Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti (JOSRA). JOSRA 1 - 2019, roč. 12.

Alternativní pyrotechnické iniciátory prachovzdušných směsí

24.06.2019

Alternative pyrotechnics ignitors of dust-air mixtures

Vojtěch Jankůj[1, 2], Aleš Bernatík[1, 2]

[1]VŠB-TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Lumírova 630/13, 700 30 Ostrava – Výškovice, e-mail: vojtech.jankuj@vsb.cz, ales.bernatik@vsb.cz

[2]VŠB-TU Ostrava, Institut čistých technologií – 511, Hornicko – geologická fakulta, 17. listopadu 2172/15, 708 33 Ostrava – Poruba, e-mail: vojtech.jankuj@vsb.cz, ales.bernatik@vsb.cz

pyrotechnické iniciátory | směsi | prach | vzduch | výbuchy | výbuchové charakteristiky

Abstrakt

Článek se zabývá alternativními způsoby pyrotechnické iniciace prachovzdušných směsí. V rámci experimentálního měření byly připraveny alternativní pyrotechnické iniciátory. Ty byly vloženy do připraveného obalu, utěsněny různými druhy víček a testovány. Během testů byly všechny používané pyrotechnické iniciátory snímány vysokorychlostní kamerou. Získaná data byla využita pro následný vývoj daných iniciátorů a popis jejich chování po jejich aktivaci. Jednotlivé typy pyrotechnických iniciátorů byly následně testovány ve výbuchovém autoklávu, aby bylo možné posoudit jejich schopnost iniciovat prachovzdušnou směs.

Klíčová slova: iniciace, pyrotechnické iniciátory, výbuchové parametry

Abstract

This article deals with alternative methods of pyrotechnic initiation of dust-air mixtures. There were prepared pyrotechnic mixtures for experimental measurements. These pyrotechnic mixtures were inserted inside prepared packaging, sealed by different covers and tested. All pyrotechnic ignitors were recorded high-speed camera during this experimental measurements. Obtained records were used for a development of the ignitors and for their description of behaviour after their activation. Individual types of developed pyrotechnic ignitors were tested in an explosion autoclave for assessment of their ability to initiate to dust-air mixtures.

Keywords: ignition, pyrotechnic ignitors, explosion parameters

Přijat k publikování / Received for publication 11. 12. 2019

Úvod

Základní znalostí v problematice hoření a výbuchu nejen prachů je pochopení tzv. výbuchového trojúhelníku. Tento jednoduchý koncept znázorňuje tři nutné podmínky, které musí být přítomny, aby mohlo dojít k hoření, popř. výbuchu. Jmenovitě se jedná o hořlavou látku, okysličovadlo a iniciační zdroj. Pokud se bude jednat o hořlavou látku v podobě prachu, musí být tento prach hořlavý, rozvířen ve vzduchu, mít vhodnou velikost částic a jeho koncentrace ve vzduchu musí být v mezích hořlavosti. V případě výbuchu musí být splněny další požadavky zahrnující prostorové ohraničení a smíchání prachu s okysličovadlem v mezích výbušnosti. [1]

Prvním krokem k pochopení příčin výbuchu prachů je uvědomění si rozdílu mezi nebezpečím a rizikem výbuchu prachu. Ačkoliv představují tyto dva pojmy odlišné definice, jsou často zaměňovány. Nebezpečí hodnotíme jako vlastnost (potenciál) strojů, zařízení, technologických procesů, materiálů nebo také fyzikálních faktorů v pracovním prostředí, která může poškodit zdraví lidí (nejen zaměstnanců), prostředí, nebo může způsobit finanční a materiálové ztráty a snížení konkurenceschopnosti. Riziko potom chápeme jako možnost zranění, ztráty, poškození životního prostředí způsobené právě nebezpečím. Význam rizika je dán funkcí pravděpodobnosti mimořádné události a vážností jeho důsledku. Identifikace nebezpečí je klíčem k efektivnímu řízení rizik, jelikož není možné řídit rizika vznikající z nebezpečí, která neznáme. [1]

