

ročník 22, číslo 1/2022

SPEKTRUM

vychází 2x ročně

ISSN 1804-1639 (Online)



VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

FAKULTA
BEZPEČNOSTNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Recenzovaný časopis

**Sdružení požárního a bezpečnostního
inženýrství, z.s.**

a

**Fakulty bezpečnostního inženýrství,
VŠB - Technická univerzita Ostrava**

SPEKTRUM

Recenzovaný časopis
Sdružení požárního a bezpečnostního
inženýrství, z.s. a Fakulty bezpečnostního
inženýrství
*Reviewed journal
of Association of Fire and Safety
Engineering and Faculty of Safety
Engineering*

Vydavatel - *Publisher*:
Sdružení požárního a bezpečnostního
inženýrství, z.s.
17. listopadu 15, 708 00 Ostrava - Poruba

Editor - *Editor*:
doc. Dr. Ing. Michail Šenovský

Redakční rada - *Editorial Board*:
doc. Dr. Ing. Michail Šenovský
(šéfredaktor - *Editor-in-Chief*)
doc. Dr. Ing. Miloš Kvarčák
(zástupce šéfredaktora - *Deputy Editor
-in-Chief*)

prof. Ing. Karol Balog, PhD.
doc. Ing. Ivana Bartlová, CSc.
Dr. Ing. Zdeněk Hanuška
doc. Ing. et Ing. Karel Klouda, CSc., Ph.D., MBA
RNDr. Stanislav Malý, Ph.D., DBA
prof. MUDr. Leoš Navrátil, CSc., MBA, dr. h. c.
doc. Ing. Ivana Tureková, PhD.

Výkonný redaktor - *Responsible Editor*
Ing. Lenka Černá

Všechny uveřejněné příspěvky byly
recenzovány
All published contributions were reviewed

Adresa redakce - *Editorial Office Address*:
SPBI, z.s.
Lumírova 13
700 30 Ostrava - Výškovice
e-mail: spektrum.fbi@vsb.cz

Uzávěrka tohoto čísla - *Current Issue Copy
Deadline*: 30. 04. 2022

Vyšlo: červen 2022 - *Issued on June 2022*

Nevyžádané příspěvky nevracíme.
Neoznačené články jsou redakční materiály.
Uveřejněné články nemusí vždy vyjadřovat
názor redakce.

Nebyla provedena jazyková korektura.
*Rejected contributions will not be returned.
Authorless articles are prepared by
the editorial staff.
Published articles need not always express
the opinion of Editorial Board.
No language corrections were made.*

© SPEKTRUM
ISSN 1804-1639 (Online)

VŠB TECHNICKÁ | FAKULTA
UNIVERZITA | BEZPEČNOSTNÍHO
OSTRAVA | INŽENÝRSTVÍ

Fakulta bezpečnostního inženýrství
VŠB - Technická univerzita Ostrava
Faculty of Safety Engineering
VŠB - Technical University of Ostrava



Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s.
Association of Fire and Safety Engineering

Obsah - Contents

Využití bezpilotních systémů v rámci evakuace <i>Use of Unmanned Systems in Evacuation</i> Ing. Karel Dušek	3
Systém LRAD - moderní systém ve službách policie <i>LRAD System - a Modern System in the Service of the Police</i> doc. Ing. Martin Hrinko, Ph.D., MBA, LL.M.	6
Bezpečnost ocelových lan v technické praxi <i>Safety of Steel Wire Ropes in Technical Practice</i> doc. Dr. Ing. Michal Leshák, Jan Kroupa, doc. RNDr. Karla Barčová, Ph.D.	9
Tepelně-izolační vlastnosti ochranných oděvů a jejich vliv na tepelnou zátěž uživatele <i>Thermal-Insulation Characteristics of Protective Clothing and their Influence on Thermal Strain</i> Ing. Kamila Lunerová, Ph.D., RNDr. Michal Mašín, Ph.D., David Kaiser, Ing. Jan Pokorný, Ing. Barbora Kopečková, Ing. Jan Fišer, Ph.D.	13
Možnosti ochrany hasičů před karcinogenní kontaminací při požárech <i>Possibilities of Protection of Firefighters Against Carcinogenic Contamination in Case of Fires</i> Ing. Jiří Slabotinský, CSc., Ing. Pavel Častulík, CSc., Mgr. Jaromír Sobotka, Ph.D., Mgr. Jakub Vaněk, Ph.D.	17
Kybernetická rizika na robotizovaných pracovištích s použitím umělé inteligence a možná bezpečnostní opatření <i>Cyber Risks in Robotic Workplaces Using Artificial Intelligence and Possible Safety Measures</i> Ing. Pavel Šuška, Ing. Aleksandr Kochnev	22
Psychosociální rizika na robotizovaných pracovištích s použitím umělé inteligence <i>Psychosocial Risks in Robotic Workplaces Using Artificial Intelligence</i> Ing. Pavel Šuška, Ing. Aleksandr Kochnev	25
Expozice prachu na pracovišti během činnosti tkaninových filtrů a odsávacích systémů při výrobě polymerních materiálů <i>Exposure of Dust in the Workplace during the Operation of Fabric Filters and the Suction System in the Production of Polymeric Materials</i> Ing. Bc. Martin Vidlička, doc. Ing. Petr Štroch, Ph.D., prof. Ing. Karol Balog, Ph.D.	28
Výroba polymerních materiálů - riziko iniciace hořlavého prachu elektrostatickým nábojem <i>Production of Polymeric Materials - the Risk of Initiation of Combustible Dust by Electrostatic Charge</i> Ing. Bc. Martin Vidlička, prof. Ing. Karol Balog, Ph.D.	33

Využití bezpilotních systémů v rámci evakuace

Use of Unmanned Systems in Evacuation

Ing. Karel Dušek

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství
nám. Sítná 3105, 272 01 Kladno
dusekka1@fbmi.cvut.cz

Abstrakt

Článek se zabývá možnostmi využití bezpilotního systému -dronu v rámci jednoho ze základních úkolů ochrany obyvatelstva, kterým je evakuace. Cílem článku je představit tento technický prostředek, analyzovat možnosti a výhody využití systému v jednotlivých fázích evakuace.

Klíčová slova

Bezpilotní systém, evakuace, mimořádná událost.

Abstract

The work deals with the possibilities of using an unmanned system - a drone in one of the basic tasks of protection of the population, which is evacuation. The aim of the work is to present this technical means, to analyze the possibilities and advantages of using the system in individual phases of evacuation.

Keywords

Unmanned system, evacuation, extraordinary event.

Úvod

Článek se zabývá možnostmi využití bezpilotních systémů v rámci evakuace obyvatelstva. Bezpilotní systémy lze označit jako moderní a novou technologii, která se postupně dostává do vybavení záchranných a bezpečnostních sborů. Tato technologie si zde získává významné postavení v rámci plnění úkolů ochrany obyvatelstva a řešení mimořádných událostí (dále jen MU). Jedná se o systém, který zefektivňuje realizaci záchranných a likvidačních prací (dále jen ZaLP) a vytváří podmínky pro účelnější pracovní výkony. Bezpilotní systém poskytuje pohled z ptáčích perspektiv. Pohled na místo mimořádné události z výšky výrazně zvyšuje orientaci a zrychluje a zefektivňuje rozhodovací procesy spojené s řízením ZaLP. Škála činností, které lze s bezpilotním systémem v rámci řešení MU realizovat, je poměrně rozsáhlá. Záleží ovšem na tom, jaké má obsluha systému zkušenosti s jeho ovládním a jak je vynalézavá. Bezpilotní systém efektivně využijeme i v rámci jednoho ze základních úkolů ochrany obyvatelstva, kterým je evakuace. Evakuaci se rozumí souhrn opatření sloužících k zajištění přemístění obyvatelstva, zvířat a věcí z míst ohrožených MU či krizovou situací do míst, kde nebezpečí nehrozí a pro obyvatelstvo je zde připraveno nouzové ubytování, pro zvířata nouzové ustájení a pro věci nouzové uskladnění [3]. Evakuace se provádí v době, kdy MU nebo krizová situace teprve hrozí nebo je v počáteční fázi. Pokud je toto opatření kvalitně naplánováno a úspěšně provedeno, může zachránit mnoho lidských i zvířecích životů a majetkových hodnot. Aby bylo možné těchto cílů dosáhnout, je nutné, aby byl soubor činností, souhrnně nazvaný evakuace, pečlivě naplánován a v případě vzniku MU efektivně proveden. Pokud toto opatření nebude kvalitně naplánováno a provedeno, s vysokou pravděpodobností bude vznikat chaos a následná panika, která celou situaci jen zhorší. Opatření a jednotlivá zabezpečení evakuace lze rozdělit do tří časových úseků: před vyhlášením evakuace, při realizaci evakuačních opatření a po jejím ukončení. Ve všech těchto fázích lze pro zefektivnění celého procesu evakuace účelně využít bezpilotní systém.

Využití dronu v období před vyhlášením evakuace

Jak jsem již zmínil, velmi důležitá část evakuace je přípravné období - období plánování případných opatření, tedy i příprav na možnou evakuaci obyvatelstva. Při přípravě na provedení evakuace je nutné naplánovat celou řadu opatření a zabezpečení. Jedná se například o stanovení míst, z kterých by bylo obyvatelstvo v případě ohrožení evakuováno a stanovení pořadí jejich evakuace. Dále pak opatření v oblasti dopravy. Zde se jedná o vymezení evakuačních tras s dostatečnou propustností, zajištění dopravních prostředků pro přesun obyvatelstva. Nutné je také naplánovat přípravu a zajištění míst shromažďování, zabezpečení činnosti evakuačních a přijímacích středisek, stanovení míst nouzového ubytování a vytvoření podmínek pro ubytování evakuovaného obyvatelstva.

Orgány zodpovědné za plánování evakuace plánují všechna tato opatření s dostatečným časovým předstihem. Při rozhodování a vybírání vhodných míst pro zřízení již zmíněných opatření, mohou příslušné orgány efektivně využít bezpilotní systém. Vytipovaná místa lze díky bezpilotnímu systému prohlednout z výšky, což zajistí lepší orientaci o členitosti konkrétního místa. Pořízené záběry lze archivovat a popřípadě do nich lze zanést schéma či plánek střediska, které by zde v případě potřeby bylo zřízeno.

MU, která by mohla vyvolat potřebu evakuace, může vzniknout až s velkým časovým odstupem od určení míst a středisek zmíněných v předchozím odstavci. Za tuto dobu se může charakter krajiny výrazně změnit. Například místa, kde byla předem naplánována místa shromažďování, evakuační střediska či přijímací střediska změnila charakter a nelze je pro plánované určení využít. To výrazně ovlivňuje zdárný průběh evakuace. Značně by to zkomplikovalo a prodloužilo průběh záchranných prací. Při rozhodování o vyhlášení evakuace si prostřednictvím bezpilotního systému vytipovaná místa lze prohlednout a zjistit jejich stav. Pomocí informací zjištěných bezpilotním systémem je na možné změny či nastalé stavy adekvátně a včas reagovat. Díky bezpilotnímu systému tak učiníme poměrně snadno a v krátkém čase, který je při rozhodování o takovém opatření velmi důležitý.

Využití dronu v období při vyhlášení evakuace

V případě vzniku MU a rozhodnutí o vyhlášení evakuace lze bezpilotní systém také efektivně využít. Bezpilotní systém mohou příslušné orgány použít hned v několika oblastech procesu evakuace.

Bezpilotní systém lze využít k monitoringu dopravních tras, po kterých obyvatelstvo opouští svá obydli resp. evakuovaný prostor. Na určených evakuačních trasách je předpokládán velký provoz a je nutné zabránit vzniku kolon a dalších dopravních komplikací souvisejících se zvýšeným dopravním provozem. Díky použití systému získáme informace o plynulosti dopravního provozu a případných problémech v rámci dopravy (dopravní nehody, kolony). Dron umožní na dopravní trasy pohled z výšky, což zajistí přehled o průběhu evakuace a efektivnější řešení případných problémů. Činí se tak bez potřeby povolání helikoptéry, jejíž provoz je značně nákladnější. Dle mého pohledu může použití helikoptéry zvýšit i úroveň znepokojení, paniky již tak vystresovaného obyvatelstva.

Zařízení mohou orgány zodpovědné za zdárný průběh evakuace použít i ke kontrole míst určených jako místa shromažďování, evakuační střediska, místa nouzového ubytování. Tato místa jsou určena pro shromažďování ohrožených osob. V místě shromažďování jsou osoby přesunuty do dopravních prostředků a po evakuačních trasách odváženy do míst, kde nebezpečí nehrozí. V evakuačních střediscích je prováděna mimo další činnosti evidence, dokumentace

a obyvatelstvu jsou zde předávány i informace o dalším postupu. V těchto místech je předpokládán zvýšený pohyb a hustota osob. Orientace a následná organizace těchto míst je ze země tedy značně složitá. Bezpilotním systémem lze nad středisky pravidelně přelétávat a sledovat jejich organizaci, pohyb obyvatelstva a celkovou činnost střediska. To umožňuje osobám zodpovědným za činnost v daných místech díky vyšší orientaci rozhodovat o případných organizačních úpravách.

Využití dronu v období po ukončení evakuace

V rámci evakuace je důležitá také bezpečnost a veřejný pořádek. Bezpečnost a veřejný pořádek je nutné zajistit nejen v průběhu přesunu obyvatelstva ohroženého MU, ale také po opuštění jeho obydlí. Potřebné je zajistit dohled a kontrolu nad opuštěným územím. Hlavním důvodem je, aby nedocházelo ke krádežím a rabování, a to až do doby, kdy se občané vrátí zpět do svých obydlí. Zajištění bezpečnosti a veřejného pořádku je hlavní činností PČR v součinnosti s městskou respektive obecní policií. Dále se na opatřeních souvisejících se zajištěním bezpečnosti a pořádku podílejí orgány příslušné obce a jednotky požární ochrany v případě nutnosti, lze zapojit i síly a prostředky Armády ČR. K realizaci opatření pro zajištění bezpečnosti a veřejného pořádku mohou zmíněné orgány a instituce efektivně využít bezpilotní systémy. Kontrolu bezpečnosti lze provádět průlety po stanovených trasách. Obraz je přenášen na audiovizuální zařízení, kde lze situaci v daném místě sledovat a vyhodnocovat. Na základě informací získaných z dronu, mohou být vysílány SaP pro zajištění bezpečnosti na konkrétní místa. Celý proces by byl díky použití bezpilotního systému výrazně jednodušší a rychlejší než kontrola ze země obchůzkovou činností.

Bezpilotní systém lze také efektivně použít při odeznění MU, která evakuaci obyvatelstva vyvolala. Díky systému mohou být zjištěny informace například o rozsahu poškození obydlí po opadnutí povodně. Můžeme si tak vytvořit obraz o celkových škodách a nutných likvidačních pracích a následné obnově objektu či celého zasaženého území. Díky dronu tak opět činíme v krátkém čase.

Příklad použití dronu při mimořádné události

Bezpilotní systém byl použit při likvidačních pracích po účincích tornáda na Moravě 2021. Nasazení dronu zde umožnilo rychlé zjištění operační situace na místě MU. Použití bezpilotního systému dle zasahujících jednotek jednoznačně urychlilo nasazení SaP. Jednalo se zejména o organizaci práce na nouzovém zakrývání poškozených střech. Bez využití dronu by tato činnost byla nesmírně náročná. Vozidlo operátora dronu měl k dispozici velitel zásahu, velitelé sektorů a úseků, kteří díky pořízeným záběrům mohli operativně a rychle rozhodovat o činnostech na místě MU.



