međudendritnom prostoru se zapaža Cu_2O koji je izdvojen, što ukazuje na temperaturu višu od 1083°C i prisustvo kiseonika u atmosferi, tj. na *primarni kratki spoj*.



Slika 7. *Uzorak U2,2*

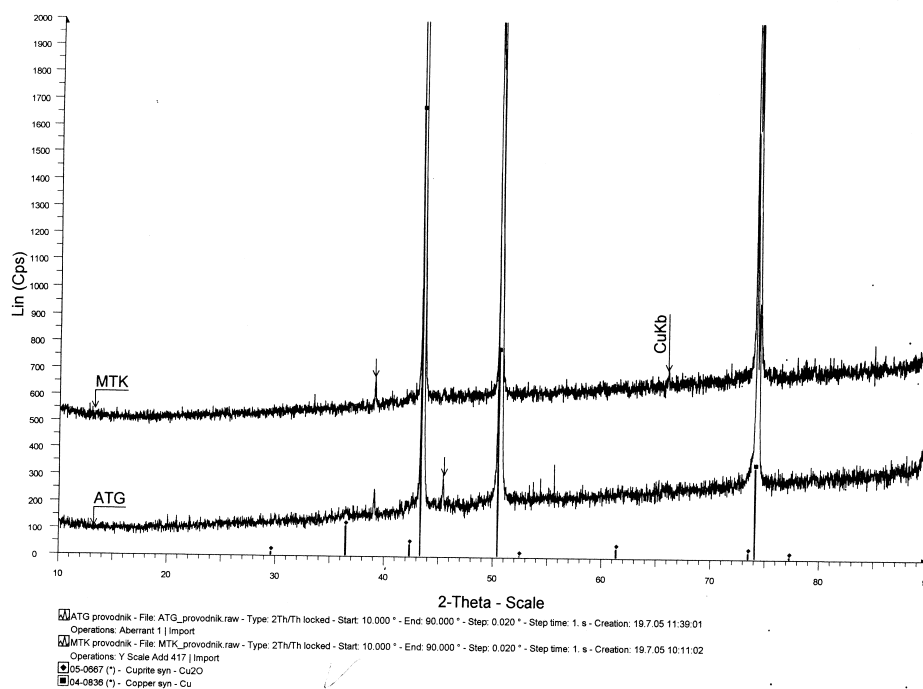
Na slici 8. prikazan je izgled provodnika U2,3. Zapaža se da je došlo do topljenja materijala, tj. obrazovanja kapljice očvrnutog bakra. Dejstvo električnog luka očigledno je zbog prisustva „kratera“, a u strukturi *nije prisutan oksid bakra* Cu_2O .



Slika 8. Uzorak U2,3

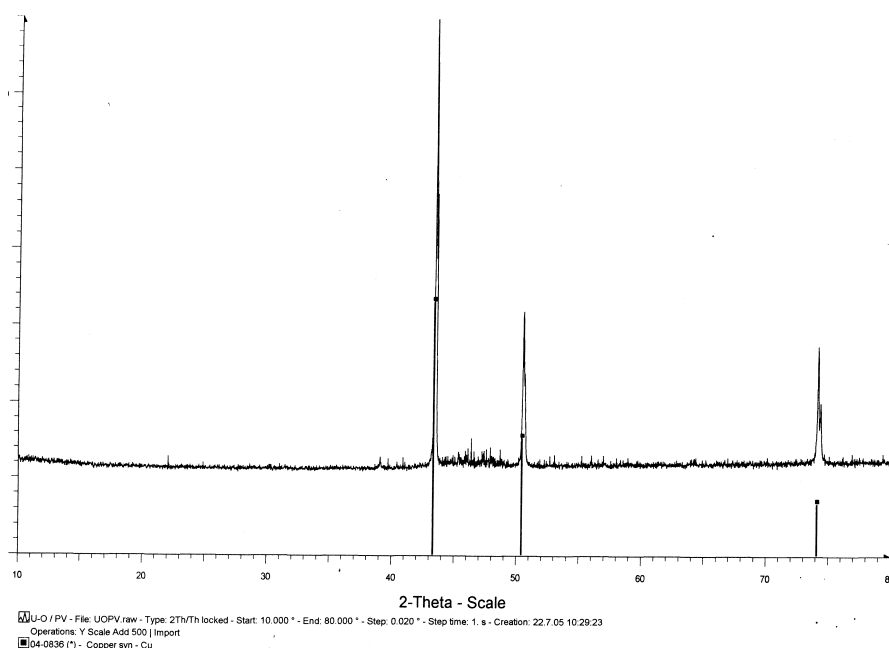
4.1.3. Rezultati ispitivanja bakarnih provodnika rendgenskom difrakcijom

Difraktogrami uzoraka U1 (označeni sa *MTK*) i U2,2 (označeni sa *ATG*) prikazani su na slici 9. Na difraktogramima uzorka U2,2 uočavaju se „pikovi“ koji odgovaraju oksidu bakra Cu_2O .