Z hlediska hodnocení výbuchu prachu je tedy nejprve nutné zjistit, zda je daná látka nebezpečná z hlediska výbuchu, tedy stupeň nebezpečí prezentovaný výbuchovými parametry. Je-li zjištěna možnost výbuchu prachu, následují kroky obsahující několik testů k zisku technických informací. Technickými informacemi rozumíme laboratorní stanovení základních požárně technických parametrů o posuzované látce tak, aby bylo možné řídit efektivně protivýbuchovou prevenci. Základní sledované parametry:

- Limitní obsah kyslíku – minimální množství kyslíku, které je nutné dodat do směsi hořlavé látky, vzduchu a inertního plynu, aby došlo za stanovených podmínek k výbuchu,
- **Maximální výbuchový tlak** – maximální vznikající tlak výbušné směsi v uzavřené nádobě za stanovených podmínek zkoušky,
- **Maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku -** maximální hodnota nárůstu tlaku za jednotku času stanovena při výbuchu všech atmosfér v mezích výbušnosti hořlavé látky v uzavřené nádobě za stanovených podmínek zkoušky,
    - **Optimální koncentrace –** při dosažení optimálního poměru hořlavé látky a kyslíku, dochází právě k zaznamenání nejvyšších sledovaných hodnot a průběh výbuchu je nejrychlejší,
- **Dolní mez výbušnosti** – minimální koncentrace hořlavého prachu ve vzduchu, při které je tato směs již výbušná,
- Minimální iniciační energie – minimální množství energie potřebné pro zapálení hořlavé látky na vzduchu,
- Teplota vznícení – minimální teplota vznícení oblaku prachu rozvířeného ve vzduchu při stanovených podmínkách zkoušky. [2,3]

Jak bylo zmíněno výše, k největším následkům během výbuchu dochází, jeli dosaženo tzv. optimální koncentrace ve směsi hořlavé látky s kyslíkem. Tato možnost se projevuje zaznamenáním maximálního výbuchového tlaku a maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku. Zároveň musí být přítomen dostatečně silný iniciační zdroj. S problematikou stanovení výbuchových charakteristik rozvířeného prachu je spojena řada norem ČSN EN 14 034. Tato norma je rozdělena do čtyř následujících částí:

- Část 1: Stanovení maximálního výbuchového tlaku p_{max} rozvířeného prachu,
- Část 2: Stanovení maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku $(dp/dt)_{max}$ rozvířeného prachu,
- Část 3: Stanovení dolní meze výbušnosti *LEL* rozvířeného prachu,
- Část 4: Stanovení mezní koncentrace kyslíku *LOC* rozvířeného prachu. [4]

V těchto částech jsou uvedeny a stanoveny experimentální metody pro stanovení jednotlivých výbuchových charakteristik. Standardně se tyto parametry stanovují na výbuchovém autoklávu, jež je tlakové zařízení o definovaném objemu, ve kterém dojde k rozvíření stanoveného množství prachu a jeho následné iniciaci. Je využíváno několik typů těchto výbuchových autoklávů lišících se velikostí svého objemu – *1000 l*, *250 l*, *20 l*. Jedním z moderních a hojně využívaných zařízení je výbuchový autokláv švýcarské firmy Kühner nesoucí označení 20 – L – Apparatus. Tento přístroj je schopen hodnotit všechny výše uvedené výbuchové charakteristiky pro plyny i pro prachy. Pomocí počítačového rozhraní je řízen celý průběh testů a díky čidlům umístěných uvnitř nádoby jsou sledovány nárůsty tlaků za čas. Ty jsou poté vyhodnoceny a na základě těchto znalostí jsou stanoveny výbuchové parametry. [5]