Obr. 1 Využití bezpilotního systému při MU tornádo na Moravě 2021 (Zdroj HZS KVK)



Obr. 2 Využití bezpilotního systému při MU tornádo na Moravě 2021 (Zdroj HZS KVK)

Výhody využití bezpilotního systému v rámci procesu evakuace

Jako základní výhodou využití bezpilotního prostředku je nutné uvést výrazné zvýšení orientace na daném území díky pohledu z ptáčích perspektivy. Díky bezpilotnímu systému lze zjistit informace o činnostech a celkové situaci v místě poměrně snadno a rychle. Mezi výhody nepochybně patří nízké náklady na provoz a údržbu. V porovnání s náklady na provoz letecké služby jsou zanedbatelné. Navíc ne každý kraj má leteckou službu k dispozici. Díky on-line přenosu obrazu jsou orgány zodpovědné za plánování evakuace, v případě vyhlášení evakuace orgány zodpovědné za zdárný průběh evakuace a jednotky schopny efektivně reagovat na nastalou situaci. Aktuální přenos obrazu lze také přenášet prostřednictvím hromadných sdělovacích prostředků veřejnosti a informovat ji o průběhu události a možných opatřeních ve vztahu k ní. Jako výhodou lze uvést i možný rozvoj systému v rámci přípravy a řešení MU. Bepilotní systémy jsou v této oblasti poměrně nové a s každým dalším nasazením lze zjistit další uplatnění.

Nevýhody využití bezpilotního systému v rámci procesu evakuace

K provozu bezpilotního systému je nutné mít k dispozici proškolený personál, což lze považovat za určitou nevýhodu. Bepilotní systémy lze využít při silném větru, dešti, či sněžení jen s výrazným omezením. Jako nevýhodu lze uvést i pořizovací náklady, ty jsou ovšem v porovnání s pořizovacími náklady například helikoptéry zanedbatelné.

Závěr

Z poznatků, ke kterým jsem v rámci zpracování tohoto tématu dospěl, lze říci, že bezpilotní systémy jsou před vyhlášením, při vyhlášení a po ukončení evakuace velmi přínosné. Umožňují několik možností nasazení, výrazně zvyšují úroveň orientace nad určitým územím. Jejich použití téměř ve všech případech zvyšuje efektivitu přijatých opatření. Závěrem je nutné říci, že i jako s každým dalším technickým prostředkem, je potřebné i v případě bezpilotních systémů neustálé prohlubování teoretických znalostí i praktických dovedností.

Použitá literatura

- [1] ARAS, J.: *222 tipů a triků pro drony*. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4874-7.
- [2] Zákon č. 239/2000 Sb., o integrovaném záchranném systému a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů.
- [3] Vyhláška č. 380/2002 Sb., k přípravě a provádění úkolů ochrany obyvatelstva.
- [4] Khan Sohail.: *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, LAP Lambert Academic Publishing, 2016. Surveillance Bird 2016. 116. ISBN 978-36-5989-268-4.

- [5] KOCOUREK, J.; ŘEŠÁTKO, J.: *Drony: praktická příručka pro majitele dronů DJI*. Praha: TELINK, spol. s r.o., 2017. ISBN 978-80-7346-228-4.
- [6] *Bojový řád jednotek požární ochrany*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s. 2017. ISBN 978-80-7385-197-2.
- [7] VOLF, O.: *Teorie řízení zásahu složek integrovaného záchranného systému: nauka o velení*. Karlovy Vary: Oldřich Volf, 2018. ISBN 978-80-270-4966-0.
- [8] Rozhovor s Ing. Oldřichem Volfem, Ph.D., příslušník HZS ČR, Karlovy vary 10. 7. 2021.

System LRAD - moderní systém ve službách policie

LRAD System - a Modern System in the Service of the Police

doc. Ing. Martin Hrinko, Ph.D., MBA, LL.M.

Vysoká škola CEVRO Institut Praha
Jungmannová 17, 110 00 Praha 1
martin.hrinko@vsoci.cz

Abstrakt

Príspevok objasňuje čtenářům technologický prostředek, který se rozhodla policie v ČR převzít do své praxe a používat ho k přenosu informací při řešení mimořádných událostí směrem k veřejnosti a současně využít i jako donucovací prostředek určený k donucení protiprávně jednajících osob podle zákona.

Klíčová slova

Komunikační systémy, Donucovací prostředky, Policie ČR, Technologie v praxi silových resortů, Zvukové dělo.

Abstract

The paper explains to readers the technological means that the police in the Czech Republic have decided to take into practice and use to transmit information in dealing with emergencies to the public and also use as a coercive means designed to coerce illegal persons under the law.

Keywords

Communication systems, Coercive means, Police of the Czech Republic, Technology in the practice of force departments, Sound cannon.

Úvod

V příspěvku autor popíše s podporou vlastní praktické zkušenosti technologii - systém zvaný LRAD, který je moderním prostředkem k donucení protiprávně jednajících osob k upuštění od svého jednání a zároveň významným pomocníkem k zřetelně slyšitelnému přenosu informací a pokynů složek IZS směrem k evakuovaným osobám před/po vzniku mimořádné události, vyžadující záchraně a likvidační práce spojené s evakuací osob. Příspěvek popisuje praktické využití tohoto akustického prostředku známého pod slangovým názvem „zvukové dělo“ v rámci vybrané kazuistiky.

Legislativa a neletální donucovací prostředky

Systém zvaný LRAD, lze jako poměrně moderní technologii, využít jako kvalitně slyšitelný komunikační prostředek, ale zároveň i jako donucovací prostředek Policii ČR. Pokud se zaměříme na jeho použití z pohledu práva, protože použití donucovacích prostředků je vždy závažný zásah do práv a svobod občana, můžeme konstatovat, že použití zmíněné technologie LRAD (z anglické zkratky: **Long Range Acoustic Device**) se může zařadit svými vlastnostmi za dodržení přísných bezpečnostních postupů mezi donucovací prostředky tzv. dočasně zneschopňující. Současně zde bude na místě doplnit zařazení této technologie mezi tzv. nesmrtní prostředky. Ozbrojené a bezpečnostní složky musí neustále reagovat na měnící se podmínky, změny v bezpečnostním prostředí a vznikající nové hrozby. Je tedy nutné sbory, které mají klíčovou roli při zajišťování vnitřní bezpečnosti vybavovat nejnovějšími technologiemi, výzbrojí a výstrojí, tak aby mohli dostatečně reagovat na vzniklé situace narušení veřejného pořádku a vnitřní bezpečnosti. Česká republika a její bezpečnostní složky musí disponovat zákoným

zmocněním k použití vybraných nesmrtních technologií, obzvláště pak donucovacích prostředků a zbraně, které tyto sbory mohou v případech ohrožení chráněných zájmů použít. Většina bezpečnostních složek, stejně tak i Policie České republiky předložila své návrhy na přidání nových nesmrtních technologií do svých zřizovacích zákonů, kde je použití prostředků a zbraní přesně definováno. V ozbrojených bezpečnostních složkách a ozbrojených silách jsou tyto technologie taxativně vymezeny v paragrafových zněních, týkajících se právě donucovacích prostředků a použití zbraně. Z analýzy zákonů jednotlivých složek poté můžeme odvodit, jaké typy nesmrtních prostředků používají či plánují v budoucnu zakoupit.

Policie České republiky dle zákona č. 273/2008 Sb., o Policii České republiky, ve znění pozdějších předpisů jsou donucovací prostředky taxativně vyjmenovány v ustanovení § 52. V obecném ustanovení o použití donucovacích prostředků (§ 51) je uvedena oprávněnost použít při zákroku donucovací prostředek a zbraň, k jejichž používání byl policista vyškolený. Policista je oprávněný použít donucovací prostředek, který umožní dosažení účelu sledovaného zákrokem a je nezbytný k překonání odporu nebo útoku osoby, proti níž zakročuje. Ve smyslu § 53 odst. 4 lze elektrický donucovací prostředek použít, pokud by použití jiného donucovacího prostředku zjevně nebylo dostatečné k dosažení účelu sledovaného zákrokem. Policista tak není nucen před použitím tohoto prostředku využít mírnějšího donucovacího prostředku. Dále jde především o prostředky, které jsou řazeny mezi střelné zbraně kategorie A dle zákona č. 119/2002 Sb., o zbraních a střelivu, ve znění pozdějších předpisů, ale svými účinky se řadí mezi nesmrtní. Toto se týká zejména paralyzérů TASER, ručního granátového vrhače HK 69 s nesmrtním střelivem a právě popisovaného LRADu. V obecné rovině použití těchto prostředků má každá technologie svá specifika využití. Ruční vrhače a LRAD budou používány zejména při zákrocích pod jednotným velením, na rozdíl od elektrických distančních paralyzérů, které lze použít při běžné pořádkové činnosti a jiných specializovaných policejní činnosti.¹

Z taxativního vyčtu donucovacích prostředků se zaměříme především na výčet těch, které se týkají nesmrtních zbraní a prostředků, mezi které patří autorem popisovaný prostředek (technologie). V další kapitole se pak zaměříme na konkrétní vlastnosti technologie LRAD.

Přehledně tedy:

§ 52 Donucovací prostředky

- b) slzotvorný, elektrický (TASER) nebo jiný obdobně dočasně zneschopňující (např. LRAD) prostředek,
- d) vrhací prostředek mající povahu střelné zbraně podle jiného právního předpisu s dočasně zneschopňujícími účinky,
- e) vrhací prostředek, který nemá povahu zbraně podle § 56 odst. 5,
- k) vodní stříkač,
- l) zásahová výbuška.

¹ RADOSTA, M.: *Právní rámec používání nesmrtních technologií vybranými bezpečnostními sbory v České republice*. Bezpečnostní teorie a praxe, 2/2018, Vydala Policie akademie ČR, Praha.

LRAD jako systém donucení davu k poslušnosti a taky systém k předávání informací

Policie využívá několik způsobů k usměrnění chování davu lidí, obvykle se takovému služebnímu zákroku říká „zákrok pod jednotným velením“, jelikož proti protiprávně jednajícímu davu lidí provádí zákrok početný stav policistů a proto taktika služebního zákroku dává pravomoc veliteli zásahu postupovat jednotně a udělit povolení policistům provést jednotný zákrok s konkrétními donucovacími prostředky. Několik málo let má policie k dispozici právě technologii LRAD, kterou mimo přenos informací (zákonné výzvy před provedením zákroku, příkazy, usměrnění davu, instrukce veřejnosti a taky informace o evakuaci z rizikových nebo nebezpečných míst aj.) využívá jako donucovací prostředek proti davu (účastníci demonstrací, fotbalové chuligáni aj.). Jeho první „ostré“ a účinné použití proti davu bylo využito při fotbalovém utkání nejvyšší fotbalové ligy, které se konalo v Opavě dne 18. března 2017, u kterého byl autor osobně přítomen a může potvrdit rychlé a okamžité účinky zcela dosud neznámého donucovacího prostředku na české scéně i v případě potlačování agresivity fotbalových chuligánů, se kterými se potýká Policie ČR již mnohá léta a kromě standardních taktických postupů nenalezla způsob, jak přinutit zvrátit chování fanoušků bez použití „hrubé fyzické síly“ nebo bez chemických (slzný plyn) či kontaktních bolestivých prostředků.



Obr. 1 Použití LRAD proti fanouškům FC Baník Ostrava v Opavě.² Foto: Alexandr Satinský, MAFRA

Pojďme si nyní říct, o jaký prostředek (technologie) se vlastně jedná. V tomto případě se jedná o systém s využitím akustického zařízení s dlouhým dosahem (stejnějmeně označeného LRAD), které je navrženo tak, aby přesným směrem vysílalo hlasité zvukové vlny (hluk až 150 decibelů). Tento systém poprvé použila jako donucovací prostředek americká policie a postupem času se po legislativním i technickém posouzení začal používat i v podmínkách české policie. Americká policie tento prostředek zavedla do svého užívání, pro využití v policejní praxi, z praxe civilní a armádní. Novinář Andrew Neef, který LRAD zažil při protestech v Pittsburghu, o něm píše doslova: „*Váš mozek se cítí, jako by vibroval v misce želé na stole.*“

Na jednodušším principu práce se zvukem vystavěla jedna ze svých preventivních zbraní, jak již bylo autorem naznačeno, také armáda. Nadšencům může být známá jako sonické dělo, americká armáda má pro tento **vynález označení LRAD, tedy zvukové dělo o dlouhém dosahu působení zvuku**. Dělo se nazývá proto, že na rozdíl od běžných reproduktorů skutečně vysílá **soustředěný zvukový paprsek o frekvenci 2,5 KHZ a hlasitosti až 150 dB**. Na vzdálenost 300 m pak tato frekvence kmitání a vysoká hlasitost působí ostré bolesti hlavy, které lidi až paralyzují a ze vzdálenosti

² Internetový odkaz: *Policie využila na zahánění ostravských chuligánů zvukové dělo* [cit. 21.3.2017] Zdroj: https://www.idnes.cz/ostrava/zpravy/policiste-vyuzili-zvukove-delo-na-zahaneni-banikovcu.A170321_2313835_ostrava-zpravy_woj.

15 m způsobují i trvalé poškození sluchu. Při úpravě funkcí dokáže zařízení až na 9 km přenést běžné mluvené slovo, například příkaz, výzvu apod. Při dosáhnutí hraničních čísel překračujících frekvenci až několika stovek kHz nebo MHz (milion kmitů za sekundu), kterou hodnotu známe pod pojmem ultrazvuk, může dojít až ke smrti, proto se s tímto prostředkem musí zacházet obezřetně a ovládat jen proškolenou osobou. Uchem už tuto frekvenci nevnímáme, ona nám ale stejně může rozkmitat celý nervový systém a poškodit vnitřní orgány jako plíce a srdce, což vede samozřejmě k fatálním důsledkům.³



Obr. 2-3 Způsob umístění systému LRAD ve služebních vozzech Policie ČR. Foto Týdeník policie

Technologie z pohledu technických vlastností

Akustické zařízení s dlouhým dosahem (LRAD), nazývané také v překladu Ochranný Zvuk Síly (The Sound of Force Protection), bylo vyvinuto společností American Technology Corporation (ATCO). Existuje několik modelů např. 1000, 500, RX a X. Výkon až 150 decibelů. Je odolný vůči povětrnostním vlivům, je lehký, má nízkou spotřebu energie a je velmi přenosný.

LRAD byl požit v rámci vojenských operací například v Iráku. LRAD je v podstatě zaměřený paprsek zvuku. Původně byl navržen tak, aby vydával velmi hlasitý zvuk. Každý kdo byl v tomto paprsku, uslyšel bolestivě hlasitý zvuk. Ti co byli v paprsku okamžitě uprchli nebo bolestivě padli na zem. Trvalá ztráta sluchu je možná, pokud je paprsek držen na osobě několik sekund. Tato technika bývala, a stále se používá, na moři zejména na výletních lodích k odpuzování pirátů (např. Somálsko). Některé lodě amerického námořnictva to používají nejen na odrázení útočících sebevražedných atentátníků, ale i na aktivní vysílání. Systém byl dodán námořnictvu v aplikaci k vysílání hlasu široké populaci. První verze LRADu mohly vysílat řeč, mp3 do vzdálenosti 300 metrů, nyní více jak 1 km. Námořnictvo použilo LRAD k varování lodí, aby se navzájem bezpečně vyhnuly a nedošlo ke střetu. To bylo zapotřebí na přelomových

³ Internetový odkaz: *PIGULA, T.: Nesmrtící zbraně: Co všechno používají američtí policisté proti demonstrantům?* [cit. 19.2.2021], <https://zoommagazin.iprima.cz/zajimavosti/nesmrtici-zbrane>.

vodních cestách, jako jsou pobřežní vody v severním Perském zálivu aj. S LRADem se obsluha zaměřuje na člena posádky, kde v jeho rodném jazyku pomocí tlumočnicka říká co má dělat. Zní to zábavně, ale v prvopočátcích užívání tohoto systému, bylo zjištěno, že člen posádky na přijímací straně byl někdy vyděšený, když si uvědomil, že s ním mluví velký americký torpédoborec. V Iráku se objevily i pověsti o ďábelské americké zbraně, díky níž lidé věřili, že v hlavách slyší hlasy. LRAD může takto do hlav vložit „Boží slovo“. Pokud Bůh ve formě hlasu, který slyšíte jen vy, vám řekne, abyste se vzdali nebo utekli, co uděláte?⁴



Obr. 4 Použití systému na lodích k příkazům posádkám jiných lodí [4]

Závěr

Príspevek popisne približuje čtenáři nový technologický systém v praxi ozbrojeného bezpečnostního sboru Policie ČR, který je v policejní praxi používán nepříliš dlouho. Jedná se o systém, který Policie ČR převzala od zahraničních bezpečnostních sborů a ozbrojených sil, přičemž vlastnosti systému jsou využity, jak pro účely předávání příkazů a informací veřejnosti, tak pro účely donucovací. Příspěvek zmiňuje i jedno z prvních použití systému k donucení fotbalových chuligánů, kteří neuposlechli výzev Policie ČR a následně chtěli násilně bez povolení proniknout do prostoru stadionu a ztropit výtržnost. Systém byl současně použit i k výzvám v českém i polské jazyce, jelikož mezi cca. tisícovkou fanoušků FC Baníku Ostrava byli i polští fanoušci. Specifické vlastnosti a různorodost použitý systém se od té doby využívá v policejní praxi v podstatně větším počtu. První takový systém byl zakoupen a vyzkoušen pražskou policií (právě na zmíněném fotbalovém utkání v Opavě) a uplatnil se. Nyní česká policie disponuje několika kusy systémů a úspěšně ho používají v praxi pořádkové jednotky policie, antikonfliktní týmy a velitelé zákroků policie popř. velitelé zásahu složek IZS pro přenos informací při mimořádných událostech, aby informovali veřejnost a obyvatelstvo o hrozbě, potřebě evakuace a jejich ochraně.

