

TERMOGRAFSKA DETEKCIJA SPONTANE OKSIDACIJE U PODZEMNIM RUDNICIMA UGLJA

THERMOGRAPHIC DETECTION OF SPONTANEOUS OXIDATION IN UNDERGROUND COAL MINES

Edin Delić, Associate Professor, University of Tuzla
Alen Savatić, PhD Candidate, international University of Sarajevo
Nenad Todorović, Mining Engineer, Coal Mine Enterprise Banovići
Rijad Šišić, Assistant Professor, University of Tuzla
Edisa Nukić, Safety Engineer, IDEA Gračanica

REZIME

Pri podzemnoj eksploataciji uglja, nakon uspostave ventilacije ili nakon napredovanja otkopnih fronti, dolazi do interakcije između rudničkog vazduha i stijena na kontaktnim površinama. Ovisno o karakteristikama stijena, permeabilnosti, granulometrijskoj strukturi i količinama nataloženog uglja, te ventilacionim uslovima u prostorijama, ova interakcija može biti praćena hemijskim procesima. Bez kiseonika iz rudničkog vazduha oksidacija nije moguća, a na mjestima pojačanog intenziteta oksidacije ili prostrujavanja vazduha dolazi do fizičko-hemijskih promjena čijom detekcijom je moguće interpretirati stanje procesa. Identifikacijom kritičnih mjesta moguće je unaprijediti proces upravljanja požarnim rizicima i sigurnost. Termogramska analiza omogućava interpretaciju temperaturnih gradijenata i praćenje toplotnih manifestacija na kontaktnim površinama. U radu je obrađena metodologija termogramske detekcije oksidacije u podzemnim rudnicima uglja.

Ključne riječi: Termogramska analiza, podzemna eksploatacija uglja, upravljanja požarnim rizicima i sigurnost

SUMMARY

An interaction between mine shaft air and rocks at the contact surfaces occurs during an underground mining of coal after the establishment of the ventilation or after progression of excavation front. Depending on the characteristics of rock permeability, granulometric structure and deposited quantities of coal, and ventilation conditions in the premises, this interaction may be accompanied by chemical processes. An oxidation is not possible without oxygen from mine shaft air, and in places of increased intensity of oxidation or air flow leads to physical and chemical changes whose detection is possible to interpret the state of the process. Identification of hot spots can enhance the process of fire risk and safety. Thermogramic analysis allows the interpretation of temperature gradients and thermal monitoring events at the contact surfaces. In this paper the methodology thermogramic oxidation detection in underground coal mines.

Keywords: Thermogramic analysis, coal mines, fire risk and safety

1. UVOD

Infracrvena temperaturna telemetrija bazira se na registrovanju intenziteta toplotnog zračenja i trajnom zapisivanju u odgovarajućem obliku tako da između instrumenta i predmeta mjerenja

nema direktnog kontakta. Količina toplotne energija koja se emituje sa površine direktno je proporcionalna temperaturi površine:

$$E = \epsilon \sigma T^4$$

(E – emitovana energija [J]; ϵ – koeficijent emisivnosti; σ – Stefan-Boltzmanova konstanta ; T – temperatura tijela [K])

Promjena intenziteta emitovane energije sa četvrtom potencijom vrijednosti temperature omogućava pouzdaniju i tačniju detekciju i manjih razlika u temperaturama, a u slučaju poznatog koeficijenta emisivnosti moguće je utvrditi tačnu temperaturu svake od mjerenih tačaka na površinama koje se snimaju. Moderne digitalne termo-kamere mogu mjeriti veće površine kombinujući matricu mjernih senzora na način da se može vizualizirati površina koja se mjeri, te snimiti temperature generirajući „digitalnu termalnu fotografiju“ na kojoj je moguće interpretirati razlike u temperaturama u pojedinim tačkama površine. Značajna prednost ovakvog mjerenja je mogućnost mjerenja na slabo dostupnim ili opasnim mjestima, površinama sa visokim temperaturama i slično. Snižavanjem cijena termografskih uređaja, digitalizacijom i unaprijeđenjem njihovih performansi, a posebno povećanjem osjetljivosti i razlučivosti, širi se područje primjene termografije u različitim oblastima nauke i tehnike.