Normy definují také použitý iniciační zdroj. V případě hořlavých plynů a par hořlavých kapalin se jedná o iniciační zdroj s velikostí iniciační energie *10 J*. Pro prachové směsi je použita iniciační energie o velikosti *10 kJ*. K tomu jsou standardně používány například pyrotechnické iniciátory dortmundské firmy Sobbe, kdy tato firma dodává na trh iniciátory o odpovídající energetické hodnotě od *100 J* po *10 000 J*. Norma stanovuje, že pro iniciaci musí být použity dva pyrotechnické iniciátory (chemické zapalovače) o odpovídající energii – tzn. pro iniciaci prachové směsi dva chemické zapalovače, každý s energií *5 kJ*. Energie je v tomto případě odvozena od hmotnosti pyrotechnického prášku v zapalovači a jeho kalorimetrické energie. Napájecí obvod pro tyto zapalovače musí být schopen odpálit pyrotechnické zapalovače do *10 ms* – do této doby musí dojít k aktivaci pyrotechnické směsi a iniciaci směsi uvnitř zařízení. Před novelizací v roce 2011 udávala norma i přesné složení a hmotnost takto připraveného pyrotechnického zapalovače. Připravená pyrotechnická směs měla mít hmotnost *1,2 g* a následující složení:

- Zirkonium *(40 %) – 0,48 g*,
- Dusičnan barnatý *(30 %) – 0,36 g*,
- Peroxid barnatý *(30 %) – 0,36 g*.

Jelikož náklady spojené s nákupem těchto iniciátorů nejsou zanedbatelné, zabývá se experimentální část alternativním složením a výrobou tohoto iniciačního zdroje. [4,6]

Metody a měření

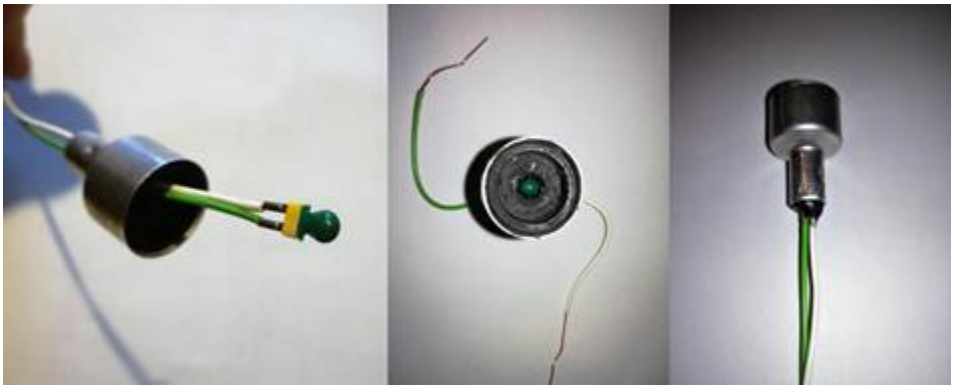
Experimentální část byla věnována možnosti výroby alternativního pyrotechnického zapalovače za použití kovů *hliníku* a *hořčíku* ve formě prachu. Kovy byly použity pro nahrazení *zirkonia* v původní směsi. Jak je psáno v normě, pro odvození hmotnosti pyrotechnického prášku je důležitá znalost kalorimetrické energie. Bylo tedy nutné zjistit množství hliníku a hořčíku, které dodá v pyrotechnické směsi s *peroxidem a dusičnanem barnatým* energii *5 kJ*. Hodnoty spalného tepla byly převzaty z knihy *Ignition handbook* [7]. Autoři se v této knize věnují právě problematice iniciace. V knize jsou stanoveny hodnoty spalných tepel pro hliník – $31060\ J \cdot g^{-1}$ a pro hořčík – $24730\ J \cdot g^{-1}$. Zjištění těchto hodnot bylo stěžejní pro výpočet potřebné hmotnosti prachu a sestavení jednotlivých pyrotechnických směsí. K iniciaci pyrotechnické směsi slouží elektrický mžikový palník, který dodá potřebnou energii pro zažehnutí. Na základě výpočtů byly poté stanoveny navážky jednotlivých prachových vzorků, včetně příslušných okysličovadel, viz Tabulka 1.