Použitá literatura

- [1] RADOSTA, M.: *Právní rámec používání nesmrtičích technologií vybranými bezpečnostními sbory v České republice*. Bezpečnostní teorie a praxe, 2/2018, Vydala Policejní akademie ČR, Praha.
- [2] Internetový odkaz: *Policie využila na zahánění ostravských chuligánů zvukové dělo* [cit. 21.3.2017] Zdroj: https://www.idnes.cz/ostrava/zpravy/policiste-vyuzili-zvukove-delo-na-zahaneni-banikovcu.A170321_2313835_ostrava-zpravy_woj.

⁴ Internetový odkaz: *5G Satelity - Akustické Zbraně - Infrazvuk - Ultrazvuk - DEW*, [cit. 5.2.2020], dostupné: <https://stop5g.cz/5g-satelity-akusticke-zbrane-infrazvuk-ultrazvuk-dew/>.

- [3] Internetový odkaz: PIGULA, T.: *Nesmrtící zbraně: Co všechno používají američtí policisté proti demonstrantům?* [cit. 19.2.2021], <https://zoommagazin.iprima.cz/zajimavosti/nesmrtici-zbrane>.
- [3] Internetový odkaz: *5G Satelity - Akustické Zbraně - Infrazvuk - Ultrazvuk - DEW*, [cit. 5.2.2020], dostupné: <https://stop5g.cz/5g-satelity-akusticke-zbrane-infrazvuk-ultrazvuk-dew/>.

Bezpečnost ocelových lan v technické praxi

Safety of Steel Wire Ropes in Technical Practice

doc. Dr. Ing. Michal Lesňák^{1,2}

Jan Kroupa³

doc. RNDr. Karla Barčová, Ph.D.¹

¹VŠB-TUO, Fakulta bezpečnostního inženýrství
Lumírova 13, 700 30 Ostrava-Výškovic

²VŠB-TUO, Centrum nanotechnologií
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba

³VŠB-TUO, Hornicko geologická fakulta
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba
michal.lesnak@vsb.cz, karla.barcova@vsb.cz

Abstrakt

Nedestruktivní magnetická defektoskopie je moderní metodou užívanou v technické praxi ke kontrole stavu drátěných ocelových lan, která jsou základní součástí celé řady technických zařízení využívaných v každodenním životě. Kontrola stavu těchto nosných a kotvicích prvků představuje zásadní krok ve stanovení bezpečného provozu lana. Možnosti aplikace této metody jsou v tomto článku prezentovány zejména pro lana, která jsou součástí mostních konstrukcí či lanovkových zařízení, přestože jejich využití je podstatně širší a pokrývá veškeré průmyslové aplikace.

Klíčová slova

Ocelové lano, magnetická defektoskopie, předpjatá lana, betonový nosník.

Abstract

Non-destructive magnetic defectoscopy is a modern method used in technical practice to check the condition of wire ropes, which are an essential part of a wide range of technical equipment used in everyday life. Checking the condition of these load bearing and anchoring elements is an essential step in determining the safe operation of the wire rope. The possibilities of application of this method are presented in this article mainly for ropes that are part of bridge structures or cableway installations, although their use is much wider and covers all industrial applications.

Keywords

Steel rope, magnetic defectoscopy, prestressed ropes, concrete girder.

Úvod

Ocelová lana jsou důležitou součástí významně namáhaných částí mnoha strojů, zařízení a mechanismů, které jsou hojně rozšířeny v mnoha různých průmyslových oblastech od dobývání surovin, stavebnictví, zemědělství, přes strojírenství až po dopravu, a to jak pro transport osob neb materiálu, tak jako nosné a kotevní prvky nejrůznějších konstrukcí, jako např. důlní nebo povrchové lanovky, veškerá výtahová zařízení, či mostní konstrukce. Na bezvadném stavu drátěných ocelových lan závisí tedy nejenom lidské životy, ale i hmotný majetek, z toho důvodu je potřeba lanům, jejich kontrole a pravidelnému servisu věnovat značnou pozornost a sledovat jejich stav po celou dobu jejich životnosti. Hlavními faktory, které ovlivňují stav ocelových lan, jsou koroze, únavaové zlomy drátů, deformace jednotlivých pramenů a úbytek materiálu, a mají tedy zásadní vliv na bezpečné využívání těchto technických prvků. [4, 7]

V současnosti je moderní a velmi progresivní metodou pro nedestruktivní testování ocelových lan magnetická defektoskopie. Touto metodou lze identifikovat poruchy používaných ocelových lan, aniž by bylo lano jakýmkoliv způsobem poškozeno, přičemž není potřeba ani jeho demontáž. Magnetická metoda je obecně určena pro lokalizaci vad vnitřních a vnějších u feromagnetických materiálů. Princip magnetické metody je založen na zmagnetování ocelového lana a následné analýze rozptylových toků a změn rozložení magnetického pole v magnetické hlavě. Značnou výhodou magnetické defektoskopie je, že feromagnetikum a měřicí zařízení může být odděleno vrstvou jiného neferomagnetického materiálu, a přesto je zajištěna velká citlivost měření. Metoda je vysoce objektivní, selektivní k feromagnetickým materiálům a umožňuje jak rychlou mimořádnou, tak pravidelnou (i zcela automatizovanou) kontrolu. [2, 3, 5]

Základním technickým prvkem, na který je velmi vhodné využití magnetické defektoskopie, jsou mostní konstrukce. Mostem je dopravní stavba k překonání sníženiny, vodního toku, komunikace apod. Po konstrukční stránce jsou mostní konstrukce velmi různorodé, přičemž využití ocelových lan patří ke stěžejním prvkům zejména v případech zavěšených a visutých mostů. Zavěšený most je takový, jehož konstrukce (mostovka) je zavěšena na lanech upevněných v jednom nebo více pevných bodech. Příkladem tohoto typu mostu je například: Lanový most (Jižní spojka), Mariánský most - v Ústí nad Labem, Harfový most (Tábor). Visutý most je typ mostu, jehož konstrukční systém je založen na volně visícím laně s pevně zajištěnými nehybnými konci. Nejznámějším visutým mostem je Golden Gate Bridge u Sanfranciského zálivu v Kalifornii.

V současné době je v České republice řádově 300 mostů, u kterých je použito ocelových lan.

U Trojského zámku v Praze se 2. prosince 2017 odpoledne zřítla do Vltavy betonová lávka pro pěší, tzv. Trojská lávka (obr. 1 nahoře). Podle informací záchranářů se při pádu zranili čtyři lidé. Konstrukce Trojské lávky byla specifická, jednalo se o takzvaný předpjatý beton. Používala se v 70. a 80. letech, v poslední době se od této konstrukce ustoupilo. Mostní konstrukce byla vyztužena předpjatými ocelovými lany. Pokud se k lanům dostane vlhkost (voda), začnou korodovat. Ze zprávy soudní znalkyně charakterizující průběh porušení mostu bylo zřejmé, že pokud praskne jedno lano, za ním následují další, most se neprodlužuje (neklesá), ale rovnou se zhroutí. V srpnu 2018 došlo k další tragické události spojené se zřícením úseku dálničního mostu v italském Janově a zhroucením jednoho z nosníků viaduktu (obr. 1 dole). [1, 9]

Od pádu Trojské lávky a mostu v Janově se hledá účinná technologie, která by nedestruktivním způsobem dokázala diagnostikovat poruchu nosných lan. Stávající technologie diagnostiky využívají destruktivních metod, které výrazně poškozují stavbu a jsou nesmírně technologicky i ekonomicky nákladné. Jedná se například o odporovou metodu, která vyžaduje odbourání části mostní konstrukce pro možnost diagnostiky. Dalšími možnostmi je odvrátání betonu pro obnažení lan. Toto řešení však vyžaduje hustou síť vrtů, které podstatně snižují únosnost stávající konstrukce. Námí prezentované řešení využívá nedestruktivních metod pro přesnou identifikaci stavu lan bez jakéhokoliv porušení. [4]

Podobná problematika se řeší i v případě lanovek a výtahů (osobní, důlní), resp. u kotevních lan vysílačů. V případě lanovek jsou problémy zejména v délce lan, která jsou násobně delší než u mostů a současně jsou lana vystavena působení více vlivů

současně (děšť, mráz, poryvy větru, intenzivní sluneční záření, úder blesku...). Lana lze do jisté míry ochránit mazivem, a to i při zachování jeho plné funkčnosti. Pokud nejsou lana správným způsobem ošetřena a pravidelně kontrolována jak vizuálně, tak prostřednictvím defektoskopických metod, může dojít k havárii. V případě vysílačů lze zajistit částečnou ochranu lan pokrytím plastovou vrstvou.



Obr. 1 Havárie Trojské lávky [9] (nahore) a havárie mostu Ponte Morandi, Janov, Itálie [1] (dole)

Diagnostika ocelových lan magnetickou nedestruktivní metodou

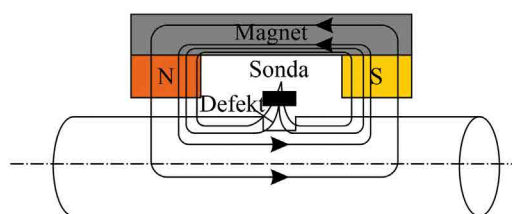
Nedestruktivní kontrola ocelových materiálů umožňuje kontrolu všech druhů ocelových lan, tyčí, drátů a válcových těles vyrobených z feromagnetických materiálů. Touto metodou lze zjistit necelistvosti, povrchové i vnitřní defekty. Je možno také zjistit úbytek kovového průřezu v důsledku koroze ocelového materiálu. V ideálním případě, pokud nahradíme ocelové lano tyčí, prochází magnetický tok jen jednotlivými částmi magnetického obvodu a nevystupuje z tyče ven. V případě, že se ve zmagnetované části tyče vyskytne necelistvost materiálu způsobující zvýšení magnetického odporu, dojde ke změně rozložení magnetického pole v magnetizační hlavě. Vlivem této změny vznikají rozptylové toky, což jsou části magnetického toku, které vystupují nad povrch magnetované části tyče. Tyto změny rozložení magnetického pole a rozptylové toky jsou snímány pomocí indukčních snímačů a Hallových sond měřicího systému a signál je dále zpracováván a následně vyhodnocován. [5, 6, 8]

Výhodami použití defektoskopu, který pracuje na principu Hallových sond ve srovnání s čistě cívkovými defektoskopy, jsou podstatně menší rozměry, lineární závislost mezi magnetickým polem a výstupním elektrickým signálem, výstupní napětí je nezávislé na rychlosti posuvu (pro standardní rychlosti 1-1,5 m.s⁻¹), má jednoduché konstrukční uspořádání a umožňuje aplikace pro stejnosměrné i střídavé signály.

Měření pomocí této metody však může ovlivňovat velký počet vlivů (rychlost, vibrace, rušení atd.), a proto je kladen velký důraz na kvalitu provedení samotného měření. Nedílnou součástí měření je také vizuální kontrola, při které jsou dohledány jednotlivé indikace (vady) poukazující na celkový stav lana.

Princip metody a konstrukce defektoskopu

Schéma uspořádání zařízení k detekci vad v ocelových lanech je znázorněno na obr. 2, přičemž hlavní princip metody je následující: po vybuzení magnetického pole ocelového lana cívkou nebo permanentním magnetem se vlivem povrchových a vnitřních poškození změní magnetický tok uvnitř ocelového lana. Poté je signál detekován indukční cívkou nebo integrovaným senzorem (např. Hallovým senzorem a magnetorezistivním senzorem) a dalším zpracováním a analýzou signálu lze stanovit typ nebo stupeň poškození. Obrázek představuje metodu detekce únikového magnetického toku založenou na buzení permanentním magnetem, přičemž snímač se používá ke shromáždění informací o únikovém magnetickém poli způsobeném poškozením.



Obr. 2 Schéma metody detekce únikového magnetického toku založená na buzení permanentním magnetem

Použitý defektoskop pro experimentální měření

Pro experimentální měření byl vyžit defektoskop typu INW-PL01, používaný pro měření plochých ocelových lan, jehož základní rozměry jsou 380x250x170 mm pro maximální měřitelný rozměr lana - 200x40 mm. Tento defektoskop je vybaven inkrementálním čidlem pro měření vzdálenosti Tacho IRC 125/1250KB - 1250 mm na otočku/5000 impulzů na metr, snímači o velikosti 175x85 mm, 160x40 mm. Zařízení dále obsahuje tři druhy snímačů, a to úzkou a širokou cívku a Hallovu sondu. K vytvoření homogenního magnetického pole je defektoskop vybaven permanentními magnety (Nd-Fe-B). Pokud je analyzovaný materiál homogenní, jeho magnetický odpor je v každém místě stejný, magnetické indukční čáry jsou uvnitř rovnoběžné. Když se železo změní v důsledku koroze (oxidace) na oxid železa, který má odlišný magnetický odpor, magnetické pole buzené permanentními magnety se v daném místě deformuje. Vzniká tak přídavné magnetické pole, které je vytlačováno mimo ocelové lano a toto pole jsme schopni pomocí cívky nebo Hallovu sondy detektovat.

Tento typ defektoskopu je primárně určen pro kontrolu plochých ocelových lan, která nejsou zabudována/skryta ve vrstvě neferomagnetického materiálu.



Obr. 3 Defektoskop na plochá ocelová lana INW-PO01

Měření bylo prováděno při zapojení jedné poloviny magnetizační hlavy, která byla přitisknuta na měřeném povrchu a druhá byla vytočena tak, aby nezasahovala do měření. Měření probíhala ve dvou režimech, a to v dynamickém a statickém režimu. Dynamický režim znamená, že vůči lanu/nosníku, které bylo v klidu, se po povrchu pohybovalo defektoskopem s konstantní rychlostí. Neoptimálnější rychlost pohybu defektoskopu vůči analyzovanému vzorku je $0,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Druhý režim, statický, předpokládá proces statického defektoskopu a pohybujícího se analyzovaného vzorku. Tento režim je typický zejména pro pohybující se tyče nebo závěsná lana u lanovek, ale i v případě betonových bloků bylo možné využít simulace tohoto režimu, a to pohybem ocelové desky za betonovou vrstvou nosníku. Výsledná odezva defektoskopu prokázala schopnost detekovat feromagnetické materiály i za vrstvou materiálu neferomagnetického.