U rudarstvu primjena termografije u standardnim tehnološkim procesima (transportni sistem, elektro-energetske mreže, pogonski, prijenosni ili uređaji za transformaciju i slično) može se bazirati na sličnim principima i metodologijama kakvi se sreću u ostalim oblastima tehnike, uz nužno uzimanje u obzir sigurnosnih ograničenja u požarno i eksplozivno opasnim sredinama. Podzemni požari izazvani spontanom oksidacijom uglja u podzemnim rudnicima predstavljaju jedan od potpuno predvidivih rizika sa velikim posljedicama. Prevencija posljedica spontane oksidacije bazira se na pravovremenoj detekciji ranih pokazatelja oksidacionog procesa, lociranju žarišta ovih procesa, te identifikaciji pravca strujanja oksidiranog vazduha ka žarištu i produkata oksidacije od žarišta.

Spontana oksidacija se obično se prati u rudničkim prostorijama ili u izoliranim prostorima mjerenjem temperature vazduha ili praćenjem hemijske strukture vazduha, te interpretacijom kroz različite ponderisane koeficijente požarnog stanja i požarne opasnosti. Istraživanja površinskih manifestacija spontane oksidacije u ugljenom sloju, termografska detekcija i analiza potvrđuju hipotezu da se spontana oksidacija u ugljenom sloju ili u starom radu može detektirati digitalnim termografskim snimanjem, posebno ukoliko se primjene uređaji sa većim stepenom razlučivosti.

Kako se mjerenje vrši sa udaljenosti nema uticaja mjernog uređaja (instrumenta) na promjenu temperature u mjernom području, odnosno tijelu. Ukoliko se promatra ista površina kroz duži vremenski period može se govoriti o "dinamič" promjene temperature. Pionirski koraci se čine na uvođenju ovakvih mjerenja u rudarstvu u Bosni i Hercegovini. Metodologija termografske detekcije oksidacije u podzemnim rudnicima uglja tema je ovog naučnog rada, a bazirana je na mjerenjima u rudnicima uglja u području gdje su uobičajenim metodama ispitivanja, koje se vrše na osnovu Zakonom i rudarskim propisima utvrđenim normama, uočeni indikatori koji ukazuju na početak procesa oksidacije.

Osnovni cilj ovog istraživanja je dokazivanje primjenljivosti digitalne termografije u identifikaciji površinskih manifestacija oksidacionih procesa i praćenju toka i razvoja spontane oksidacije.

2. TERMALNA REFLEKSIVNOST UGLJA I STIJENA

Koeficijent emisivnosti ovisi o vrsti materijala i stanju površine. Mogućnost korištenja digitalne daljinske termografije u velikoj mjeri ovisi o koeficijentom emisivnosti materijala. U

slučaju poliranih ili galvaziranih površina vrijednost ovog koeficijenta je niska (0,01-0,02), što u velikoj mjeri ograničava mogućnost efikasnog korištenja digitalne termografije.

Kontaktne površine u rudničkim prostorijama čine zidovi, strop i podovi rudničkih i otkopnih prostorija. Ovisno o stijenama u kojima su urađene prostorije to su obično ugalj, glinovite, laporovite stijene, krečnjaci ili pješčari. Kako se oksidacioni procesi odvijaju u ugljenom sloju, to su u fokusu istraživanja kontaktne površine sa ugljenim slojem, te neposrednom krovinom, podinom i proslojcima unutar ugljenog sloja. Ugljevi imaju izrazito visok stepen emisivnosti od 0,95¹ što pogoduje termalnoj digitalnoj detekciji.

Tabela 1. Koeficijent emisivnosti pri normalnim ambijentalnim uslovima

Asfalt	0,93
Granit	0,45
Glina	0,4-0,6
Šljunak	0,28
Pješčar	0,6-0,83
Krečnjak	0,95
Tlo	0,93
Beton	0,97
Guma	0,95
Ugalj	0,95
Drvo	0,8-0,9
Voda	0,96

Toplotni transfer u ugljenom sloju vrši se kondukcijom u unutrašnjosti i zračenjem sa površine ugljenog sloja.

