

Měření povrchových teplot při požáru plechového kontejneru

Measurement of Surface Temperature in Case of Waste Metal Container Fire

Ing. Dalibor Balner, Ph.D.

Bc. Jiří Černecký

VŠB-TUO, Fakulta bezpečnostního inženýrství
Lumírova 13, 700 30 Ostrava-Výškovic
dalibor.balner@vsb.cz, jiri.cernecky.st@vsb.cz

Abstrakt

Článek se věnuje měření povrchových teplot zapáleného plechového kontejneru pomocí kontaktních a bezkontaktních metod. Dále byla měřena hustota tepelného toku pomocí radiometrů SBG01 umístěných 15 cm od pláště kontejneru. Naměřené hodnoty hustoty tepelného toku a povrchových teplot byly posuzovány s ohledem na bezpečnost osob vyskytujících se v bezprostředním okolí kontejneru, pomocí srovnání s hodnotami kritickými, definovanými v odborné literatuře. Pro měření povrchových teplot pomocí kontaktní metody byly využity plášťové termočlánky typu K, pro bezkontaktní měření se používala termokamera FLIR T640.

Klíčová slova

Termočlánek, termokamera, kontejner, hoření, teplota.

Abstract

The article deals with the measurement of surface temperatures of an ignited sheet metal container using contact and contact-less methods. Furthermore, the heat flux was measured using SBG01 radiometers located 15 cm from the container shell. The measured values of heat flux and surface temperatures were assessed with regard to the safety of persons occurring in the immediate vicinity of the container, by comparison with critical values defined in the literature. Sheathed K-type thermocouples were used to measure surface temperatures using the contact method, and a FLIR T640 thermal camera was used for contact-less measurement.

Key words

Thermocouple, thermocamera, container, burning, temperature.

Úvod

Pro nakládání s odpady se v současné době stále více používají kontejnery z plastových materiálů, které při požáru tepelně degradují, odhořívají, taví se a po dohoření vnitřního obsahu nezůstává z jejich původní struktury příliš mnoho. V určitých územních odborech ČR se nicméně stále používají kontejnery plechové, které při požáru mohou představovat značné nebezpečí pro osoby v okolí. Tento článek se zabývá měřením povrchových teplot na plášti plechového kontejneru pomocí kontaktních a bezkontaktních metod, s vazbou na bezpečnost osob v blízkosti kontejneru.

Pro kontaktní měření teploty byly využity plášťové termočlánky typu K, které pracují na principu Seebeckova jevu. Termoelktrina byla v roce 1821 objevena fyzikem Thomasem Johannem Seebeckem, který zaznamenal tepelnou elektrickou hybnou sílu vygenerovanou v uzavřeném elektrickém obvodu dvou odlišných kovů, zatímco se jejich spoje nacházely v rozdílných teplotách. Seebeckův jev se zabývá sítí přeměny tepelné energie na energii elektrickou s výskytem elektrického proudu. Seebeckovo elektrické napětí odkazuje na síť tepelné elektrické hybné síly vytvořené v termočlátku za podmínek nulového elektrického toku. [1, 2]

Směr a velikost Seebeckova napětí E_s , kde E představuje tepelnou elektrickou hybnou sílu, závisí na teplotě spojů a také na materiálech, ze kterých je termočlánek tvořen. Pro konkrétní kombinaci materiálů A , B a pro malý teplotní rozdíl dT , používáme vzorec [2]:

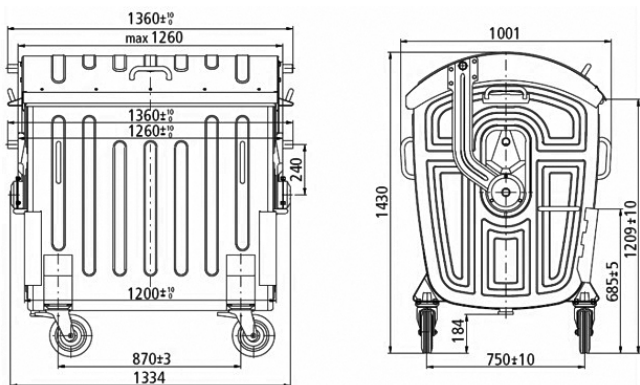
$$dE_s = \alpha_{A,B} dT$$

kde $\alpha_{A,B}$ je koeficient úměrnosti, tzv. Seebeckův koeficient, také obecně známý jako tepelná elektrická síla. [2]