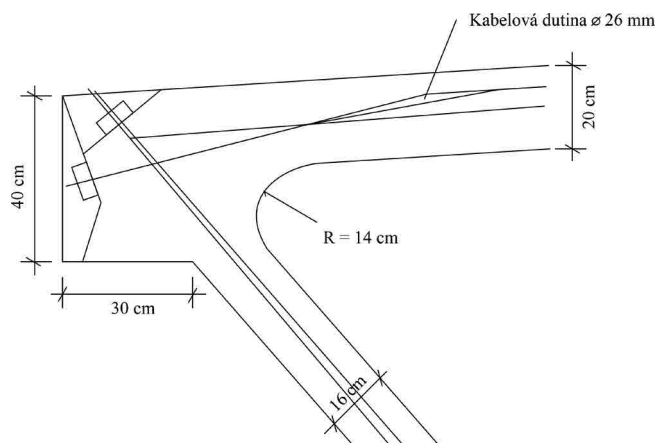
Výsledky experimentálního měření a diskuse získaných dat

Magnetická defektoskopie byla využita pro diagnostiku drátěných ocelových lan nosníků, je-li tento feromagnetický materiál pokryt velkou vrstvou betonu o tloušťce 20 cm. Předmětem experimentu byly betonové bloky s plochými ocelovými lany, viz. obr. 4. Tento typ konstrukcí často nemá v rizikových místech odpovídající ventilaci, a tedy dochází ke kondenzaci v místě kotev předpjatých lan, tato místa jsou jen velmi obtížně přístupná a těžko kontrolovatelná.



Obr. 4 Betonové bloky nosníků s plochými ocelovými lany včetně umístěného defektoskopu

Umístění lana uvnitř nosníku je patrné z obr. 5, kde je ploché drátěné ocelové lano umístěno uvnitř betonového bloku v tzv. kabelové dutině. Betonové části nosníků se zpravidla vyrábí bez předpjatých lan (kvůli dopravě), na místě se bloky sestaví, lana se předepnou a následně se dutiny injektáží vyplní betonovou směsí. Kontrola dokonalého zaplnění je komplikovaná a mnohdy není důsledně provedena. V různých místech může k ocelovým lanům pronikat vlhkost, čímž dochází ke korozi.



Obr. 5 Návrh části betonového nosníku se zabudovanými předpjatými lany

Používání stejnosměrné magnetizace a cívkových i Hallových sond umožňuje velmi přesně měřit magnetické pole a stanovovat úbytky kovového průřezu feromagnetických materiálů. Tato detekce je možná i přes velkou vrstvou neferomagnetika, což otevírá další široké možnosti uplatnění i pro ocelová lana zabudovaná např. ve vrstvě betonu, aniž by muselo dojít k jeho destrukci a odhalení samotného lana. Odezva z cívek i Hallových sond několiknásobně převyšuje úroveň šumu.

Záznam příkladu ze statického měření je uvedena na obr. 6. Horní křivka odpovídá odezvě z Hallovy sondy, graf ve střední části zobrazuje záznam z úzké cívky, nejnižší je signál produkovaný širokou cívkou. Indikace feromagnetického materiálu v dosahu sond je nejvýraznější v případě úzké cívky.



Obr. 6 Záznam z Hallovy sondy (horní část grafu) i cívkových sond (úzká cívka - střední křivka, široká cívka - dolní křivka) v případě simulace statického měření

Jak je patrné z výsledného záznamu, odezva z Hallových sond má menší odezvu, prokazatelnější výsledek je v případě cívek, avšak ve všech případech je detekce feromagnetického materiálu jednoznačně evidentní. Extrémy na křivkách odezvy z jednotlivých indikačních prvků prokazují přítomnost kovového materiálu za vrstvou betonu a je možné stanovit tímto způsobem úbytek kovového průřezu a případnou korozi lana.

Závěr

Plochá ocelová lana představují základ celé řady zařízení i stavebních prvků, s jejichž využitím se můžeme setkat v každodenním životě. Během provozu jsou lana vystavena působením mnoha negativních jevů, které snižují jejich životnost a tyto jevy mají zásadní význam pro bezpečné využívání těchto technických prvků. Ocelová lana jsou důležitými součástmi v oblasti bezpečnosti a je potřeba jejich pravidelná kontrola, neboť na jejich bezchybném provozu často závisí i lidské životy.

Cílem této práce bylo na základě experimentálního měření prokázat možnost využití defektoskopie pro předpjatá plochá lana zabudovaná do vrstvy neferomagnetického materiálu. Funkčnost a účinnost této metody byla jednoznačně prokázána i pro kontrolu drátěných ocelových lan v betonové vrstvě i bez nutnosti destrukce obalového materiálu a odhalení kovových částí. Z důvodu zajištění bezpečnosti osob je nezbytné tyto konstrukční prvky pravidelně defektoskopicky kontrolovat pro vyloučení poklesu jejich nosnosti.

Popsaná metoda nedestruktivního testování s využitím magnetické defektoskopie umožňuje spolehlivým způsobem průběžně kontrolovat stav ocelových lan v konstrukcích a předejít tak případným nehodám.

Použitá literatura

- [1] De MATTEIS, G.; ZIZI, M.; PRETE, A.: *Structural features of typical italian bridges built in the '50s: four case studies in the Province of Caserta*. 2019.
- [2] DUBROVSKII, B.A.; BELYAKOVA, V.I.; VOSTRIKOV, A.A.; KORNILOV, V.L.; SHMAKOV, V.I.; URTSEV, V.N.: Nondestructive magnetic monitoring of mechanical properties at OAO MMK: A review. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, issue 11, s. 943-946. DOI: 10.3103/S0967091208110168.
- [3] LESŇÁK, M.; FOUKAL, J.; SLIVEČKA, L.; TROJKOVÁ, J. 2011.: Study of Accumulated Defects of Steel Wire Ropes: selected peer reviewed papers from the 2nd International Conference on Functional Manufacturing Technologies (ICFMT 2010), Heilongjiang, 2010. China. *Solid State Phenomena*. 2011, vol. 177, s. 159-167. DOI: 10.4028.177.159.
- [4] MYNARČÍK, P.; MYNARZOVÁ, L.; MEC, P.; CEJNAR, J.: *Dodatečně předpjaté konstrukce střešních vazníků*, 3. díl. *Stavebnictví* 04/2021, pp 20-24, 2001.
- [5] PIŠTORA, J.; LESŇÁK, M.: Modelování a konstrukce magnetického defektoskopu ocelových lan nové generace. *Sborník vědeckých prací VŠB-TUO*, řada HGF, ISSN 0474-8476, ISBN 80-248-0358-5, Vol. XLIX, č. 1, str. 51-58, 2003.
- [6] PIŠTORA, J.; LESŇÁK, M.: Matematické modelování magnetického pole kolem ocelového lana. *Doprava a logistika*, s. 190-193, ISSN 1451-107X, 2004.
- [7] RADA, S.; CEJNAR, J.: *Dodatečně předpjaté konstrukce střešních vazníků*, 2. díl. *Stavebnictví* 03/2021, pp 18-22, 2001.
- [8] RIPKA, P.: *Magnetic sensors and magnetometers*. Boston: Artech House, xviii, 494 p., ISBN 15-805-3057-5, 2001.
- [9] *Za zřícení Trojské lávky může správce, postupoval špatně, říká soudní znalkyně*. Zdroj: https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/troja-lavka-zriceni-trojska-lavka-katastrofa-mosty-miloslava-posvarova-praha. A171202_171406_domaci_hell.IDNES.cz/zpravodajstvi [online]. [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/troja-lavka-zriceni-trojska-lavka-katastrofa-mosty-miloslava-posvarova-praha. A171202_171406_domaci_hell.

Tepelně-izolační vlastnosti ochranných oděvů a jejich vliv na tepelnou zátěž uživatele

Thermal-Insulation Characteristics of Protective Clothing and their Influence on Thermal Strain

Ing. Kamila Lunerová, Ph.D.¹

RNDr. Michal Mašín, Ph.D.¹

David Kaiser¹

Ing. Jan Pokorný²

Ing. Barbora Kopečková²

Ing. Jan Fišer, Ph.D.²

¹Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v. v. i. tř. Kpt. Jaroše 5, 602 00 Brno

²Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství Technická 2, 616 00 Brno
lunerova@sujchbo.cz

Abstrakt

Práce v osobních ochranných prostředcích (OOP) představuje zvýšené riziko vzniku tepelné zátěže. V rámci výzkumu byl u čtyř typů OOP proti CBRN látkám sledován vztah mezi tepelně-izolačními vlastnostmi OOP a vyvolanou tepelnou zátěží. Cílem výzkumu je vytvořit nástroj pro lepší predikci tepelné zátěže a přípustné doby práce ve vybraných OOP za určitých podmínek. Tepelně-izolační vlastnosti OOP byly naměřeny pomocí tepelného manekýna Newton. Tepelná zátěž uživatele v těchto OOP byla sledována na skupině 10 probandů při fyzické aktivitě v klimatické komoře za 4 různých podmínek. Data z reálných testů tepelné zátěže byly srovnány se simulačními výpočty pomocí termofyziologických modelů. Výsledky budou podkladem pro tvorbu predikčního nástroje - pomůcky pro účelnou prevenci vzniku nadměrné tepelné zátěže při práci v OOP.

Klíčová slova

Osobní ochranné prostředky, tepelná zátěž, tepelný manekýn, termofyziologické matematické modely, biotelemetrické systémy.

Abstract

Working in personal protective equipment (PPE) accounts for increased risk of thermal strain development. In our research we pursued relationship between thermal-insulation characteristics of four types of PPE against CBRN agents and the induced thermal strain. The study aims for development of tool for thermal strain prediction and estimation of allowable work time limit in selected PPE under given conditions. Thermal-insulation characteristics were measured using thermal manikin Newton. Thermal strain tests were performed with a group of 10 probands in climatic chamber under 4 different conditions in the 4 types of PPE described. The data of real thermal strain tests were compared to simulation calculations by means of thermophysiological models. The results will be used for development of prediction tool intended as effective aid for preventive measures against excessive thermal strain in PPE.

Keywords

Personal protective equipment, thermal strain, thermal manikin, thermophysiological mathematical models, biotelemetric systems.

Úvod

Osobní ochranné prostředky (OOP) proti nebezpečným chemickým, biologickým či radioaktivním (CBRN) látkám jsou určeny k izolaci uživatele od vnějšího rizikového prostředí. Ochranný oděv slouží jako účinná bariéra před průnikem nebezpečných látek k tělu uživatele, na druhou stranu i výrazně omezuje výměnu tepla mezi tělem a okolím, tzv. tepelnou bilanci organismu. S ohledem na vnější klimatické podmínky, náročnost fyzické aktivity a tepelně-izolační vlastnosti ochranného oděvu může docházet ke kumulaci tepla v organismu a vzniku tepelného stresu se souvisejícími zdravotními důsledky (nevolnost, bolest hlavy, křeče, poruchy vědomí, mdloby).

Prevenční proti vzniku tepelného stresu je odhad přípustné doby práce zohledňující aktuální vnější podmínky, typ oděvu, náročnost fyzické aktivity a samozřejmě i individuální charakteristiky daného uživatele. Pro popis a odhad tepelné zátěže existují různé matematické ukazatele tepelné zátěže, které se liší typem vstupních parametrů i složitostí výpočtu [1]. V posledních letech jsou v popředí zájmu termofyziologické matematické modely - výpočetní nástroje, které do výpočtu přípustné doby práce zahrnují širokou škálu vstupních parametrů. Jedním z nich je model PHS - Predicted Heat Strain [2], dalším a sofistikovanějším je model FMTK - Fialův model tepelného komfortu [3, 4], který do výpočtu zahrnuje i termoregulační reakci organismu.

V rámci probíhajícího výzkumu byla ověřována využitelnost dvou uvedených termofyziologických matematických modelů pro odhad přípustné doby práce v OOP proti CBRN látkám. Proběhla série více než 100 testů tepelné zátěže se skupinou probandů v klimatické komoře za čtyř různých definovaných podmínek, v nichž měli probandi čtyři různé typy ochranných kompletů s předem naměřenými tepelně-izolačními parametry. Naměřené výsledky testů tepelné zátěže byly podkladem pro ověření a optimalizaci matematických modelů PHS a FMTK formou srovnání simulačních výpočtů s daty z reálných testů.

Experimentální část

Měření tepelně-izolačních vlastností ochranných kompletů pomocí tepelného manekýna Newton

Pro tuto studii byly měřeny čtyři typy oděvů vždy doplněné o příslušnou ochranu dýchacích cest (ODC) - ochranná maska CM6 nebo autonomní dýchací přístroj (ADP) Auer Maxx a podvlekové prádlo, boty, rukavice, případně přilba.

Typy testovaných oděvů, viz obr. 1:

- izolační oděv OPCH90 PO Ecoprotect (OPCH) + ADP,
- neprodyšný lehký oděv Tychem F® DuPont (TF) + CM6,
- prodyšný filtrační oděv proti CBRN látkám FOP96 B.O.I.S.-Filtrý (FOP) + CM6,
- hasičský zásahový oděv Tiger Plus DEVA (TP).

Zásadní charakteristiky oděvu, které mají vliv na tepelnou bilanci organismu, jsou tepelná izolace oděvu I_t a výparný odpor R_{et} . Hodnoty uvedených veličin byly měřeny pomocí 34-zónového tepelného manekýna Newton na pracovišti VUT Brno, viz obr. 2.



Obr. 1 Testované ochranné komplety

Celková tepelná izolace I_t a lokální tepelné izolace I_{ti} byly naměřeny standardním postupem dle ISO 15831 [5]. Výparný odpor R_{eT} byl naměřen nestandardní metodou založenou na měření úbytku vlhkosti z „umělé kůže“ pokrývající celý povrch manekýna a přepočtu z naměřené tepelné ztráty [6]. Z naměřených hodnot I_t a R_{eT} byl vypočítán index permeability i_m pro všechny měřené typy ochranných kompletů. Výsledky shrnuje tab. 1.



Obr. 2 Ukázky z měření tepelně-izolačních vlastností oděvů pomocí 34-zónového tepelného manekýna Newton

Testování tepelné zátěže v klimatické komoře

Testy tepelné zátěže probíhaly v klimatické komoře SÚJCHBO, v. v. i. se skupinou 10 probandů (6 mužů, 4 ženy). U každého probanda byly předem naměřeny antropometrické údaje (výška, hmotnost ad.), index tělesné hmotnosti BMI, hodnota VO_{2max} (jako ukazatel fyzické kondice) a další individuální charakteristiky. Proband měl na sobě příslušný ochranný komplet a prováděl definovanou fyzickou aktivitu (chůze na ergometru) v klimatické komoře za daných podmínek. Testy s ADP byly uspořádány tak,

aby bylo možné během testu bez přerušení připojit druhou tlakovou láhev se vzduchem. Při testech v $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bylo použité teplejší podvrzkové prádlo.

Tab. 1 Tepelně-izolační vlastnosti ochranných kompletů naměřené pomocí tepelného manekýna Newton

	TF	OPCH	FOP	TP
Tepelná izolace				
I_t [$\text{m}^2\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]	0,257	0,240	0,302	0,319
I_{ti} [clo]	1,66	1,55	1,95	2,06
Výparný odpor				
R_{eT} [$\text{kPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$]	0,301	1,098	0,059	0,052
Statický index permeability				
i_m [-]	0,052	0,015	0,310	0,372

- **Podmínky v klimatické komoře:** a) $-10\text{ }^{\circ}\text{C}/25\text{ }\%$ rel. vlhkost, b) $5\text{ }^{\circ}\text{C}/25\text{ }\%$ rel. vlhkost, c) $25\text{ }^{\circ}\text{C}/20\text{ }\%$ rel. vlhkost, d) $35\text{ }^{\circ}\text{C}/20\text{ }\%$ rel. vlhkost; proudění vzduchu vždy $0,2\text{ m/s}$, chůze na ergometru ($4\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, sklon 10 °) v režimu 5 min aklimatizace + max. 4 cykly 20 min chůze + 10 min klid.
- **Maximální dosažený čas - důvody ukončení testu:** a) dosažení časového limitu 125 min nebo b) limitu srdeční frekvence ($220 - \text{věk}$) nebo c) limitu vnitřní tělesné teploty ($38,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) nebo d) vlastní žádost probanda (bolest hlavy, nesnesitelné horko aj.).

V průběhu testu byly monitorovány hodnoty fyziologických parametrů pomocí systémů Almemo/Viridia s kabelovým přenosem dat, ve studii byly ověřovány i biotelemetrické monitorovací systémy pro dálkový on-line monitoring fyziologických dat (FlexiGuard, Garmin Forerunner, myTemp, CORE). U všech testů byl zaznamenán maximální dosažený čas testu.