LÁTKA	MNOŽSTVÍ LÁTKY V HLINÍKOVÉ SMĚSI	MNOŽSTVÍ LÁTKY V HOŘČÍKOVÉ SMĚSI

Hliník	0,16 g	0
Hořčík	0	0,2 g
Peroxid barnatý	0,24 g	0,3 g
Dusičnan barnatý	0,24 g	0,3 g
Celková hmotnost prachové směsi	0,64 g	0,8 g

Tabulka 1: Složení alternativních pyrotechnických iniciátorů

Dalším krokem bylo definování obalu, ve kterém bude připravená prachová směs uložena. V tomto případě byly využity obaly (kalíšky) použitých pyrotechnických iniciátorů firmy Sobbe. Nejprve bylo nutné odstranit zbytky elektrického mžikového palníku, tedy připravení otvoru pro nový. Toho bylo dosaženo vrtákem o velikosti 2 mm ve stojanové vrtačce. Nově vložený elektrický mžikový palník byl následně důkladně upevněn a utěsněn tavnou pistolí. Výsledný produkt je zachycen na následujících snímcích (Obrázek 1).



Obrázek 1: Příprava kalíšku s elektrickým mžikovým palníkem

Pro utěsnění směsi uvnitř připraveného kalíšku bylo zvoleno několika typů víček. Originální víčka používaná firmou Sobbe jsou tvořena z plastu o průměru *13 mm* s šířkou *3 mm*. Cílem bylo najít vhodný a účinný způsob utěsnění pyrotechnické směsi uvnitř kalíšku. V prvotních krocích byly vybrány tři typy utěsnění. Pomocí speciálně vyrobeného „vyrážedla“ se třemi různými průměry bylo vyraženo korkové víčko. Korková víčka byla přelepena červenou páskou, jelikož nebyl korek kompaktní a docházelo by k úniku jemné prachové směsi netěsnostmi. Dalším materiálem bylo PVC (linoleum) a těsnící guma. (Obrázek 2).

Vyrážedlo a připravená víčka, včetně originálního

Image not found or type unknown

Obrázek 2: Vyrážedlo a připravená víčka, včetně originálního

Jak je patrné z následující Tabulky 2, největší podobnost s originálním víčkem mělo víčko vyrobené z PVC. V tomto případě mělo stejnou tloušťku a téměř stejnou hmotnost, kdy byl rozdíl pouze *0,05 g*. Ostatní dva typy se lišily jak hmotností, tak tloušťkou. Například víčko z korku bylo třikrát lehčí než originální provedení.

TYP VÍČKA	HMOTNOST [G]	TLOUŠŤKA [MM]
Originál	0,25	3,00
Těsnící guma	0,37	2,50
Korek	0,08	2,00
PVC	0,20	3,00

Tabulka 2: Hmotnost a tloušťky jednotlivých víček

Po namíchání pyrotechnické směsi a její utěsnění uvnitř kalíšku pomocí zmíněných víček, bylo v další fázi nutné sledování, jak tento sestavený iniciátor funguje. Pro tento účel bylo vytvořeno a připraveno pracovní místo, kde proběhly řízené iniciace připravených pyrotechnických iniciátorů. Tato měření byla snímána vysokorychlostní kamerou, aby bylo možné vidět celý průběh iniciace – rozdílnost chování směsí a hodnocení časového požadavku. Samotné pracoviště bylo složeno z několika prvků. Jedním z nejdůležitějších byla vysokorychlostní kamera *Photron FASTCAM SA-Z* a laboratorní zdroj se *synchronizační jednotkou.* Tyto tři přístroje byly vzájemně propojeny a díky synchronizační jednotce docházelo k současnému spuštění zdroje i kamery. Pozadí tvořilo černé plátno s terčem, do jehož středu byly iniciátory umísťovány na laboratorní stojan s přivedeným zdrojem. Vše bylo osvětleno pomocí pěti reflektorů. Kamera snímala rychlostí 5000 snímků za sekundu. Záznamy byly ukládány a následně vizuálně porovnávány jednotlivé projevy všech připravených pyrotechnických iniciátorů.

Palník Sobbe

Prvním sledovaným iniciátorem byl palník německé firmy Sobbe. Sledován byl iniciátor s iniciační energií *5 kJ*. Samotná iniciace těchto typů pyrotechnických iniciátorů byla velmi rychlá. Vždy docházelo k intenzivním světelným projevům a vše bylo doprovázeno zvukovým efektem při uvolnění víčka. K prvním projevům iniciace docházelo do *10 ms*, což odpovídalo požadavkům normy. V následujícím sledu obrázků (Obrázek 3) je znázorněn průběh iniciace. První viditelný projev a známka samotné iniciace je vidět na prvním snímku v čase *8,8 ms*. Poté následuje vlastní průběh iniciace. Je sledován již zmíněný velký světelný projev, který pomalu slábne.