Měření teploty bezkontaktním způsobem je prováděno prostřednictvím termokamer či pyrometrů, kdežto k měření hustoty tepelného toku jsou využívány výhradně radiometry. [3, 4, 5, 6] Co se týče definice infračervené kamery, jedná se o vědecký přístroj sloužící k měření a zobrazení objektem vyzařovaného infračerveného záření. Z důvodu bezprostřední závislosti záření přímo na povrchové teplotě určitého objektu, je kamera schopna teplotu objektu spočítat a znázornit. Nicméně je podstatné dodat, že kromě teploty objektu je kamerou naměřená radiace závislá také na emisivitě a dalších vlivech. [4] Pyrometr, jenž je také známý pod jménem infračervený teploměr, radiální teploměr nebo bezkontaktní teploměr, je měřicím přístrojem používaným ke zjištění teploty povrchu měřeného objektu. Je patřičné podotknout, že se předmětná teplota odvíjí od elektromagnetického záření (infračerveného nebo viditelného), které daný objekt vyzařuje. Dalším důležitým faktem je, že na základě jejich schopnosti absorbovat energii a měřit intenzitu elektromagnetických vln při jakékoli vlnové délce, vykonávají pyrometry rovněž funkci fotodetektorů. [5] Předmětem měření senzorů hustoty tepelného toku je přenos tepla. Přesněji řečeno, měření je zaměřeno na tok energie na nebo uvnitř povrchu, jenž je měřen v jednotkách $W \cdot m^{-2}$. Daný povrch je ve skutečnosti senzor sám o sobě. Zdrojem tepelného toku mohou být tři typy šíření tepla. [6]

Popis experimentu a instrumentálního vybavení

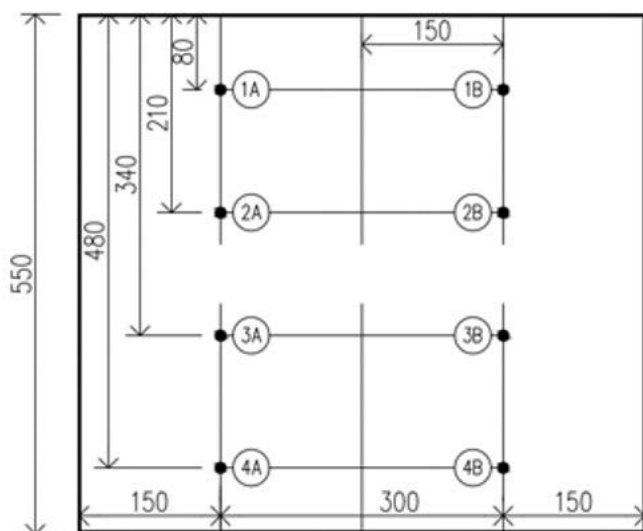
Při experimentu byl použit žárově zinkovaný kovový kontejner zapůjčený společností Technické služby Opava s.r.o. Rozměry kontejneru jsou uvedeny na obr. 1. Přední strana kontejneru byla rozdělena na dva pomyslné obdélníky, přičemž jedna plocha obdélníku byla nástříkána sprejem s $\epsilon = 0,95$ na černou barvu, a druhá obdélníková plocha byla ponechána bez nástřiku (viz. obr. 2, rozměry obdélníkových ploch jsou uvedeny na obr. 3). Obě obdélníkové části jsou rozděleny do čtyř úrovní, přičemž na každé z nich jsou dva termočlánky seřazené v pořadí na základě rovin, ve kterých se nachází (1A,1B; 2A,2B; 3A,3B; 4A,4B). Platí tedy, že termočlánky skupiny A jsou upevněny na straně kontejneru s nástříkem, zatímco termočlánky skupiny B jsou umístěny na původním povrchu kontejneru bez nástřiku. Vzdálenosti mezi individuálními termočlánky jsou zobrazeny na obr. 3. Na pokrytí jedné části kontejneru byl použit sprej černé barvy LabIR® Paint (HERP-HT-MWIR-BK-11) s $\epsilon = 0,95$. Na čelní stranu kontejneru bylo upevněno osm plášťových termočláneků typu K rozmístěných v daných úrovních (viz. obr. 2 a 3) a devátý termočlánek byl připevněn dovnitř kontejneru. Pro měření hustoty tepelného toku byly zvoleny vodou chlazené radiometry SBG01, umístěné ve vzdálenosti 15 cm od kontejneru. K měření teploty při experimentu byl využit infračervený bezkontaktní teploměr Testo 845 a termokamera FLIR T640. K zaznamenání času, teplotních hodnot všech termočláneků a hodnot z radiometrů byla použita ústředna ALMEMO 2890-9.