- **Monitorované hodnoty:** srdeční frekvence (HR), vnitřní teplota těla = teplota tělesného jádra = měřená rektální teplota (RT) a teplota kůže (t_{sk}), produkce potu.
- **Měřicí systémy fyziologických parametrů:** Viridia/FlexiGuard (HR , RT), Almemo/FlexiGuard (t_{sk}), Garmin Forerunner 935 (HR), myTemp (RT), CORE (teplota tělesného jádra, t_{sk}).

Výsledky

Maximální dosažené časy v testech tepelné zátěže za různých podmínek

Naměřené výsledky z testů tepelné zátěže (maximální dosažené časy testů a dosažená vnitřní teplota těla za daných podmínek) shrnuje tab. 2 a obr. 3. Z testů jednotlivých probandů je vidět variabilita výsledků pro jednotlivé probandy.

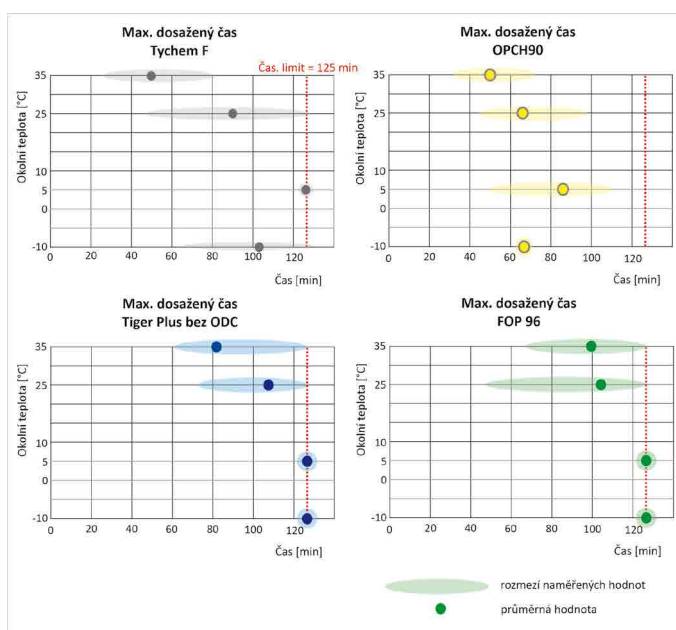
Je patrné, že tepelná zátěž (dosažení limitních hodnot srdeční frekvence nebo vnitřní teploty těla) je důležitým omezujícím faktorem pro vykonávání činnosti v OOP. Při aktivitách delších než hodinu je třeba dbát zvýšené opatrnosti a s tímto rizikem počítat se zohledněním vnějších podmínek, typu oděvu, náročnosti práce a samozřejmě fyzické kondice a aklimatizace daného pracovníka. U mnoha testů končili probandi na vlastní žádost ještě před dosažením limitní srdeční frekvence nebo vnitřní teploty z důvodu neúnosného diskomfortu (bolest hlavy, neúnosné horko, bolest zad, potíže s dýcháním...). S faktorem subjektivního pocitu diskomfortu je potřeba vždy počítat, neboť v diskomfortním stavu se pracovník nemůže soustředit plně na práci a hrozí zvýšené riziko chyb a případně i nehod.

Za zmínku stojí i skutečnost, že hasičský zásahový oděv Tiger Plus má podobné tepelně-izolační parametry jako filtrační ochranný oděv proti CBRN látkám FOP 96 a srovnatelné jsou i dosažené hodnoty tepelné zátěže.

Tab. 2 Maximální dosažené časy testů a vnitřní teplota RT (průměr z naměřených testů za daných podmínek)

Maximální dosažené časy [min] a vnitřní teploty těla RT [°C]				
	-10 °C	5 °C	25 °C	35 °C
Tychem F	102 ± 25 min 37,9 ± 0,3 °C	125 ± 0 min 37,8 ± 0,2 °C	89 ± 13 min 38,3 ± 0,2 °C	53 ± 12 min 38,3 ± 0,2 °C
OPCH 90 PO	65 ± 0 min 38 ± 0,0 °C	86 ± 20 min 37,6 ± 0,3 °C	66 ± 15 min 38,1 ± 0,1 °C	49 ± 13 min 38,0 ± 0,3 °C
FOP 96	125 ± 0 min 37,7 ± 0,3 °C	125 ± 0 min 37,7 ± 0,4 °C	107 ± 23 min 38,1 ± 0,3 °C	99 ± 23 min 38,2 ± 0,3 °C
Tiger Plus bez ODC	125 ± 0 min 38,0 ± 0,3 °C	125 ± 0 min 37,8 ± 0,2 °C	110 ± 21 min 38,1 ± 0,2 °C	81 ± 22 min 38,2 ± 0,2 °C

- Při teplotě +5 °C (celkový počet 19 testů) je dle očekávání je riziko tepelné zátěže velmi nízké. Ve všech testech bez ADP dosáhli probandi časového limitu 125 min. V ochranných kompletech s ADP končili pouze z důvodu vyčerpání vzduchu.
- Při teplotě -10 °C (celkový počet 18 testů) je riziko tepelné zátěže také velmi nízké. Objevují se však problémy opačného charakteru - probandi skončili v 5 případech na vlastní žádost z důvodu celkového ochlazení, mrznoucích rukou, bolesti hlavy nebo zad. Za zmínku jistě stojí i ukončení jednoho testu z důvodu „přehřátí“, tj. dosažení limitní vnitřní teploty těla 38,5 °C, v oděvu Tychem F, navzdory nízké vnější teplotě. Z dosavadních výsledků je vidět, že při teplotách -10 °C je riziko tepelné zátěže pro činnost trvající do 125 min nízké, naopak je možné uvažovat o možné úpravě podvlekového prádla a zejména rukavic tak, aby zajištěn tepelný komfort pracovníka po celou dobu vykonávání činnosti.
- Při teplotě 25 °C (celkem 38 testů) jsou patrné rozdíly mezi neprodyšnými oděvy (TF a OPCH s $i_m < 0,1$) a prodyšnějšími oděvy (TP a FOP s $i_m \approx 0,30 - 0,35$). Zatímco pro prodyšné oděvy (TP a FOP) byl časový limit 125 min dosažen u 54 % (TP bez ODC), resp. 58 % (FOP) testů a průměr dosažených časů byl 107 min, resp. 110 min, pro neprodyšné oděvy TF a OPCH při 25 °C je vidět, že čas 125 min je z hlediska objektivní tepelné zátěže většinou nedostižný.
- Při teplotě 25 °C bylo u neprodyšných oděvů TF dosaženo časového limitu 125 min sotva u 15 % testů (průměr konečných časů 89 min) a u OPCH 0 % (průměr konečných časů 66 min). Důvodem pro dřívější ukončení testu (před 125. min) bylo pro TP dosažení limitu teploty tělesného jádra RT (16 %) nebo vlastní žádost (bolest hlavy, bolest na hrudi). Je doložena objektivní tepelná zátěž (dosažení limitu RT nebo SF) v 46 % (TF), resp. 33 % testů (OPCH), většinou však probandi končili na vlastní žádost (neúnosné horko, nevolnost, bolest hlavy, dechové potíže). Pro prodyšné oděvy (TP, FOP) při 35 °C je vidět, že dosažení časového limitu 125 min je velmi omezené (pouze 8 % testů u TP s průměrnou délkou testu 81 min, resp. 33 % u FOP s průměrnou délkou testu 99 min). Ve většině případů byla objektivní tepelná zátěž (dosažení limitu RT nebo SF) u 33 % testů v TP i FOP. U TP bez ODC pak 50 % probandů skončilo na vlastní žádost (neúnosné horko, nevolnost, bolest hlavy).



Obr. 3 Výsledky testů tepelné zátěže - maximální dosažené časy (průměr ze všech testů a rozmezí naměřených hodnot)

- Teplota 35 °C (celkem 41 testů) je náročné prostředí pro všechny typy oděvů. Pro prodyšné oděvy (TP, FOP) při 35 °C je vidět, že dosažení časového limitu 125 min je velmi omezené (pouze 8 % testů u TP s průměrnou délkou testu 81 min, resp. 33 % u FOP s průměrnou délkou testu 99 min). Ve většině případů byla objektivní tepelná zátěž (dosažení limitu RT nebo SF) u 33 % testů v TP i FOP. U TP bez ODC pak 50 % probandů skončilo na vlastní žádost (neúnosné horko, nevolnost, bolest hlavy).
- Neprodyšné oděvy (TF, OPCH) při teplotě 35 °C představují vysoké riziko tepelné zátěže. Průměrná doba testu je 53 min (TF), resp. 49 min (OPCH), testy se musely ukončit z důvodu dosažení limitní SF nebo RT, u OPCH většinou na vlastní žádost probanda (neúnosné horko, bolest hlavy, nevolnost). Z výsledků je patrné, že při takto vysokých okolních teplotách je třeba velmi důsledně zohledňovat riziko tepelné zátěže, neboť zejména u lehkého neprodyšného oděvu TF jsou probandi schopni subjektivně „vydržet“ horko, i když organismus již překračuje limitní hodnoty. U izolačního oděvu typu OPCH je vidět, že k přehřívání organismu může dojít i dříve, než je vyčerpána kapacita jedné tlakové lahve (cca 45 min, samozřejmě závisí na konkrétním objemu a prováděné aktivitě).

Výsledky testů byly dále zpracovány na VUT v rámci ověřování a optimalizace termofyziologických modelů. Lze očekávat, že matematický model, který pracuje se simulacemi několika parametrů (včetně tělesných proporcí, fyzické kondice, předpokládané náročnosti práce) najednou, bude poskytovat přesnější výsledky než pouze hrubý odhad na základě vnějších podmínek a typu oděvu.

Ověřování a optimalizace termofyziologických matematických modelů

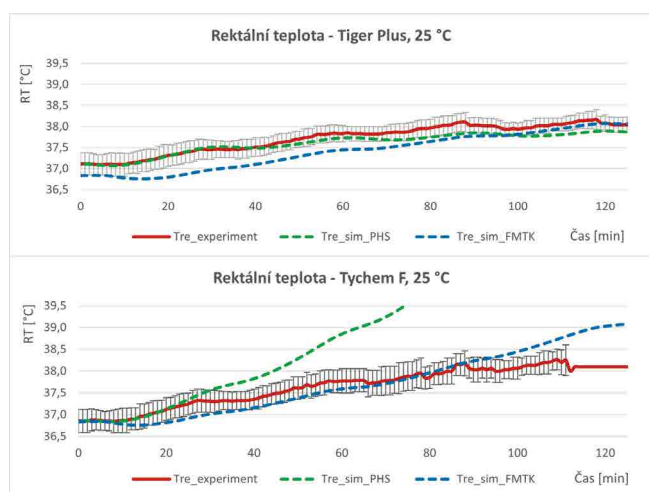
V rámci probíhajícího výzkumu byly testovány dva termofyziologické matematické modely s cílem ověřit jejich použitelnost pro odhad přípustné doby práce v ochranném kompletu z hlediska tepelné zátěže v důsledku kumulace tepla v těle a souvisejícího nárůstu vnitřní teploty těla:

- PHS (Predicted Heat Strain) založený na analytickém přístupu popsáném v normě ISO 7933 [2] a
- FMTK (Fialův model tepelného komfortu) [3, 4], který je založen na výpočtu tepelné výměny v těle s ohledem na individuální antropometrická data uživatele, vnější klimatické podmínky, tepelně-izolační vlastnosti ochranného kompletu a předpokládanou náročnost fyzické aktivity. Model FMTK pracuje jako dynamický, tj. skládá se ze soustavy parciálních diferenciálních rovnic přenosu tepla v lidských tkáních.

Pro oba modely byla provedena řada simulačních výpočtů pro dané oděvy, vnější podmínky a „univerzálního“ probanda. Výsledné hodnoty pak byly srovnány s průměrnými hodnotami z reálných testů za stejných podmínek. Příklady chování jednotlivých modelů jsou uvedeny na obr. 4.

Z výsledků vyplývá, že oba termofyziologické modely, PHS i FMTK, jsou použitelné i pro oděvy s vyšší hodnotou celkové tepelné izolace I_{cl} (1,55-2,06 clo), což je hodnota převyšující rozmezí použitelnosti PHS modelu uvedené v normě ISO 7933 (s rozmezím základní tepelné izolace oděvu I_{cl} 0,1-1,0 clo). Podobně i model FMTK.

Použitelnost termofyziologických matematických modelů však výrazně závisí na hodnotě statického indexu permeability i_m . Pro oděvy „prodyšné“, tj. se střední hodnotou i_m (0,3-0,4), jsou dobře použitelné oba modely - jednodušší model PHS (zatím ověřeno v rámci deklarovaných podmínek použitelnosti modelu PHS (tj. 5-50 °C) i složitější FMTK. Pro oděvy „neprodyšné“ s nízkou hodnotou $i_m < 0,1$ však dává model PHS nereálné výsledky. Pro „neprodyšné“ oděvy je vhodnější použití termofyziologického modelu FMTK, který poskytuje mnohem reálnější predikce, je však výpočetně výrazně náročnější.



Obr. 4 Příklady simulačních výpočtů nárůstu teploty tělesného jádra (Tre) pomocí modelu PHS (Tre_sim_PHS) a FMTK (Tre_sim_FMTK) ve srovnání s reálnými daty (Tre_experiment) vč. směrdatných odchylek pro oděv prodyšný TP a neprodyšný TF

Závěr

Bylo ověřeno, že zásadním parametrem oděvu, který ovlivňuje vznik a nárůst tepelné zátěže je index propustnosti vlhkosti i_m , podle kterého lze ochranné oděvy rámcově rozdělit na „prodyšné“ (i_m 0,3 - 0,4) a „neprodyšné“ ($i_m < 0,1$), kde rozdíl mezi nimi z hlediska maximální doby práce za stejných podmínek může být i několik desítek minut.

Jako prevenci proti nadměrné tepelné zátěži lze provést odhad přípustné doby práce v OOP na základě simulačních výpočtů pomocí termofyziologických modelů. Pro „prodyšné“ oděvy jsou použitelné oba testované termofyziologické modely - jednodušší PHS i výpočetně náročný FMTK. Pro „neprodyšné“ oděvy je však použitelný pouze model FMTK, neboť model PHS výsledky nadhodnocuje.

V současné době se pracuje na doplnění dat, zpracování simulačních výsledků z jednotlivých matematických modelů, validaci navržených postupů formou terénních testů v ochranných oděvech a zejména na zpracování výsledné podoby simulačních výsledků, aby práce s výsledky matematických modelů byla snadno využitelná i v praxi při plánování činnosti v ochranných kompletech.

Poděkování

Výzkum byl podpořen projektem VH20182021036 „Moderní metody detekce a identifikace nebezpečných CBRN látek a materiálů, metody snížení jejich nebezpečnosti a dekontaminace; moderní prostředky ochrany osob“ z programu Bezpečnostního výzkumu MV ČR a programem VUT Brno FSI-S-17-4444.

Autoři děkují kolegům z Laboratoře pro sledování osob v extrémních podmínkách SÚJCHBO, v. v. i. a všem zapojeným probandům za spolupráci při provádění testů tepelné zátěže.

Použitá literatura

- [1] SLABOTINSKÝ, J.; LUNEROVÁ, K.: *Fyziologická zátěž člověka při práci v OOP v kontaminovaném prostředí*, Edice SPBI spektrum č. 95, vyd. SPBI, z.s. v Ostravě, ISBN 978-80-7385-192-7 (2017).
- [2] ISO 7933:2004: Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain.
- [3] POKORNÝ, J.; FIŠER, J.; FOJTLÍN, M.; KOPEČKOVÁ, B.; TOMA, R.; SLABOTINSKÝ, J.; JÍCHA, M.: Verification of Fiala-based human thermophysiological model and its application to protective clothing under high metabolic rates. *Building and Environment*, vol. 126, p. 13-26 (2017) ISSN 0360-1323.
- [4] KOPEČKOVÁ, B.; POKORNÝ, J.; LUNEROVÁ, K.; FIŠER, J.; JÍCHA, M.: Case study comparing Fiala-based thermophysiological model and PHS index with experimental data to predict heat strain in normal and protective clothing. *Journal of Measurements in Engineering* 9(1), 36-47 (2021), ISSN 2424-4635.
- [5] ČSN EN ISO 15831: Oděvy - Fyziologické účinky - Měření tepelné izolace pomocí tepelné figuríny (2004).
- [6] TOMA, R.; KUKLANE, K.; FOJTLÍN, M.; FIŠER, J.; JÍCHA, M.: Using a thermal manikin to determine evaporative resistance and thermal insulation - A comparison of methods. *Journal of Industrial Textiles* 2020 (1), p. 1-23 (2021) ISSN 1530-8057.