Ugalj je veoma slab provodnik toplote, te je zbog male toplotne provodljivosti (W/mK) veoma pogodan za „lokalno nakupljanje toplote“. S druge strane zbog velike emisivnosti ove lokacije na površini su pogodne za detekciju digitalnom termalnom kamerom.

Osim identifikacije mjesta intenzivne oksidacije, promjene na površini mogu se očekivati i na lokacija ulaska svježeg vazduha ka dubinskom žarištu oksidacije ili povratka

dima u rudničke prostorije sa mjesta oksidacije.

3. KARAKTERISTIKE UGLJENOG SLOJA I ISPITNE JAME

Eksperiment je realiziran tokom 3 mjeseca opažanja oksidacionog procesa koji je pratio napredovanje širokočelnog otkopa u podzemnom rudniku uglja. Opitna jama locirana je u rubnom dijelu ugljenog bazena. Eksploataciono polje je sa sjeveroistoka ograničeno starim radovima, a sa zapada eksploatacionim poljem površinskog kopa. Ugalj pripada tvrdim mrkim ugljevima sa prelazom ka kamenom, a neposrednu podinu ugljenog sloja čini zelena i siva glina.

Zbog tehnologije otkopavanja ugljeni sloj je duže vrijeme izložen strujanju vazduha, a prirodno je sklon spontanjoj oksidaciji. Ugljeni sloj je svrstan u II kategoriju opasnosti od „samozapaljenja“ sa prirodnim indeksom samozapaljivosti od 116 °C - 195 °C, a što potvrđuju mnogobrojni požari endogenog karaktera koji su se pojavili u jami. Relativna metanoobinost za vrijeme normalne proizvodnje iznosi 1,23 m³CH₄/t, a apsolutna 1,21 m³CH₄/min. Prostorije su razvrstane u dvije kategorije po stepenu opasnosti od metana i to: pripreme prostorije (separatno provjetranje) i prostorije izlazne zračne struje u drugi stepen; ostale prostorije (protočna ventilacija) u prvi stepen opasnosti.

Analizom podataka o lokaciji požara može se zaključiti da se požari pojavljuju u rasjednim zonama, u starom radu zbog ostavljanja neotkopanog uglja i zbog sporog napredovanja otkopnih radilišta. S obzirom da se otkopavanje vrši u više slojeva, tokom napredovanja ispod starog rada požarna opasnost je izražena prilikom bilo kakvog nekontrolisanog strujanja većih količina vazduha u dubinu starih radova. Primjetno je da su podinske partije ugljenog sloja znatno sklonije spontanjoj upali od krovinskih.

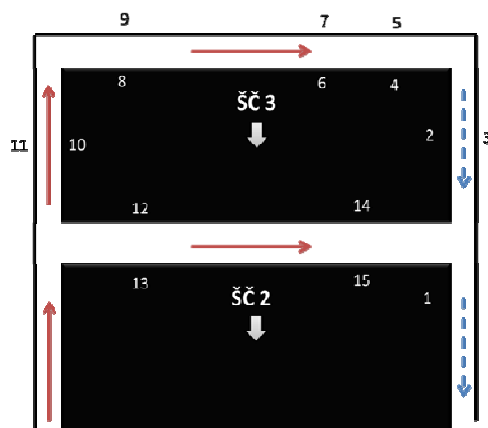
Pripremanje otkopnih polja vrši se izradom transportne prostorije, ventilacione prostorije i širokočelne prostorije. U zavisnosti od dužine otkopnog polja rade se spojne veze (prekopi)

¹ <http://www.monarchserver.com/TableofEmissivity.pdf>

koji služe za poboljšanje ventilacije pripremljenih radilišta, transporta i dopreme repromaterijala. Prostorije razrade rade se u ugljenom sloju neposredno ispod krovine, a prostorije pripreme zavisno od metode i faze eksploatacije ispod krovine ili starog rada. Proizvodnja se vrši primjenom širokočelne metode otkopavanja u pojasevima sa zarušavanjem krovine, uz upotrebu minsko-eksplozivnih sredstava za dobijanje uglja. Jama se provjetrava protočno pod uticajem mehaničke depresije koju stvara glavni ventilator. Tokom otkopavanja oksidacioni procesi se uočavaju porastom koncentracija oksida ugljika u rudničkom vazduhu i pojavom dima, iako nije dolazilo do pojave otvorenog plamena.