Obr. 1 Rozměry kontejneru v mm [7]



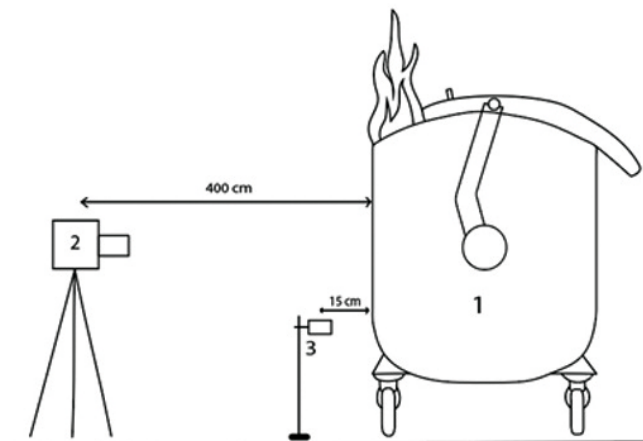
Obr. 2 Kontejner s termočlánky



Obr. 3 Rozměry (v mm) mezi jednotlivými termočlánky

V průběhu experimentálního zapálení interního obsahu plechového kontejneru byly provedeny tři samostatné experimenty měření povrchových teplot, tento článek se však zaměřuje pouze na jedno vybrané měření. S cílem eliminovat povětrnostní podmínky a umožnit tak opakování měření byl experiment uskutečněn v částečně uzavřeném prostoru haly. Před zahájením experimentu

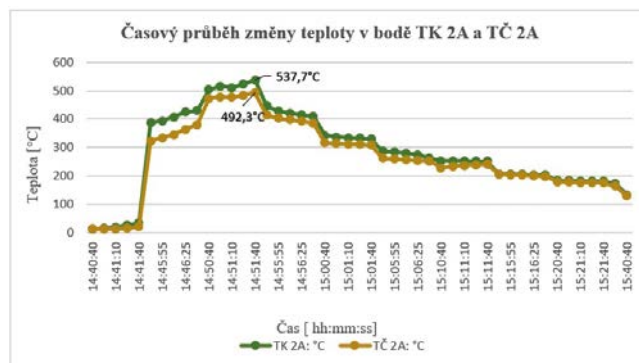
byla doba trvání jednotlivých měření teplot vymezena na 60 min. Po uplynutí 30 min intervalu od zapálení kontejnerového obsahu následovalo uzavření horní konstrukce kontejneru, za účelem omezení přístupu vzduchu do vnitřního prostoru kontejneru. Po 45 min za pozvolného dohořívání vnitřního obsahu kontejneru ukončila sekvenční tvorba termogramů, a po dosažení 60 min byl pořízen poslední termogram. V tomto bodě se nahrávání dat z TČ/RDM do ústředny zastavilo a kontejner byl přichystán k dalšímu měření. Pro měření bylo jako palivo použito 25 kg naštipaných dřevěných palet v kombinaci s 3 kg novinového nevoskovaného papíru. Schéma aparatury je zobrazeno na obr. 4.