Možnosti ochrany hasičů před karcinogenní kontaminací při požárech

Possibilities of Protection of Firefighters Against Carcinogenic Contamination in Case of Fires

Ing. Jiří Slabotinský, CSc.¹

Ing. Pavel Častulík, CSc.¹

Mgr. Jaromír Sobotka, Ph.D.¹

Mgr. Jakub Vaněk, Ph.D.²

¹Dekonta, a.s.

Vídeňská 134/102, 619 00 Brno

²Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i.

Kamenná 71, 262 31 Milín

jiri.slabotinsky@dekonta.cz

Abstrakt

Článek se zabývá problematikou ohrožení zdraví hasičů při požárech kontaminovaných karcinogenními polycyklickými aromatickými uhlovodíky (PAH) jako produkty hoření. Hasičský zásahový oděv má nízký ochranný faktor (F) proti průniku PAH v rozsahu 8-89. Průniku PAH lze zabránit uhlíkovými bariérovými materiály s adsorpčními schopnostmi při zachování prodyšnosti a odpařování potu, kde je F zvýšen až na hodnoty 2500-5000 [6]. V článku je uvedeno řešení ochranného adsorpčního podvlekového oděvu pomocí laminované uhlíkové adsorpční textilie Flexzorb, která je tenká, s nízkou hmotností, vysokou prodyšností a adsorpční kapacitou na plyny a páry chemických látek. Navržené soupravy adsorpčního podvlekového oděvu prokázaly jejich bezpečnou konstrukci při testech integrity v atmosféře chlóru v toxické komoře Státního ústavu jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i.

Klíčová slova

Adsorpční uhlíková textilie, hasiči, ochranný faktor, osobní ochranné prostředky, polycyklické aromatické uhlovodíky, protichemická ochrana, průnik.

Abstract

The article deals with firefighters' health hazards in fires contaminated with carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) as combustion products. Firefighting garment has a low protection factor (F) against PAH penetration in the range of 8-89. PAH penetration can be prevented by carbon barrier materials with adsorption capabilities while maintaining breathability and sweat evaporation, where F is increased up to 2500-5000 [6]. The article presents a solution of protective adsorption undergarment using laminated carbon adsorption fabric Flexzorb, which is thin, low weight, highly breathable, and has adsorption capacity for gases and chemical vapours. The proposed sets of protective adsorption undergarments demonstrated their safe construction during integrity tests in the chlorine atmosphere in the toxic chamber of the State Institute of Nuclear, Chemical and Biological Protection.

Keywords

Adsorption carbon fabric, firefighters, chemical protection, personal protective equipment, penetration, polycyclic aromatic hydrocarbons, protection factor.

Úvod

K ochraně osob před vnějším nebezpečím v prostředí toxických chemických látek se používají osobní ochranné prostředky (OOP). Tradičně nejvyšší míra ochrany povrchu těla osob je zaměřena proti vysoce toxickým látkám, jakými jsou například bojové chemické látky (BCHL) a toxické průmyslové látky. Typem takové nejvyšší ochrany je izolační ochranný oděv, který vytváří neprodyšnou bariéru mezi chráněnou osobou a kontaminovaným vnějším prostředím, což při použití dýchací aparatury zahrnuje i izolaci orgánů dýchání. Taková ochrana má však výrazné kapacitní omezení. A to nejen z hlediska obsahu vzduchu v tlakové láhvi, ale také z fyziologického hlediska, protože je za zvýšené teploty téměř znemožněno předávání metabolického tepla chráněné osoby do okolí, jako podmínka termoregulace těla. Převážná část zásahů hasičů je však v podmínkách vysokých teplot při požárech, kdy je potřebný jiný typ izolace od okolí především oděvy chránícími před vysokou teplotou, které jsou na textilní bázi. Při hoření vzniká velké množství zplodin obsahující chemické sloučeniny polyaromatického charakteru, které mají karcinogenní a teratogenní účinky na organismus. A to nejen při vdechování, čemuž dokonale zabráňuje nezávislý zdroj vzduchu z tlakové láhve, ale také permeací skrze pokožku. V tomto směru je perkutánní vnikání podobné, jako u tzv. perkutánně účinných BCHL, jejichž toxický i karcinogenní účinek je také znám (viz. obr. 1 a 2).

Jedna ze skupin látek vznikající při požáru jsou polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH), které společně s benzenem, jenž je základní aromatickou strukturou, zahrnují celou řadu cyklických aromátů, např., antracen, fenantren, nebo benzo[a]pyren. Karcinogenita těchto látek byla statisticky prokázána v několika studiích z různých zemí světa [1-5]. Že se jedná o závažný problém vedoucí k výskytu rakovinných onemocnění různých částí těla např. kostní dřeni (myelom), kůže (melanom), tlustého střeva, ledvin nebo prostaty (adenokarcinom) a plic (mesotheliom), uvádí např. Pukkala [2]. Dopady se projevují u 1 až 1,5 smrtelných případů ze 100 s 95 % pravděpodobností po dlouhodobém působení PAH na organismus hasičů. Nejvyšší vliv je, podobně jako u kuřáků, vdechováním (respirací) a požitím (ingescí) [1-3]. Nebezpečí však vzniká i po vniknutí PAH pod oděv, kde může nastat dokonce situace, že koncentrace pod oděvem je vyšší než v okolí [8]. Z tohoto důvodu autoři doporučují po opuštění prostoru rozepnout oděv a vyvětrat [8]. Tím se zřejmě sníží koncentrace škodliviny pod oděvem, nicméně po sejmutí ochranných dýchacích orgánů mohou být PAH vdechovány při jejich odpařování po sublimaci z povrchu oděvu a adhezí na povrchu pokožky.

Třikrát vyšší incidence výskytu rakoviny kůže u hasičů oproti běžné populaci je varovným rizikem pro potřebu zlepšení jejich ochrany jako součást profesní bezpečnosti ochrany zdraví při práci [1, 2].

Tuto situaci si dobře uvědomují výzkumní a vývojoví pracovníci [6-8], kteří hledají možnost snížení průniku nebezpečných látek pod neplynotěsný ochranný oděv hasičů. K průniku dochází jak samotnou textilií, tak také netěsnostmi ve spojích jednotlivých částí soupravy [6-8] a na netěsných rozhraních jednotlivých částí zásahového oděvu. Bylo zjištěno, že už po 25 minutách práce v prostředí obsahujícím PAH se na rukách pod oděvem objevila 10 % hodnota koncentrace PAH vnějšího prostředí, následovaná 2-4 % vnější koncentrace na hrudi, stehně a za krkem [6]. Takto

vysokým průnikům lze poměrně úspěšně zabránit tím, že se pod ochranný oblek vloží speciální podvlek s textilií se sférickým uhlíkovým adsorbentem třetí generace, který se používá pro tzv. prodyšné filtrační ochranné oděvy, např. využívané v armádě ČR pod označením FOP 96 [9]. Použitím adsorpčního podvleku, může dojít až k tisícinásobnému snížení koncentrace PAH, která by se jinak dostala skrze zásahový oděv [6] na povrch pokožky.

Poznatky z dříve vyvíjených vojenských prodyšných ochranných oděvů se staly podnětem k využití vyvíjeného lehkého ochranného obleku z laminované uhlíkové adsorpční textilie poslední generace k podobnému účelu.



Obr. 1 Ilustrační foto - výcvik hasičů při hoření dřevěných palet v zásahovém oděvu



Obr. 2 Nahore - likvidace požáru na skládce pneumatik; Dole - kontaminace pokožky obličeje hasiče produkty hoření obsahující PAH

Laminovaná uhlíková adsorpční textilie Flexzorb

Laminovaná uhlíková textilie Flexzorb FM30K D151, jejímž výrobcem je firma Chemviron Carbon je oboustranný laminát uhlíkové adsorpční pleteniny FM30K mezi dvěma polyesterovými tkaninami. Vlastnosti textilie jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Základní vlastnosti laminované adsorpční textilie Flexzorb FM30K D151

h [mm]	m [g.m ⁻²]	R [11] [mm.s ⁻¹]	R_{et} [10] [Pa.m ² .W ⁻¹]	λ [12] [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	R_p [12] [K.m ² .W ⁻¹]
0,725	192	363	2,6	0,048	0,016

Pozn.: h - tloušťka; m - plošná hmotnost; R - prodyšnost; R_{et} - paropropustnost; λ - tepelná vodivost; R_p - plošný tepelný odpor.

Z tab. 1 je zřejmá velmi malá tloušťka laminátu, vysoká prodyšnost a s tím související velmi vysoká propustnost pro pronikání vodních par. Pro srovnání má ohnivzdorná bavlněná kombinéza $R_{et} = 38$ [13], zásahový oděv s Nomexem $R_{et} = 39$ a Goretex oděv $R_{et} = 44$. Při $R_{et} \geq 20$ je paropropustnost pokládána za neuspokojivou, naopak při $R_{et} < 6$ pak za velmi dobrou.

Při vysoké propustnosti pro vzduch má uvedená adsorpční textilie i vysokou schopnost zachytu pronikajících molekul nebezpečných látek. To je dáno strukturními parametry materiálu, především velikostí adsorpční plochy a také objemem pórů, zejména mikropórů, které se nachází téměř na povrchu vláken pleteniny (minimum mezo- a makropórů). Cesta molekul par k zachytu v mikropórech je tedy téměř okamžitá (viz tab. 2). Vzhledem k tomu, že údaje v tab. 2 jsou vztahovány na jednotku hmotnosti materiálu, jsou hodnoty u laminátu nižší. Na adsorpčních vlastnostech se to však neprojevuje.

Tab. 2 Strukturální parametry pleteniny FM30K a jejího laminátu FM30K D151 [14]

Textilie	a [m ² .g ⁻¹]	b [cm ³ .g ⁻¹]	c [cm ³ .g ⁻¹]	d [cm ³ .g ⁻¹]	e [cm ³ .g ⁻¹]	Poznámka
Flexzorb FM30K	1543	354,7	0,572	0,531	0,156	Mikroporézní, málo mezoporézní
Flexzorb FM30K D151	1016,8	233,6	0,381	0,355	0,115	Mikroporézní, málo mezoporézní

a - adsorpční povrch; b - naadsorbovaná monomolekulární vrstva; c - celkový objem pórů; d - objem mikropórů; e - objem mezopórů a makropórů.

Adsorpční vlastnosti Flexzorb a jeho vliv na pronikání testovacích látek

Odolnost protichemických ochranných materiálů se hodnotí pomocí údajů průniku limitní hodnoty koncentrace za vrstvou textilie. Vzorky jsou vystaveny působení aerosolu nebo parám testovací látky na lící stranu soustavy vzorků, přičemž se na její rubní straně indikátorem nebo chromatograficky stanovuje čas průniku limitní koncentrace. Tato doba se nazývá průnik a označuje jako rezistenční doba (RD). Výsledky RD na vybrané chemické látky jsou uvedeny v tab. 3 v porovnání s údaji laminované perspirační textilie s polyuretanovou nanovláčkovou membránou NANOMEMBRANE z níž byl zhotoven svrchní oděv pro záchranáře označený jako NANOTEX. Z Flexzorb FM30K D151 byl zhotoven uhlíkový adsorpční oděv označovaný jako DEKONTEX (viz obr. 5a, 6).

Tab. 3 Rezistenční doba (RD) jednotlivých materiálů a jejich kombinace proti vybraným testovacím látkám při teplotě +25 °C

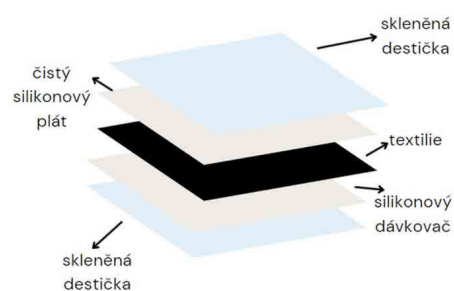
Označení bariérového vzorku	RD [min]		
	Jód [17]	DMMP [15]	Yperit [16]
NANOMEMBRANE	5	5	2
Flexzorb FM30K	214	1200	> 420
NANOMEMBRANE + FM30K	318	1320	> 420
Flexzorb FM30K D151	200	1200	> 420
NANOMEMBRANE + FM30K D151	320	1320	> 420

DMMP - dimethylmethyl fosfonát.

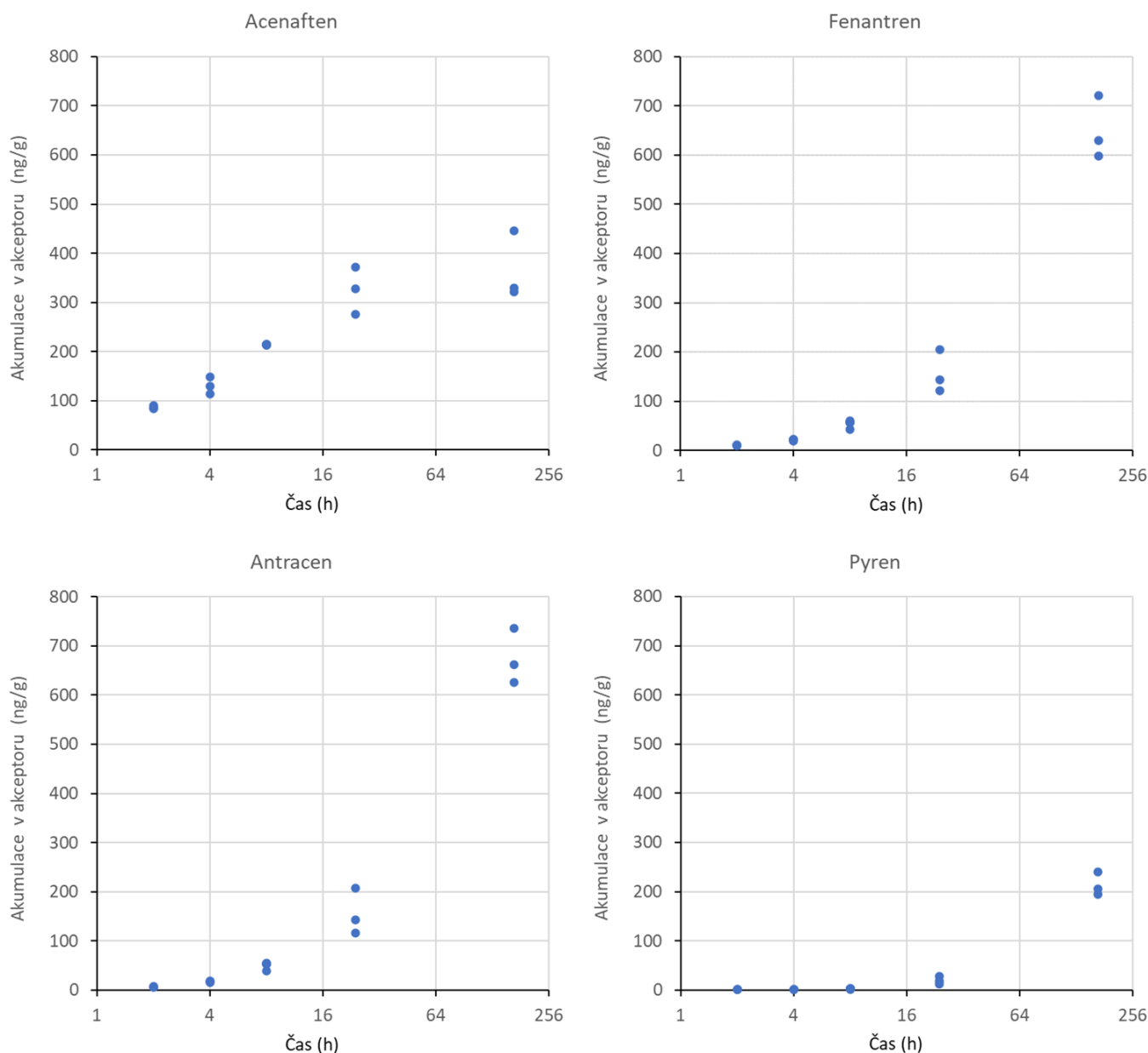
Bariérový materiál NANOMEMBRANE, podobně jako všechny laminované textilní materiály, je téměř neprodyšný (neprofoukne ho vítr) a současně vykazuje dobrou propustnost pro vodní páry [19]. Přesto je zřejmé, že materiálem poměrně snadno pronikají molekuly všech testovacích látek, které stačí na vyvolání limitní hodnoty průniku za velmi krátkou dobu.