8,8 ms	*10,8 ms*	*14,8 ms*	*20,8 ms*	*30,8 ms*

Obrázek 3: Průběh iniciace palníků Sobbe

Hliník a hořčík

U přípravy pyrotechnické směsi s hliníkem byly použity dva typy hliníku s různou zrnitostí, a to hrubší, se zrnitostí *52 µm* a jemnější se zrnitostí *26 µm*. U hořčíku byla zjištěna zrnitost *200 µm*. Během prvních měření byl zjištěn zásadní

problém v utěsnění směsi uvnitř kalíšku. Původní tři navržená těsnící víčka nedokázala po dostatečně dlouhou dobu udržet směs uvnitř kalíšku. To mělo za následek nežádoucí uvolnění nezapálené směsi z kalíšku. Ta byla iniciována až v prostoru a ne uvnitř kalíšku. Tento efekt způsobil zpomalení iniciací. K těm docházelo za požadovanou hranicí *10 ms*. Předpokládána byla větší reakce jemnějšího hliníku, ale díky jeho jemnosti docházelo k tomu, že směs dohořívala v kalíšku a hořela tedy „na dvakrát“.

Na následujícím sledu snímků (Obrázek 4) je zobrazen průběh iniciace prachové směsi hliníku o jemnější zrnitosti. První známkou projevu této směsi je uvolnění nezapálené směsi za hranicí *10 ms* a teprve poté dochází k iniciaci v čase *16,8 ms*. Následuje samotná iniciace, kdy je pozorován největší projev v *30 ms*, který končí přibližně ve *240 ms*. Poté dochází k další iniciaci zbytku pyrotechnické směsi z kalíšku. Jednalo se o nežádoucí efekt, díky čemuž je celá iniciace mnohem delší než u iniciace palníků Sobbe, ale také méně reaktivní.

16,8 ms	*30 ms*	*240 ms*	*380 ms*	*556 ms*

Obrázek 4: Průběh iniciace hliníkové pyrotechnické směsi

Z pořízených záznamů byla patrná změna a zlepšení projevu iniciace a její samotné zrychlení, pokud se víčko neuvolnilo ihned, ale udrželo směs déle pod tlakem. Bylo tedy žádoucí utěsnit směs lepší variantou víčka. Z tohoto pohledu došlo k výraznému posunu, kdy byla pořízena, na CNC stroji, plastová víčka z polymethylmethakrylátu (PMMA). Ta svým provedením odpovídala více originálnímu víčku palníku Sobbe (Obrázek 5).

Obrázek 5: Porovnání víček PMMA a Sobbe

Jak lze vidět na posledním sledu snímků iniciace, první známka iniciace je viditelná ještě před požadovaným časem *10 ms*. Celkově došlo ke zrychlení reakce oproti předchozím zkoušeným vzorkům. Zároveň byly vidět další lepší vizuální projevy, podobné iniciátorům Sobbe.

9,2 ms	*20,2 ms*	*45,2 ms*	*71,2 ms*	*117,2 ms*

Obrázek 6: Průběh iniciace hořčíkové pyrotechnické směsi

Výsledky a diskuse

Během přípravy alternativních pyrotechnických iniciátorů bylo stěžejní použití vysokorychlostní kamery a laboratorního zdroje. Díky tomu bylo možné sledovat detailně projevy iniciátoru během jejich iniciace a reagovat na ně, za účelem zlepšení těchto projevů. Vizuální posouzení však nebylo dostačující pro porovnání těchto pyrotechnických iniciátorů. Byly proto nachystány čtyři reprezentativní prachové vzorky – *niacin, lycopodium, tonerová modř, černé uhlí.* U těchto vzorků byla známá optimální koncentrace, která byla použita pro následující testy. Testy proběhly na výbuchovém

autoklávu 20 – L – Apparatus. Během měření maximálních výbuchových parametrů, došlo k odlišnostem, jak je možné vidět v následující tabulce. U obou nově připravených pyrotechnických iniciátorů docházelo při testech ke snížení výsledných sledovaných parametrů. Největší rozdíl byl zaznamenán u maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku u lycopodia. Ta byla u obou alternativních zdrojů přibližně třikrát nižší než u normovaného iniciátoru značky Sobbe. Porovnáme-li pouze připravené pyrotechnické iniciátory, nejsou zaznamenány tak veliké rozdíly. Odchylka mezi těmito dvěma iniciátory je minimální.