Obr. 4 Schéma aparatury
1 - kontejner; 2 - termokamera; 3 - radiometry

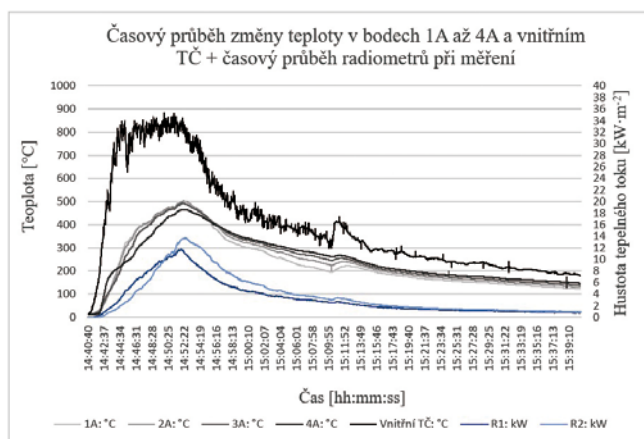
Výsledky experimentu

Na obr. 5 je začátkem měření čas 14:40:40, kdy po iniciaci docházelo k nárůstu intenzity hoření, načež ve fázi maximální intenzity hoření (12 min od začátku měření) byly zaznamenány maximální hodnoty na teplotní stupnici. U bodu TK 2A činila maximální teplota 537,7 °C, v bodě TČ 2A to byla teplota 492,3 °C. Doba záznamu nejvyšších teplot se časově shoduje a procentuální rozdíl mezi teplotami v bodě TK 2A a TČ 2A je roven 8,44 %. Největší rozdíl u naměřených hodnot teploty mezi kontaktním a bezkontaktním měřením nastal v časovém rozmezí od 14:45:40 do 14:46:40, přičemž ve fázi dohořívání se hodnoty bezkontaktního a kontaktního měření téměř vyrovnaly. K naměření posledních hodnot teploty došlo v 15:40:40. V tomto bodě, který byl umístěn v pořadí jako druhý shora (viz předchozí obr. 2 a 3) byly naměřeny nejvyšší hodnoty teploty, při porovnání s body ostatními. Z tohoto důvodu je v článku zmíněn právě tento bod TK 2A a TČ 2A (TK - Termokamera, TČ - termočlánek).



Obr. 5 Srovnání zaznamenaných hodnot v bodě TK 2A a TČ 2A

Obr. 6 zobrazuje celý průběh měření, můžeme tedy vidět hodnoty teplot na termočláncích na povrchu kontejneru, teplotu na termočláncu umístěném uvnitř kontejneru a hustotu tepelného toku stanovenou na radiometrech. Po iniciaci došlo k rozhořivání paliva a pomalému zvyšování teploty. Ve fázi maximální intenzity hoření byla na vnitřním TČ zaznamenána maximální hodnota teploty 868 °C. Další fáze hoření se vyznačovala pozvolným poklesem teplotních hodnot v důsledku dohořívání vnitřního materiálu. Křivky R1 a R2 ukazují postupný nárůst hodnot hustoty tepelných toků, jejichž maximálních hodnot bylo rovněž dosaženo při maximální intenzitě hoření. Maximální hodnotou hustoty tepelného toku je pro R1 11 780 W.m⁻² zatímco pro R2 13 726 W.m⁻². Viditelný rozdíl mezi hodnotami R1 a R2 je zřejmě způsoben navrstvením materiálu na jedné straně kontejneru během hoření. Ve finální fázi dohořívání lze zaznamenat zjevný pokles hodnot hustoty tepelného toku, kdy zaznamenané hodnoty z R1 a R2 v této fázi přibližně korespondují. Nakonec v čase 15:40:40, 1 h od začátku třetího experimentu, byly zaznamenány poslední hodnoty hustoty tepelného toku, kdy pro R1 je to 788 W.m⁻² a pro R2 je hodnota 894 W.m⁻². Hodnoty teploty (naměřené kontaktně/bezkontaktně) se na plášti kontejneru po 1 h měření pohybovaly v rozmezí 130 °C - 140 °C.