Slika 9. Difraktogrami uzoraka U1 i U2,2

Poređenja radi, na slici 10. prikazan je difraktogram bakarnog provodnika koji nije bio izložen dejstvu požara (komercijalni, nekorišćeni provodnik istog preseka kao i U2).



Slika 10. Difraktogram komercijalnog - nekorišćenog provodnika istog preseka kao i U2

4.1.4. Zaključak na osnovu laboratorijskog ispitivanja

Do promene u strukturi materijala provodnika došlo je usled dejstva visoke temperature. U svim ispitanim uzorcima došlo je do stapanja materijala. U provodnicima U0 i U1 nije uočeno prisustvo Cu_2O , tj. promene su nastale kao *posledica sekundarnog kratkog spoja* u toku požara.

U ispitanim uzorcima U2,1 i U2,3 nije uočeno prisustvo Cu_2O , tj. promene su takođe nastale su kao *posledica sekundarnog kratkog spoja* u toku požara.

Najzad, u uzorku U2,2 došlo je do stapanja materija i u provodniku je prisutan Cu_2O , što ukazuje na to da je u ovom provodniku došlo do *primarnog kratkog spoja*.

4.2. SLUČAJ 2 - Primarni kratki spoj

Za laboratorijsko ispitivanje u ovom slučaju dobijene su četiri grupe uzoraka. Uzorci su prikupljeni sistematski, idući od mesta koje je najudaljenije od centra požara, do samog centra požara. Prvu grupu uzoraka čine četiri bakarna provodnika preseka 10 mm^2 koji su uzeti od stuba do mesta prekida (uzorci 1-1, 1-2, 1-3 i 1-4). Drugu grupu uzoraka čine četiri provodnika od 10 mm^2 uzeti od mesta prekida do glavnog razvodnog ormara (uzorci 2-1, 2-2, 2-3 i 2-4). U trećoj grupi uzoraka su bakarni provodnici preseka $2,5 \text{ mm}^2$ uzeti ispod glavnog razvodnog ormara (uzorci 3-1 i 3-2). Četvrtu grupu uzorka čine bakarni provodnici preseka od $5 \times 2,5 \text{ mm}^2$ koji su uzeti sa samog centra požara (uzorci 4-1 i 4-2).

U ovom radu su prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja samo za predstavnike prve i četvrte grupe uzoraka (uzorak 1-1 iz najudaljenije i uzorak 4-1 iz grupe koja je najbliže centru požara). Rezultati ispitivanja ostalih grupa zbog nedostatka prostora nisu prikazani, i mogu se dobiti od autora.

I ovde je, kao i u prethodno opisanom slučaju, cilj ispitivanja bilo utvrđivanje vrste, vremena i okolnosti nastanka termičkih oštećenja na ispitivanim provodnicima, da bi se došlo do zaključka da li su oštećenja nastala pre, u toku ili posle požara. Na osnovu vrste utvrđenih termičkih oštećenja trebalo je doneti zaključak o eventualnom uzorku nastanka požara.

Vizuelnim pregledom svih ispitivanih uzoraka uočeni su tragovi sagorevanja. Na uzorku 1-1 i 1-3 zapažene su kuglice od istopljenog materijala, a na uzorku 1-4 se vidi da su dva provodnika prespojena. Na uzorcima 2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 3-1 i 3-2 zapažena su mehanička oštećenja na provodnicima što ukazuje na to da su nastala pod dejstvom električnog luka. Na uzorku 4-1 se jasno videlo da su svih pet provodnika prespojani.

4.2.1. Priprema uzoraka za analizu i metodi ispitivanja

Isečeni uzorci bakarnih provodnika pripremljeni su na isti način kao i slučaju 1 – zatopljeni su, brušeni i polirani u pravcu dužine provodnika. Metalografska priprema uzoraka završena je hemijskim nagrivanjem u rastvoru koji čini 5 gr $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ i 25 ml HCl u 70 ml H_2O . Za rendgensku difrakciju odabrani uzorci očišćeni su od akrilata i sa spoljne površine ovih uzoraka sastrugani su ostaci sagorevanja.