	NIACIN		LYCOPODIUM		TONEROVÁ MODŘ		ČERNÉ UHLÍ	
Typ palníku	p_{max}	$(dp/dt)_{max}$	p_{max}	$(dp/dt)_{max}$	p_{max}	$(dp/dt)_{max}$	p_{max}	$(dp/dt)_{max}$
Sobbe – 10 kJ	8,03	974,6	7,20	982,0	7,60	973,6	7,63	442,66
Hliník – 10 kJ	7,13	460,0	6,40	251,6	7,26	595,3	6,93	219,66
Hořčík – 10 kJ	7,30	482,0	6,83	313,3	7,13	562,6	7,13	225,66

Tabulka 3: Výsledky porovnání připravených iniciačních zdrojů

Závěr

Během zjišťování požárně – technických charakteristik tvoří nákup iniciačních zdrojů do výbuchového autoklávu nezanedbatelnou položku, jelikož jsou pro každé jedno měření použity dva iniciační zdroje o odpovídající energii. Z tohoto důvodu bylo experimentální měření věnováno právě přípravě alternativních pyrotechnických iniciátorů. Připravené alternativní pyrotechnické iniciátory dokázaly iniciovat směs uvnitř výbuchového autoklávu, avšak, jak je patrné z výsledků, docházelo ke zkreslování skutečných výbuchových parametrů. Pro další použití je třeba provést další nezbytná měření pro optimalizaci složení směsi a převážně její utěsnění.

Poděkování

Článek vznikl v rámci projektu Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin – Projekt udržitelnosti. Identifikační kód: LO1406. Projekt je podporován Národním programem udržitelnosti financovaném ze státního rozpočtu ČR.

Reference

[1] AMYOTTE, Paul R.; ECKHOFF, Rolf K. Dust explosion causation, prevention and mitigation: an overview. *Journal of chemical health and safety*. 2010, s. 15–28.

[2] DAMEC, Jaroslav. *Protivýbuchová prevence.* Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005. 188 s. (Edice SPBI Spektrum, 8). ISBN 80-86111-21-0.

[3] ŠTROCH, Petr. *Procesy hoření a výbuchu.* Žilina: EDIS, 2010. 156 s. ISBN 978-80-554-0187-4.

[4] ČSN EN 14 034. *Stanovení výbuchových charakteristik rozvířeného prachu*. Praha: Český normalizační institut, 2011.

[5] SIWEK, R.; CESANA, Ch. *Manual for 20-l-apparatus 7. 1* [online]. Cesana AG, TÜV SÜD Schweiz AG, 2016 [cit. 2018-09-10]. Dostupné z: http://www.cesana-ag.ch/download/B000_071.pdf.

[6] *Technical Data Sheet EBBOS ChZ* [online]. Sobbe, 2016 [cit. 2018-09-09]. Dostupné z: http://www.sobbe-zuender.de/fileadmin/user_upload/images/downloads/technical-data-sheet_EBBOS-chz-chemical-_detonators.pdf .

[7] BABRAUSKAS, Vitenis. *Ignition handbook: principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science.* Issaquah (WA): Fire Science Publishers, 2003. 1116 s. ISBN 0972811133.

Vzorová citace

JANKŮJ, Vojtěch; BERNATÍK, Aleš. Alternativní pyrotechnické iniciátory prachovzdušných směsí. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online]. 2019, roč. 12, č. 1. Dostupný z: https://www.bozpinfo.cz/josra/alternativni-pyrotechnicke-iniciatory-prachovzdusnych-smesi. ISSN 1803-3687.

Autor článku:
Ing. Vojtěch Jankůj
prof. Dr. Ing. Aleš Bernatík