Obr. 6 Celkový průběh hodnot naměřených pomocí termočlánců a radiometrů

Diskuze

V návaznosti na bezpečnost osob v blízkosti hořícího kontejneru je prioritou určit nebezpečí nastávající přímým dotykem rozžhaveného kovového materiálu s pokožkou lidského těla a také stanovit výši hustoty tepelného toku jež ohrožuje člověka na zdraví.

Tab. 1 znázorňuje konkrétní látky, které byly použity k pokrytí různých objektů, v závislosti na délce trvání osobního styku člověka s danými povrchovými materiály, z hlediska možnosti vzniku popálenin. V případě našeho experimentu zaměříme svou pozornost zejména na hodnoty látek nepokrytého a pokrytého kovu v řádu do 10 minut (sloupec udávající dobu dotyku delší než 8 h je pro nás irelevantní).

Tab. 1 Hodnoty prahu popálení pro kontaktní doby 1 min a delší [8]

Materiál	Hodnoty prahu popálení pro kontaktní dobu		
	1 min	10 min	8 h a delší
	°C		
Nepokrytý kov	51	48	43
Pokrytý kov	51	48	43
Keramika, sklo a kameninové materiály	56	48	43
Plasty	60	48	43
Dřevo	60	48	43

Při vzájemném srovnání maximálních hodnot na obr. 5 s hodnotami v tab. 1 je patrné, že maximální hodnoty zaznamenané při experimentech překračují hodnoty uvedené v tab. 1 až 10-ti násobně, z čehož vyplývá, že překročení prahu bolesti u člověka nastává v časovém horizontu kratším než 1 min. V důsledku jakéhokoli přímého kontaktu lidské kůže s rozžhaveným povrchem tudíž u lidí zákonitě dochází k pocitu bolesti a popálení pokožky. S ohledem na bezpečnost osob v blízkosti kontejneru jsou za stěžejní informace považovány i poslední hodnoty zaznamenané měřicími přístroji, konkrétně tedy data získaná bezprostředně po uplynutí 1 hod experimentu. Při porovnání experimentálně naměřených hodnot po uplynutí 1 hod z obr. 5 s hodnotami v tab. 1 je zřejmé, že rozdíl mezi nimi rozhodně není tak značný jako je tomu v případě srovnání maximálních hodnot. Přestože jsou zjištěné experimentální hodnoty po 1 hod měření rovněž v rozporu s číselnými údaji tab. 1 (přibližně třikrát vyšší, než udává tab. 1) a popálení kůže je nevyhnutelné, míra tohoto poranění nebude tak intenzivní jako by tomu bylo u popálení pokožky při maximálních hodnotách teploty.

Tab. 2 Hodnoty hustoty tepelného toku v závislosti na pocitu člověka převzatých z publikace autorů Romaněnka, Bubyra a Baškircева [9]

Hustota tepelného toku [W.m ⁻²]	Pocit člověka
60-100	vnímá teplo
200-600	pocituje teplo
1 000-2 300	pocituje horko
3 000-5 000	pocituje bolest

Tab. 3 Hodnoty hustoty tepelného toku v závislosti na době působení a pocitu bolesti osob na základě výzkumu v publikaci autora Wolanina [10]

Hustota tepelného toku [W.m ⁻²]	Doba působení [s]
280-550	neomezená doba
625-1 050	180-300
1 100-1 600	40-60
1 680-2 200	20-30
2 200-2 800	12-14
2 800-3 100	7-10
více než 3 500	2-5

Při porovnání získaných dat maximálních hodnot hustoty tepelného toku z tab. 2 a 3 s údaji na obr. 5 můžeme konstatovat, že osoba nacházející se v bezprostřední blízkosti hořícího kontejneru bude za normálních okolností pociťovat bolest, v době kratší než 2 s. Srovnáme-li údaje hustoty tepelného toku po 1 h z obr. 5 s hodnotami v tab. 2 a 3, dospějeme k závěru, že člověk v blízkosti hořícího kontejneru bude pociťovat teplo/horko (bude schopen snášet hustotu tepelného toku po dobu 180-300 s, aniž by došlo k ohrožení zdraví dotyčného).