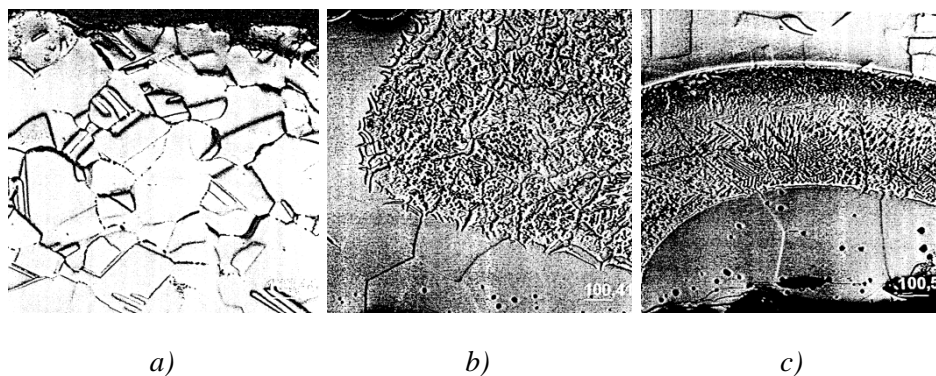
Mikrostrukturna ispitivanja vršena su kao i prethodnom slučaju na optičkom mikroskopu *Carl Zeiss Axioplan*, a za rendgensku strukturnu analizu metodom rendgenske difrakcije korišćen je difraktor *Siemens D500*. Sva

ispitivanja izvršena su sa Ni filtrovanim CuK_α zračenjem i to u opsegu uglova 2θ od 10° do 80° . Za identifikaciju prisutnih kristalnih faza korišćena je JCP baza podataka za standarde.

Uzorak 1-1

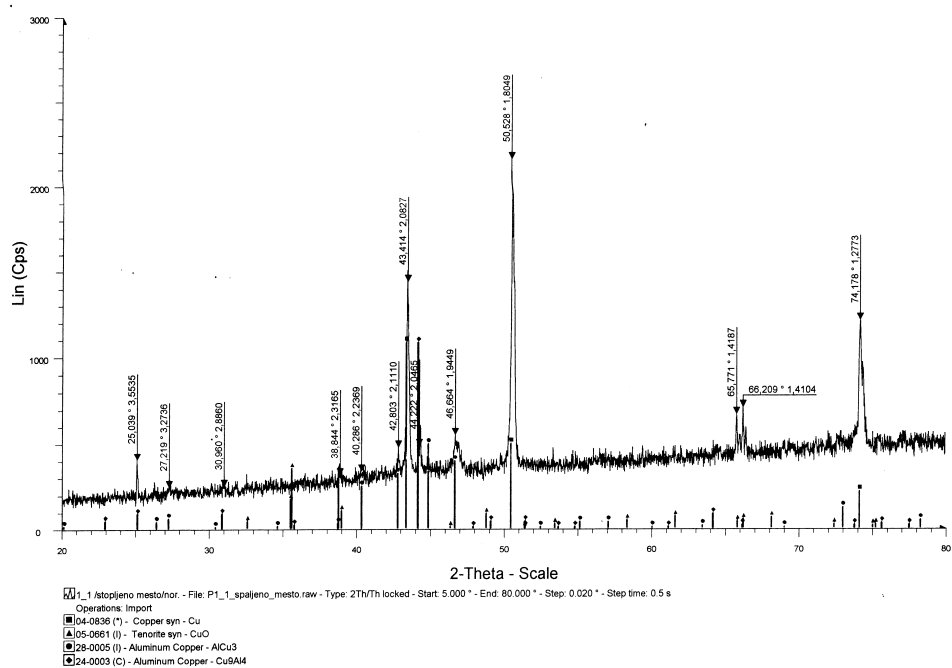
Sa mikrofotografije uzorka 1-1 sa slike 11a, vidi se da je došlo do lokalnog topljenja bakarnog provodnika po granicama zrna. Unutar granica zrna zapažaju se pojedinačni delići Cu_2O , što ukazuje na to da je pri topljenju bakarnog provodnika 1-1 u sredini bio prisutan O_2 .

Na slikama 11b i 11c vidi se istopljeni materijal na provodniku. Materijal nije Cu jer se vidi da je došlo do legiranja. U stopljenom materijalu na bakarnom provodniku zapaža se poroznost, pri čemu pravilan oblik pora ukazuje na gasnu poroznost.