Měření pronikání produktů hoření stanovených v laboratořích RECETOX MU Brno

Pro stanovení průniku zplodin hoření byla použita metoda „sendviče“, spočívající v tom, že PAH homogenně nadávkované v donorové silikonové membráně (silikonový dávkovač) difundují skrze vrstvu ochranné textilie do čisté akceptorové silikonové membrány (čistý silikonový plát) ležící nad ní. Z akceptorové silikonové membrány se ve stanovených časových intervalech odebírají vzorky pro hodnocení průniku. Princip je zřejmý z obr. 3.



Obr. 3 Schéma „sendviče“. Tok látky směřuje ze silikonového dávkovače ve spodní části sendviče (donorová složka) přes textilií do čistého silikonového plátu (akceptorová složka) v horní části sendviče



Obr. 4 Časová závislost permeability zástupců polycyklických aromatických uhlovodíků (produkty hoření/spalování) skrze bavlněnou textilií

Nejvíce zastoupenými látkami při hoření bývají obvykle fenantren a antracen, u kterých je patrný lineární nárůst koncentrace v čase (obr. 4). Acenaften, jako zástupce velmi těžkého PAH, dosáhl téměř rovnováhy již po pár hodinách od počátku experimentu. U pyrenu je také patrný lineární nárůst, i když vzhledem k povaze pyrenu (větší molekula a hydrofobnější charakter) lze předpokládat pomalejší přestup z donoru do akceptoru.

Jako srovnávací textilie byla použita bavlněná látka. K pronikání dochází především pórovitostí textilie, tedy mezerami mezi nitěmi nebo vlákny. I tak se jedná o velmi malé množství průniku, které dokáže adsorbent na bázi aktivního uhlíku spolehlivě adsorbovat [20]. K pronikání PAH dochází na molekulární úrovni difúzí a v adsorbentu na bázi aktivního uhlíku se zachycují především fyzikální adsorpcí s vysokou účinností (až 99,9 %) [21]. Jestliže to srovnáme se záchytem jódu, který sublimuje, má mnohem menší molekulu a také stonásobně vyšší tenzi par než nejjednodušší sublimující PAH naftalen (0,4 vs. 0,004 Pa), pak je zřejmý důvod předpokládaného vysokého adsorpčního záchyty PAH v uhlíkovém adsorbentu. Potvrzují to i hodnoty pro simulant organofosfátů DMMP a yperitu (tab. 3).

Testování těsnosti vzorků oděvů NANOTEX a DEKONTEX

Z předchozích údajů je zřejmé, že k pronikání zplodin hoření, stejně jako jiných plynných chemických škodlivin bude docházet především mezerami v textiliích a ve spojích, které bývají větší, než jsou velikosti molekul plynů. Textilie NANOMEMBRANE vykazuje velice nízkou propustnost částic aerosolu NaCl na úrovni $4 \cdot 10^{-3} \%$. To znamená, že každá čtvrtá mezera v textiliích má velikost 400-600 nm. V tomto ohledu ochranný oděv NANOTEX má velmi dobré ochranné vlastnosti proti aerosolům. Pokud však proti tomuto pronikání není nastavena nějaká překážka, ať dodatečným záchytem nebo větráním filtrovanou vnější atmosférou, dochází k průniku chemické škodliviny až na pokožku, protože velikost molekul má maximální rozměr okolo 100 nm. U ochranných oděvů se posuzuje účinnost záchyty nejen vzorkem bariérového materiálu, ale rovněž celým povrchem oděvu a konstrukčními spoji, za podmínek pohybu osob v ochranném oděvu. Tato účinnost se nazývá plynůstností a vyjadřuje se jako ochranný faktor F (rovnice 1), což je v tomto případě poměr celkové dávky D_c plynné

látky, která by působila na nechráněného člověka k součtu dávek lokálními průniky ochranným oděvem $\sum D_p$. Dané průniky jsou indikovány speciálním detekčním spodním prádlem [18].

$$F = \frac{D_c}{\sum D_p} \quad (1)$$

Ochranný oděv je tím kvalitnější, čím je $F > 1$, tedy kolikrát je větší vnější dávka než průnik látky do pododěvového prostoru.

Pro tyto účely se pro snadnou indikaci průniku využívá plynný chlór, který na detekčním podvleku, způsobuje barevné změny v místě průniku [18]. Osoby během testování těsnosti ochranných oděvů vykonávají předepsané pohyby (dřepy, vzpažení, chůzi) v toxikologické komoře v koncentraci chlóru 6 ppm, což odpovídá $17,4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ a průtoku $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Při celkové ploše oděvu 2 m^2 by za dobu expozice chlóru 30 min mohla být maximální dávka přibližně 313 mg. Jak je vidět z obr. 5c a 5d, oděvem NANOTEX, zhotoveného z méně prodyšné avšak perspirační laminované textilie NANOMEMBRANE, pronikl chlór v poměrně značné míře a to celkem 10,65 mg, kde výsledný $F = 29$. Naopak mnohem prodyšnějším oděvem DEKONTEX s adsorpčními vlastnostmi nepronikl chlór žádný (obr. 5b). Výsledky pro oděv NANOTEX jsou podle jednotlivých částí oděvu uvedeny v tab. 4. Z obr. 5c a 5d je vidět, že k pronikání skutečně dochází materiálem oděvu, přičemž pouze tam, kde nebylo další krytí jinou vrstvou či materiálem (kapsa, popruhy, filtroventilační souprava, zesílení sedací části, loktů nebo volnost na kapuci). Mimo to je průnik poměrně rovnoměrný.

Tab. 4 Množství chlóru proniklého oděvem NANOTEX

Veličina	Kalhoty		Blůza		Kapuce		Celý oděv
	zepředu	zezadu	zepředu	zezadu	zepředu	zezadu	
Celková plocha [cm ²]	4104	4283	5111	5265	782	756	20301
Celková plocha průniku [cm ²]	4057	2754	1897	2281	-	-	10989
Celková dávka [mg]	3,97	3,39	1,40	1,89	-	-	10,65



Obr. 5 a - testované oděvy NANOTEX (uprostřed) a DEKONTEX (po stranách); b - zabarvení indikačního prádla pod oděvy DEKONTEX po testu v toxikologické komoře s atmosférou chlóru; c, d - zabarvení indikačního prádla pod oděvem NANOTEX po testu v toxikologické komoře s atmosférou chlóru



Obr. 6 Navržený podvlek DEKONTEX z adsorpční uhlíkové textilie Flexzorb FM30K D151 s dýchacím přístrojem

Závěrečné hodnocení

Nebezpečí průniku karcinogenních zplodin hoření skrze zásahové požární oděvy, zejména při vysokých teplotách (okolo +150 °C) jsou reálným nebezpečím ohrožujícím zdraví hasičů, zvýšením rizika kožních karcinomů. Ukazují to potenciální průniky porézní textilii, ze které je vytvořen hasičský zásahový oděv. Totéž potvrzují i naměřené výsledky pronikání čtyř modelových PAH při podstatně nižších teplotách v laboratořích RECETOX, Masarykovy univerzity v Brně. Princip pronikání je v daném případě stejný, jako je tomu u pronikání plyných látek při hodnocení protichemických ochranných oděvů. Oděvy i při mikroporozitě umožňují difúzní pronikání molekul par, protože velikosti mezer v textilii zpravidla několikanásobně překračují velikost molekul (400-600 nm vs 150-100 nm). Pronikání zplodin hoření zásahovým oděvem je tímto způsobem pouze zpomalováno, avšak při velmi nízké hodnotě limitní koncentrace průniku má zásahový oděv velmi malý ochranný účinek. Aplikaci bariérových uhlíkových adsorpčních textilií je možné tento nedostatek zcela eliminovat, jak ukazují poznatky z experimentálního využití mnohem účinnější uhlíkové adsorpční textilie Flexzorb čtvrté generace. Jejich výhoda oproti jiným adsorpčním textiliím předchozí druhé a třetí generace spočívá ve velmi rychlé adsorpci molekul a také ve velmi malé tloušťce a hmotnosti materiálu a principiální nehořlavosti.

Doplňkové ochranné prvky na bázi vysoce účinných adsorpčních textilií mohou velmi výrazně omezit jak akutní, tak chronické expozice hasičů proti karcinogenním a teratogenním zplodinám hoření při zásazích.

Poděkování

Sdělení je součástí dílčích výstupů z výzkumného a vývojového projektu Programu bezpečnostního výzkum MV ČR i.k. VI20192022157 „Technické řešení osobních ochranných oděvů s využitím nanokompozitních bariérových materiálů proti průmyslovým a CBRN látkám“ (NANOTEX).

Použitá literatura

- [1] STEC, A.A. et al.: Occupational Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Elevated Cancer Incidence in Firefighters. *Scientific Reports* (2018) 8:2476 DOI:10.1038/s41598-018-20616-6.
- [2] PUKKALA, E. et al.: Cancer incidence among firefighters: 45 years of follow-up in five Nordic countries. *Occup Environ Med* 2014;0:1-7. doi:10.1136/oemed-2013-101803.
- [3] GRACE, K., LM et al.: Cancer Risk Among Firefighters: A Review and Meta-analysis of 32 Studies. *JOEM* Volume 48, Number 11, November 2006.

- [4] Daniels, D.R. et al.: Mortality and cancer incidence in a pooled cohort of US firefighters from San Francisco, Chicago and Philadelphia (1950-2009). *Occup Environ Med* 2014;71:388-397. doi:10.1136/oemed-2013-101662.
- [5] Fent, W.K. et al.: Evaluation of Dermal Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Fire Fighters Health Hazard Evaluation. *Report No.* 2010-0156-3196 December 2013.
- [6] Ekberg, L., Langer, S., Strandberg, B.: Testing of clothing for the protection of firefighters against exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in fire smoke. *CIT Energy Management 1* (23). Report Gothenburg, 25 May 2021.
- [7] Andersson, A., Ekberg, L.: Fire Smoke Penetration Test of Different Fire Fighter Garment Materials. *CIT Energy Management 1* (10) Göteborg 2019-12-02.
- [8] Mayer, A.C. et al.: Impact of select PPE design elements and repeated laundering in firefighter protection from smoke exposure. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. <https://doi.org/10.1080/15459624.2020.1811869>.
- [9] NBC ochranné oděvy. www.bois-filtry.cz.
- [10] ISO 11092. Propustnost pro vodní páry.
- [11] ČSN EN ISO 9237. Prodyšnost.
- [12] Interní norma č. 23-304-02/01 Měření tepelných vlastností na přístroji Alambeta.
- [13] SLABOTINSKÝ, J.; LUNEROVÁ, K.: *Fyziologická zátěž člověka při práci v osobních ochranných prostředcích v kontaminovaném prostředí*. Edice SPBI SPEKTRUM 95 (2017).
- [14] PAVLOVSKÝ, J.: *Stanovení textury vzorků*. Protokol VŠB-TUO. HS Dekonta 6172107 (říjen 2021).
- [15] Akreditovaná metodika SÚJCHBO MAZL 16-95/Permeatest 2 „Stanovení odolnosti fóliových materiálů proti pronikání organických rozpouštědel pomocí GC-FID a GC-PID“.
- [16] Akreditovaná metodika SÚJCHBO MAZL 03-95/Mikrotest, „Stanovení rezistenční doby ochranných materiálů proti kapkám yperitu ve statických podmínkách na indikátor“.
- [17] Akreditovaná metodika MAZL 04-95/Aciditest 1 „Stanovení odolnosti materiálů proti kyselinám a zásadám na indikátor“.
- [18] Akreditovaná metodika MAZL 37-09/LUCIE „Stanovení těsnosti protichemických oděvů kolorimetricky“.
- [19] BAJZÍK, V.: *Technické řešení osobních ochranných oděvů s využitím nanokompozitních bariérových materiálů proti průmyslovým a CBRN látkám*. Průběžná zpráva etapy 1 pro firmu Dekonta, a.s. (TUL 11.12.2019).
- [20] XI, Y. et al.: Research progress of gaseous polycyclic Aromatic Hydrocarbons purification by adsorption. *Aerosol Air Qual. Res.* 19: 911-924. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.11.0398>.
- [21] ZHANG, Ch. et al.: Adsorption and De-Sorption of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Activated Carbon. *J Environment Analytic Toxicol* 2012, 2:1 DOI: 10.4172/2161-0525.1000116.

Kybernetická rizika na robotizovaných pracovištích s použitím umělé inteligence a možná bezpečnostní opatření

Cyber Risks in Robotic Workplaces Using Artificial Intelligence and Possible Safety Measures

Ing. Pavel Šuška

Ing. Aleksandr Kochnev

VŠB-TUO, Fakulta bezpečnostního inženýrství
Lumírova 13, 700 30 Ostrava - Výškovice
pavel.suska@vsb.cz, aleksandr.kochnev@vsb.cz

Abstrakt

Cílem článku je seznámit osoby zabývající se BOZP s kybernetickými riziky, která vyplývají při používání robotických pracovišť vybavených umělou inteligencí. Práce v první části poukazuje na zvyšující se množství kybernetických útoků a možná a reálná kybernetická rizika, jež mají za následek pracovní úrazy. Druhá část se zabývá možnými cestami vniku útočníka do systému organizace. Třetí část popisuje základní bezpečnostní opatření, která vedou ke snížení kybernetických rizik.

Klíčová slova

Kybernetická rizika, robotika, umělá inteligence, SCADA, ICS.

Abstract

The aim of this article is to acquaint people dealing OSH with cybernetic risks that arise in use of robotic workplace equipped with artificial intelligence. In the first part of article showing of an increasing number of cybernetic attack and a possible and real cybernetic risk that result in accidents at work. The second part of article include a possible way of the attacker's intrusion into the organization's system. The third part of article describes the basic security measures that lead to the reduction of cybernetic risks.

Keywords

Cybernetics, robotics, artificial intelligence, SCADA, ICS.

Úvod

Mezi průmyslově nejvyspělejší země v EU patří Česká republika s téměř 40 % podílem přidané hodnoty v ekonomice. Z toho více než pětina produkce připadá na automobilové odvětví. Vláda České republiky se zavázala, že se během dvanácti let

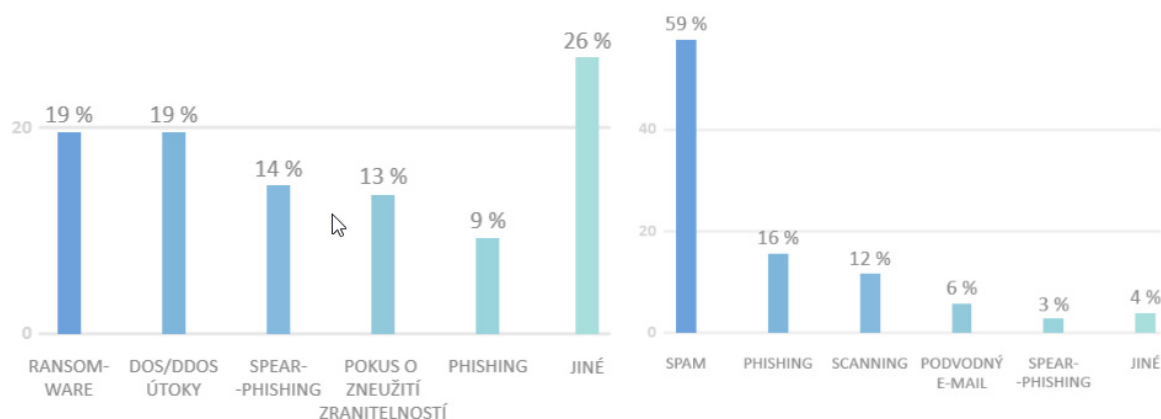
zařadí mezi inovační lídry Evropy a stane se zemí technologické budoucnosti. Jeden z inovačních kroků je národní strategie pro umělou inteligenci (dále jen AI) [1].