Závěr

Článek se zabývá tématem bezpečnosti osob v bezprostřední blízkosti plechového kontejneru při iniciaci jeho obsahu. Cílem článku bylo za použití kontaktních a bezkontaktních senzorů stanovit lokální teploty a hustoty tepelného toku v určených místech kontejneru a identifikovat nebezpečí, která může hořící kontejner představovat pro člověka. Při experimentu byl použit zároveň zinkovaný kovový kontejner zapůjčený společností Technické služby Opava s.r.o. Teplota na čelní straně kontejneru byla kontaktně měřena pomocí osmi plášťových termočlánců

typu K rozmístěných v daných úrovních, devátý termočlánek byl připevněn dovnitř kontejneru. Pro měření hustoty tepelného toku byly zvoleny vodou chlazené radiometry SBG01, umístěné ve vzdálenosti 15 cm od kontejneru. K měření teploty bezkontaktně byl při experimentu využit infračervený bezkontaktní teploměr Testo 845 a termokamera FLIR T640. K zaznamenání času, teplotních hodnot všech termočlánků a hodnot z radiometrů byla použita ústředna ALMEMO 2890-9. Porovnáním naměřených hodnot teploty a hustoty tepelného toku s hodnotami definovanými v odborné literatuře, článek přináší nové informace ohledně nebezpečí, které hořící kontejner může představovat pro člověka v jeho bezprostřední blízkosti.

Použitá literatura

- [1] ANDERSON, N.A.: *Instrumentation for process measurement and control: senzory a měřicí obvody*. 3rd ed., Boca Raton: CRC, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 08-493-9871-1.
- [2] DYER, S.A.: *Survey of Instrumentation and Measurement*. Canada: John Wiley & Sons, 2001. ISBN 0-471-39484-X.
- [3] Konstrukce termokamery. *Termokamera.cz* [online]. ČR: termokamera.cz, 2021 [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>.
- [4] Uživatelská příručka FLIR T6xx series. USA, 2014. Dostupné také z: <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-t6xx-series-user-manual.pdf>.
- [5] What is Pyrometer: Working Principle and Its Types. *ElProCus - Electronic Projects for Engeneering Students* [online]. Telangana, India: Elprocus, 2021, 2021 [cit. 2021-02-27]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/what-is-pyrometer-working-principle-and-its-types/>.
- [6] Industrial monitoring and control / heat flux and heat transfer measurement. *Hukseflux Thermal Sensors* [online]. Netherlands: Hukseflux, 2021, 2021 [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://www.hukseflux.com/applications/industrial-monitoring-and-control-heat-flux-and-heat-transfer-measurement>.
- [7] Kontejner žárově zinkovaný kovový 1100 litrů. *Popelnice - koše* [online]. ČR: Eshop-rychle.cz, 2021 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.popelnice-kose.cz/Kontejner-zarove-zinkovany-kovovy-1100-litru-d100.htm?fbclid=IwAR3G3vALMnmjJs4yes7aFo9T-uWJhtz0ieypv7iCvPXxsfEq11bfLehLrUQ>.
- [8] ČSN EN ISO 13732-1.: Ergonomie tepelného prostředí - Metody posuzování odezvy člověka na kontakt s povrchy. Část 1: horké povrchy. ČR: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [9] ROMANĚNKO, P.N.; BUBYR, N.F., BAŠKIRCEV, M.P.: *Těplopředača v požarnom děle*. Moskva, VŠ MVD SSSR 1969.
- [10] WOLANIN, J.: *Podstawy Rozwoju Porarow*, Szkoła Główna Sluzby Pozarniczej, Warszawa 1986.