Slika 11. *Uzorak 1-1*

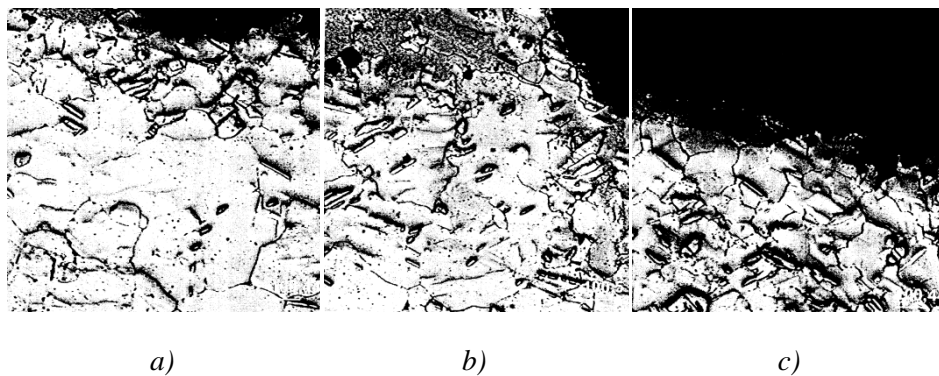
Difraktogram ovog uzorka (slika 12) pokazuje prisustvo Cu, Cu_2O , Cu_3Al , kao i Cu_9Al_4 , što ukazuje na činjenicu da je stopljeni materijal Al. Na drugoj strani, prisustvo Cu_2O ukazuje na to da su se sve promene na materijalu dogodile u prisustvu O_2 .



Slika 12. Rendgenogram uzorka 1-1

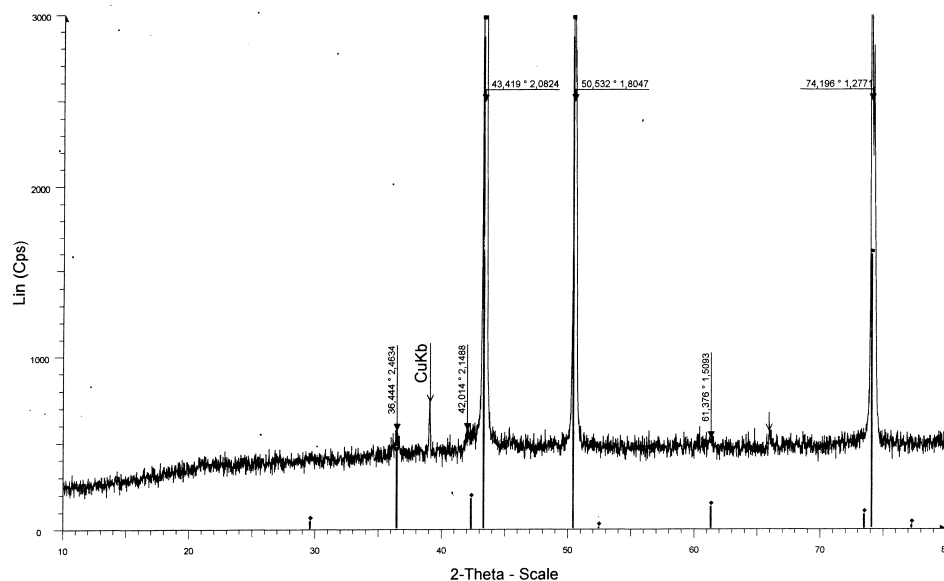
Uzorak 4-1

Sa slike 13 (a, b, c), zapaža se da je došlo do topljenja provodnika. U granicama zrna provodnika zapažaju se uključci Cu_2O što ukazuje na to da je do ovog topljenja došlo u prisustvu O_2 , tj. u prisustvu vazduha.



Slika 13. Uzorak 4-1

Prethodni zaključak potvrđuje difraktogram uzorka 4-1 koji je prikazan na slici 14.



Slika 14. Difraktogram uzorka 4-1

4.2.2. Zaključak na osnovu laboratorijskog ispitivanja

Na provodnicima 1-1, 1-3, 3-1, 3-2, 4-1 i 4-2 uočene su promene koje odgovaraju **primarnom kratkom spoju**. Primarni kratki spoj na bilo kojem od pomenutih provodnika mogao je biti uzrok požara. Na osnovu izvršenih mikrostrukturnih ispitivanja nije moguće utvrditi vremenski redosled promena na pomenutim provodnicima; drugim rečima, nije moguće odrediti da li se primarni kratki spoj na pojedinim provodnicima odigrao istovremeno ili sa nekim malim vremenskim pomeranjem.