4. PRIKAZ REZULTATA MJERENJA

Kako širokočelni otkop kontinuirano napreduje, ali i zbog nepravilnih oblika površina u samom otkopu, nije moguće snimak referirati uvijek na istu tačku, odnosno moguće je pratiti samo relativnu poziciju u odnosu na širokočelnu frontu.



Mjerna mjesta su određena pri prvoj prospekciji, a na osnovu utvrđenih pojava porasta temperaturnih gradijenata. Tokom opažanja nije bilo moguće potpuno istovjetno izvršiti mjerenje na istoj površini. Mjerna mjesta su obilježena i aproksimativno blizu relativne pozicije u odnosu na geometriju otkopne fronte širokih čela.

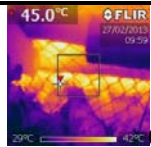
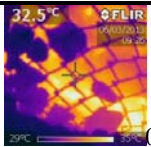
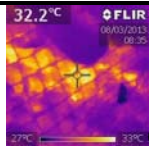
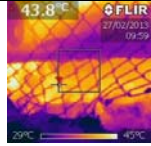
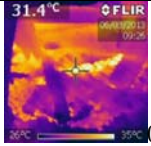
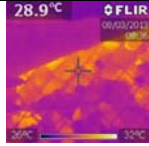
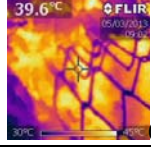

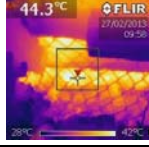
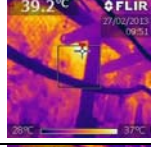
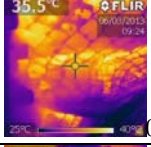
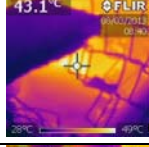

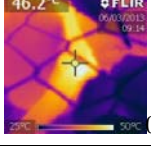
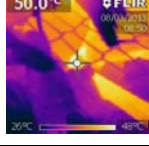



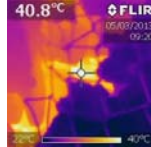
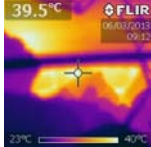
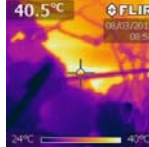

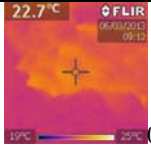
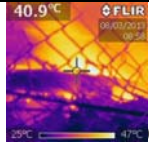
U toku mjerenja provedene su intenzivne mjere hlađenja i uklanjanja oksidacionih žarišta, što je potvrđeno padom temperature prilikom drugog mjerenja. Kontinuitet i razvoj oksidacije potvrđuje i blagi porast temperatura prilikom trećeg mjerenja.

Slika 1: Pozicije termografskih snimanja u širokočelnim otkopima 2 i 3

Imajući u vidu su indicirane pojave oksidacionog procesa, a znajući da pri podzemnoj eksploataciji uglja gdje je uspostavljena ventilacija i postoji napredovanje otkopnih fronti, dolazi do interakcije između rudničkog vazduha i stijena na kontaktnim površinama. Pristupilo se određivanju mjesta na kojima će biti vršeno termogramsko slikanje ugljenog bloka i okolnog materijala, odnosno detekcija toplotnih manifestacija, te nakon toga interpretacija uočenih hemijskih procesa pristupilo se identifikaciji kritičnih mjesta na kojima je vršena detekcija. Termogramskom analizom vršena je interpretacija temperaturnih gradijenata i praćenje toplotnih manifestacija na kontaktnim površinama. Izvršena je detekcija toplotnih manifestacija prema ovoj šemi, a u narednoj tabeli prikazani su snimci po mjernim mjestima i datumu mjerenja.

Važno je napomenuti da se u ogleđnoj jami odmah nakon uočavanja početka oksidacionog procesa pristupilo poduzimanju mjera saniranja, odnosno gašenja požara pomoću bušenja dubokih bušotina dužine 6 - 7 m, te ubacivanju perforiranih cijevi promjera 1/2 " (12,7 mm) kroz koje je ubacivana voda u stari rad (izdrobljene naslage jalove mase).

Tabela 2. Prikaz snimaka na mjernim mjestima gdje je detektovana oksidacija uglja na površini

Mjerno mjesto	27.02.2013. do 05.03.2013.	06.03.2013.	08.03.2013.
	snimak	Snimak	Snimak
4	 0326	 0417	 0423
5	 0328	 0418	 0424
6	 0392	 0415	 0425
7	 0311	 0414	 0426
12	 0342	 0405	 0434
13	 0365	 0406	 0435
14	 0395	 0402	 0437
15	 0396	 0403	 0438

5. INTERPETACIJA REZULTATA MJERENJA

Nesporno su na mjesnim mjestima 4, 5, 6, 7, 12, 13, 14 i 15 utvrđena žarišta površinske oksidacije uglja. Iako se golim okom ili drugom raspoloživom metodom nije moglo utvrditi tačno mjesto dostizanja maksimalne temperature, nakon snimanja i palpatorne provjere identificiranih površina potvrđena su zagrijavanja koja se mogu i na taj način identifikovati.



Na mjestima gdje nema oksidacionih procesa snimak površine ugljenog sloja uglavnom daje očekivanu temperaturu koja se kreće od 25-30°C bez značajnijih varijacija temperature unutar površine.

Maksimalno utvrđena temperatura površine je 61,60C na mjernom mjestu 12 tokom prvog mjerenja. Ovo mjesto je na kontaktu prve fronte širokog čela sa starim radom. Minimalna detektovana temperatura na ovoj površini je 28oC. Ovako velika razlika na relativno maloj površini ukazuje na moguće postojanje žarišta na površini ili pak da se radi o mjestu izlaska vrelih gasova iz dubljeg oksidacionog žarišta.

Slika 2. Snimak sa mjernog mjesta 2, gdje se vidi konstantna temperatura na površini ugljenog sloja



Na temelju identificiranih lokacija pojačane oksidacije fokusirane su i mjere neutralizacije, te se već tokom drugog mjerenja na ovom mjernom mjestu uočava pad maksimalne temperature na 46°C. Stanje sa temperaturama je tokom drugog mjerenja povoljnije na gotovo svim lokacijama. Međutim već tokom trećeg kontrolnog mjerenja utvrđeno je ponovno povećanje temperatura, ali još uvijek nije dostignuta maksimalna vrijednost utvrđena tokom prvog mjerenja. Na mjernom mjestu 12 temperatura se popela za dodatnih 4°C, što je rezultat manjeg obima mjera poduzetih između ova dva mjerenja.

Slika 3. Snimak sa mjernog mjesta 7, gdje se jasno mogu uočiti fronta segmenti podgrade i temperatura na površini sa lokalnim maksimumom od 39,2°C

6. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Na temelju opažanja realnog oksidacionog procesa i mjerenja digitalnom termalnom kamerom mogu se izvući naredni zaključci:

- Zbog malog toplotnog konktiviteta i visoke toplotne emisivnosti površine uglja su veoma pogodne za identifikaciju oksidacionih procesa digitalnom daljinskom termometrijom.
- Mjerenjima su potvrđena postojanja lokalnih koncentracija oksidacije na širokočenom otkopu, i to sa intenzitetima temperatura koje mogu dovesti do propagacije oksidacionog procesa. Lociranjem žarišta usmjerene su mjere protivpožarne borbe.
- Pravilnim planiranjem i monitoringom termalnim digitalnim kamerama moguće je znatno unaprijediti protivpožarnu zaštitu, odnosno identifikovati niz doplotnih manifestacija koje se na drugi način ne mogu otkriti.

7. LITERATURA

- [1] Slavko Rumbak, Mehanizam prijelaza topline i mjerneje temperature primjenom infracrvene termografije u ugroženom prostoru, Ex-Bilten 2008, Vol 37, br 1-2
- [2] C.Camargo i dr., Analysis of temperature on the surface of the wrist due to repetitive movements using sensory thermography, IOS Press and the authors, 2012
- [3] M.Cruceru i dr., Self oxidation of Romanian lignite during storage, Recent Researches in Energy & Environment