5. Zaključak

U radu je prikazano da se laboratorijsko ispitivanje kratkih spojeva svodi na otkrivanje prisustva O_2 u provodnicima u kojima je uočeno stapanje u toku požara. Za laboratorijsko ispitivanje može se koristiti optički mikroskop ili skenirajući elektronski mikroskop (SEM) sa energodisperzionim spektrometrom (EDAX), kao i strukturalna analiza bazirana na rendgenskoj difrakciji.

U svim slučajevima ispitivanja u laboratoriji, priprema uzoraka je ista i svodi se na brušenje, poliranje i hemijsko nagrivanje. Takođe, u svim slučajevima se utvrđuje da li je provodnik na kome je uočeno topljenje bio u atmosferi koja sadrži ili u atmosferi koja ne sadrži O₂.

Međutim, sam podatak o prisustvu O₂ nije dovoljan da bi se doneo potpuno pouzdan zaključak o tome da li je u pitanju primarni ili sekundarni kratki spoj, zbog toga što je požar dinamički proces nekontrolisanog sagorevanja tokom koga se menja sadržaj O₂ u atmosferi. Iako se O₂ troši prilikom sagorevanja gorivih materijala, u toku požara je moguć priliv većih količina vazduha, pa samim tim i rastvaranje O₂ u Cu koji je istopljen, što može da dovede do pogrešnog tumačenja rezultata laboratorijskih ispitivanja. Zbog toga je za pravilno tumačenje rezultata laboratorijskog ispitivanja neophodno poznavanje okolnosti koje su dovele do nastanka samog požara i dinamike njegovog razvoja.

Da bi se doneo pouzdan zaključak o uzroku požara, potrebno je napraviti ili uviđaj na licu mesta ličnim prisustvom, ili kasniji uvid mesta događaja uz pomoć foto-dokumentacije, da bi se video centar požara i ocenila dinamika razvoja požara. Samo tada je moguće izjašnjavanje o prirodi ispitivanih kratkih spojeva, tj. donošenje odluke o tome da li je bio u pitanju primarni ili sekundarni kratki spoj.

6. Literatura

- A Guide to Arson Investigation*. (1996). American Re-Insurance Company.
- Almirall, R. J., Furton G. K. (2004). *Analysis and Interpretation of Fire Scene Evidence*. CRC Press.
- Azaroff, L. V. (1960). *Introduction to Solids*. McGraw-Hill.
- Azaroff, L. V. Buerger, M. J. *The Powder Method in X-ray Crystallography*. McGraw-Hill.
- Axiovert 25 CA Inverted Reflected Light Microscope – Operating Manual*. (1997). Zeiss Grupe. www.zeiss.de.
- Branningan L. F. (1980). *Fire Investigation Handbook*. University of Maryland Fire & Rescue Institute.
- Cullity, B. D. (1960). *Elements of X-Ray Diffraction*. Addison-Wesley.
- Drago, R. S. (1992). *Physical Methods for Chemist*. Gainesville: Surfside Scientific Publishers.
- Encyclopedia of forensic sciences 1-3*. [Elektronsko izdanje]. Elsevier.
- Fire and Arson Scene Evidence* (2000). U.S. Department of Justice.
- Hall R. J. (2009). *Home electrical fires*. NFPA – Fire Analysis and Research Division.

- Noon, K. R. (2001). *Forensic engineering investigation*. USA: CRC Press.
- Nuffield, E.W. (1966). *X-Ray Diffraction Methods*. Wiley.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., Niemen, T. A. (1998). *Principles Of Instrumental Analysis*. Toronto: Thomson Learning.
- Wert, C.A., Thomson, R. M. (1970). *Physics of Solids*. McGraw-Hill.

FORENSIC STUDY
OF THE SHORT CIRCUIT AS A CAUSE OF FIRE

SUMMARY

The paper presents an overview of laboratory testing of short circuits, the aim being to detect the presence of O₂ in the conductors where melting is observed in the event of fire. The optical microscope and scanning electron microscope (SEM) with energy dispersive spectrometer (EDAX) have been applied, as well as structural analysis based on X-ray diffraction. Sample preparation included grinding, polishing and chemical corrosion. Also, in all cases it was determined whether the conductor where melting was observed had been in the O₂ atmosphere or not. In order to interpret correctly the results of the laboratory testing, it is necessary to know the circumstances leading to fire and how it developed. In order to reach a reliable conclusion regarding the cause of fire, it is necessary to carry out fire scene investigation in person, or to inspect the fire scene later by means of the related photographs, so as to observe the point of origin of fire and estimate its development. Only then it is possible to state the nature of the examined short circuits, i.e. to reach the conclusion whether a primary or secondary short circuit occurred.