Stejně jako každá technologie má i umělá inteligence ambivalentní charakter. Na jednu stranu AI může přinést významné možnosti rozvoje pracoviště a růstu produktivity. Na druhou stranu může AI přinést mnoho nových výzev v bezpečnosti a ochrany zdraví při práci zejména v oblasti kybernetických, psychosociálních a mechanických rizik [1], [2]. Je nutné zejména zdůraznit kybernetická rizika, která vyplývají z užívání umělé inteligence skupinami zločinců, teroristů, a ztráty, jež může zločinné užívání způsobit v průmyslu.

Útoky mohou být zaměřené převážně na průmyslové podniky obsahující velké množství nebezpečných chemických látek s cílem vyvolat závažnou havárii, která ohrozí obyvatelstvo, životní prostředí a majetek. Takové havárie mohou způsobit smrt tisíců lidí, otrávit nespočet vodních živočichů a kontaminovat půdu. Zneužitá AI může usnadnit teroristům přístup k průmyslovým prostředím s nebezpečnými látkami. Mezi možné scénáře patří i zneužití robotického pracoviště vybaveného AI, které může teroristům usnadnit přístup k nebezpečným látkám nebo vyvolat vznik závažné havárie. Další možné zneužití umělé inteligence spočívá v ovládnutí autonomních dopravních prostředků, které převážejí nebezpečné látky nebo výbušniny, a jejich úmyslná havárie. Taková havárie může mít velmi tragické následky.

Současná situace v oblasti kybernetických rizik

Závažnost kybernetických rizik neustále stoupá, tento fakt také podporuje zjištění z kontrolní akce NKÚ (Nejvyššího kontrolního úřadu). Z kontrolní akce vyplývá, že od roku 2017 do poloviny roku 2020 došlo k 916 kybernetickým incidentům, které byly hlášeny vládnímu CERT (*Computer Emergency Response Team*). Z toho 31 % kybernetických incidentů připadlo na první polovinu roku 2020 [3]. V roce 2020 byl nejčastějším typem útoku v České republice spam, phishing a skenování vnějších sítí. Naopak nejméně častým typem útoku byl sniffing (skenování vnitřní sítě), jak je uvedeno na obrázku obr. 1 vpravo. Nejzávažnějším typem útoku v roce 2020 byl ransomware, DoS/DDoS (*Denial of Service*), jak je uvedeno na obr. 1 [4].



Obr. 1 Nejčastější a nejzávažnější typy útoků [4]

Kybernetická rizika v praxi

S rostoucím počtem kyberútoků roste i množství zneužitých robotických pracovišť, která jsou vybavena umělou inteligencí. Takové zneužití může mít za následek pracovní úrazy zaměstnanců v areálu průmyslových podniků. V následujících odstavcích jsou popsány reálné úrazy, které vznikly v důsledku kyberútoků.

V květnu roku 2015 zemřel v americké automobilce nacházející se v Cincinnati zaměstnanec na následky rozdrčení lebky. Toto úmrtí bylo způsobeno neočekávaným restartováním robotického systému. Vyšetřování ukázalo, že robotická platforma byla infikována malwarem, který přepsal a poškodil příkazy robotické platformy [5].

V prosinci roku 2017 bylo v americkém obchodním centru v Silicon Valley přejeto batole autonomním robotickým mycím strojem. Z vyšetřování vyplynulo, že bezpečnostní příkazy byly přepsány hacknutím, jež provedla nezletilá osoba za použití skriptu staženého z internetu [5].

Průmyslový systém ICS/SCADA

Mezi nejčastěji cíle kybernetických útoků mezi roky 2019 a 2020 patří digitální služby (e-mail, sociální platformy), průmysl, zdravotnictví a státní správa. Frekventované typy útoku na průmysl jsou útoky na průmyslové řídicí systémy a systémy pro řízení, dohled a sběr dat [6].

Průmyslové řídicí systémy (ICT) a systém pro řízení, dohled a sběr dat (SCADA) jsou počítačové systémy, které se zaměřují na dohled, monitorování a sběr dat v reálném čase [7].

SCADA a ICT systémy lze využít v sektorech, kde je nutné monitorovat a kontrolovat systém nebo strojní zařízení. Dále se systém SCADA běžně používá k automatizaci složitých průmyslových procesů. SCADA systémy lze použít např. ve výrobě, kde jsou systémy SCADA použity pro regulaci výrobních linek, monitorování kvality a robotických zařízení, jako je například robotická paletizace. V případě robotické paletizace řídí SCADA systém programy robotů z databáze, která obsahuje velké množství programů pro plnění palet v závislosti na tvaru, velikosti a množství zboží [8].

Bezpečnostní riziko

Systém SCADA bývá fyzicky oddělen od informačních a komunikačních sítí podniku a používá izolované lokální síť, virtuální lokální síť nebo jinou formu síťové infrastruktury. Ve většině případů potřebuje SCADA systém přístup k ostatním sítím (internet), ať už pro účely podpory třetích stran (výrobce, dodavatel), nebo za účelem poskytnutí nashromážděných dat.

Právě připojení k internetu a ostatním sítím může skýtat bezpečnostní rizika, jež lze rozdělit na dvě kategorie:

- cílené útoky APT (Advanced Persistent Threat) - pokročilá persistentní hrozba,
- interní útoky [9], [10].

Cílené útoky APT jsou pečlivě vytvořené útoky proti konkrétnímu cíli. Používají různé způsoby, jak proniknout ke svému cíli. Mezi tyto metody patří například shromažďování informací a chování lidí na internetu. Tyto informace slouží k vytvoření škodlivých stránek, které nalákají cílové osoby k jejich návštěvě a stáhnutí škodlivého kódu (malware) [11].

Interní útoky jsou dalším způsobem proniknutí škodlivého kódu do vnitřní sítě podniku. Při tomto útoku dochází k vnesení infikovaného média (přenosné HDD, mobil) a jeho připojení do místní sítě. Tento útok může být proveden neúmyslně, nebo úmyslně [12].

Doporučení ke snížení bezpečnostních rizik

SCADA a ICT byly tradičně uzavřené systémy navržené pro funkčnost, bezpečnost a spolehlivost a jejich fyzické oddělení od informačních a komunikačních sítí. Zvýšená konektivita prostřednictvím standardních IT technologií je vystavila novým hrozbám, na něž nejsou dostatečně vybavena (například červi, viry, DDoS) [9], [10].

V následujících odstavcích jsou sepsána základní bezpečnostní opatření, která přispívají ke snížení kybernetických rizik.

Firewall

- Chraňte připojení mezi systémy řízení procesů a další systémy pomocí brány firewall.

Vzdálený přístup

- Udržujte seznam všech vzdálených připojení.
- Zaveďte vhodné mechanismy autentizace, jako je silné ověřování (dvoufázové ověřování), pro všechna připojení ke vzdálenému přístupu.
- Vhodně zabezpečte všechny počítače se vzdáleným přístupem (antivirus, firewall).
- Proveďte bezpečnostní kontroly všech třetích stran, které mají vzdálený přístup k řídicím systémům.

Antivirus

- Chraňte systémy řízení procesů antivirovým softwarem na všech serverech a pracovištích.
- Před instalací antivirových softwarů získejte od dodavatelů systémů řídicích procesů instrukce o konfiguraci, kompatibilitě [13].

Závěr

Pokrok v oblasti digitalizace, robotizace a implementace umělé inteligence nelze zastavit a některé výše zmíněné roboty a prvky umělé inteligence jsou již součástí naší reality. S rostoucí digitalizací a automatizací v průmyslu poroste i množství kybernetických útoků. Bohužel nejde na sto procent zajistit kybernetickou bezpečnost, ani odstranit všechna rizika plynoucí ze zavedení robotů s umělou inteligencí. Tyto útoky mohou mít za následek odcizení dat, špionáž, vznik závažné havárie nebo pracovní úrazy. Avšak díky včasnému provedení kvalifikovaného hodnocení rizik na základě možných scénářů, za pomoci modernizované metodiky hodnocení rizik lze zajistit přípravu a rizika zmírnit na přijatelnou úroveň. Je nutné podotknout, že roboty a umělá inteligence při zodpovědném použití nejsou jen hrozbou, ale zároveň nástrojem pro zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců na budoucích modernizovaných pracovištích.

Použitá literatura

- [1] ATLE, R.; BJØRNARV, S.; STOLEN, K.: *Cyber-Risk Management*. Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-23570-7.
- [2] RSA WHITE PAPER/CYBER RISK APPETITE: Defining and Understanding Risk in the Modern Enterprise. *Rsa* [online]. 2016 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.rsa.com/content/dam/en/white-paper/cyber-risk-appetite.pdf>.
- [3] Kontrolní závěr z kontrolní akce 19/26: Budování kybernetické bezpečnosti České republiky. *Nejvyšší kontrolní úřad* [online]. Česká republika, 2019 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.nku.cz/assets/kon-zavery/k19026.pdf>.
- [4] ŘEHKA, K.: *Zpráva o stavu Národní úřad pro kybernetickou a informační bezpečnost ZPRÁVA O STAVU KYBERNETICKÉ BEZPEČNOSTI ČESKÉ REPUBLIKY ZA ROK 2020*. 1. Praha: NÚKIB, 2020.

- [5] BHARDWAJ, A.; AVASTHI, V.; GOUNDAR, S.: Cyber security attacks on robotic platforms. *Network Security* [online]. 2019, 2019(10), 13-19 [cit. 2021-05-05]. ISSN 13534858. Dostupné z: doi:10.1016/S1353-4858(19)30122-9.
- [6] Main incidents in the EU and worldwide: ENISA Threat Landscape. *ENISA* [online]. Attiki, Greece, 2020, 7-10 [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: doi:10.2824/552242.
- [7] Co je to SCADA?. *Promotic.eu* [online]. Tavičská 845/21 703 00 Ostrava-Vítkovice, 2012 [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: <https://www.promotic.eu/cz/pmdoc/WhatIsPromotic/WhatIsScada.htm>.
- [8] Case study: SCADA system puts robots on a roll. *Processengineering* [online]. 2012 [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: <https://processengineering.co.uk/article/2023061/case-study-scada-system-puts-robots-on-a-rollv>.
- [9] Bezpečnost průmyslových sítí a systémů SCADA/ICS. *Systemonline* [online]. 2001 [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: <https://www.systemonline.cz/rizeni-vyroby/bezpecnost-prumyslovych-siti-a-systemu-scada-ics.htm?mobilelayout=false>.
- [10] Kyberútoky na kritickou infrastrukturu. *Systemonline* [online]. [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: <https://www.systemonline.cz/energetika-a-utility/kyberutoky-na-kritickou-infrastrukturu-1.htm>.
- [11] ZHOUV, X.; XU, Z.; WANG, L.; CHEN, K.; CHEN, C.; ZHANG, W.: APT Attack Analysis in SCADA Systems. *MATEC Web of Conferences* [online]. SIMMA, 2018, 173 [cit. 2021-09-24]. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1051/matecconf/2018173>.
- [12] MANCUSO, F.; STRANG, V.A.J.; FUNKE, G.J.; FINOMORE, V.S.: Human Factors of Cyber Attacks: A Framework for Human-Centered Research. *Sage journal* [online]. SAGE Publications [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1177/1541931214581091>.
- [13] Good Practice Guide Process Control and SCADA Security. <https://nisc.info/> [online]. nisc [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: https://www.controlglobal.com/assets/Media/MediaManager/wp_06_nisc_scada.pdf.

Psychosociální rizika na robotizovaných pracovištích s použitím umělé inteligence

Psychosocial Risks in Robotic Workplaces Using Artificial Intelligence

Ing. Pavel Šuška

Ing. Aleksandr Kochnev

VŠB-TUO, Fakulta bezpečnostního inženýrství
Lumírova 13, 700 30 Ostrava - Výškovic
pavel.suska@vsb.cz, aleksandr.kochnev@vsb.cz

Abstrakt

Cílem této práce je seznámit osoby zabývající se BOZP s psychosociálními riziky, jež mohou vzniknout při implementaci nových technologií, jako jsou roboty a umělá inteligence. Článek poukazuje na současný stav psychosociálních rizik a možné způsoby jejich vzniku vlivem špatné implementace nových technologií.

Klíčová slova

Psychosociální rizika, robotika, umělá inteligence, difuze odpovědnosti, ztráta zaměstnání.

Abstract

The aim of this article is to acquaint people dealing with occupational health and safety with psychosocial risks. Psychosocial risks may arise during implementing new technologies such as robots and artificial intelligence. The article points out the current state of psychosocial risk and possible ways of their occurrence due to poor implementation of new technologies.

Keywords

Psychosocial risks, robotics, artificial intelligence, Diffusion of responsibility, job loss.

Úvod

Psychosociálním rizikem se rozumí faktory, které mají vliv na kvalitu podmínek v zaměstnání, např. časový tlak, nedostatek komunikace, přesčas [1].

Významný specialista v oblasti BOZP Tomáš Neugebauer uvádí, že jsou psychosociální rizika spojena s negativními psychologickými, fyzickými a sociálními faktory, jež vznikají jako důsledek špatné organizace práce. Nedostatečná pozornost věnovaná těmto faktorům vede zaměstnance ke vzniku stresu, syndromu vyhoření, depresi a v některých případech i k daleko závažnější újmě na zdraví, jako je porucha pohybového ústrojí [1], [2]. Chtěl bych uvést, že s psychosociální zátěží se potýká mnoho lidí v hromadném průmyslu a s jejími prvními nepříznivými náznaky jsem měl možnost se setkat sám ve svém životě.

Podle Tomáše Neugebauera můžeme do psychosociálních rizik zařadit následující situace:

- Náročné pracovní podmínky;
- Nedostatek času na splnění úkolů;
- Nesrozumitelné požadavky na role zaměstnance;
- Nedostatek zapojení do rozhodovacích procesů, které ovlivňují roli zaměstnance;
- Psychologické nebo sexuální obtěžování;
- Neúčinná komunikace;
- Špatně řízená organizační změna a nejistota zaměstnání;
- Nevyváženost mezi pracovními závazky a osobním životem [2].

Současná situace psychosociálních rizik

Závažnost psychosociálních rizik neustále stoupá a tato tendence je podložena daty z Evropské agentury pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci (EU-OSHA) [3], která provedla průzkum mezi evropskými podniky na téma vznikajících rizik na pracovišti (ESNER, ESNER 2, ESNER 3) [4], [5], [6]. Průzkumu se zúčastnilo přes 45 tisíc podniků napříč všemi sektory, zaměstnávajících nejméně pět lidí. Z průzkumu vyplývá, že více než polovina všech zaměstnanců považuje stres za obvyklý. Nejčastěji udávanými příčinami stresu při práci byly pracovní nejistota a reorganizace práce. Průzkum dále ukázal, že mnoho podniků zvládá psychosociální rizika obtížněji než jakákoli jiná rizika v BOZP. Průzkum (ESNER-3) [6] ukazuje, že největší problém při řízení psychosociálních rizik představuje neochota otevřeně mluvit o psychosociálních rizicích (61 % podniků). Další problémy spočívají v nedostatečné informovanosti zaměstnanců a vedení a v nedostatku odborných znalostí nebo odborné podpory.

Psychosociální rizika souvisejí i s implementací nových technologií, jako jsou roboti a umělá inteligence. Tyto technologie bývají rychlejší, přesnější a výkonnější než zaměstnanci a jejich vliv na zaměstnance může způsobit vznik psychosociálních rizik na pracovišti.

Dr. Moore ve své publikaci „The Threat of Physical and Psychosocial Violence and Harassment in Digitalized Work“ [7] uvádí, že nejčastějšími psychosociálními riziky na digitálním pracovišti jsou především stres, diskriminace, muskuloskeletální poruchy, možnost zintenzivnění práce a ztráty pracovních míst, včetně fyzického násilí a nadměrného monitorování. Závažnost těchto rizik závisí spíše na způsobu implementace technologií než na nich samotných [1], [8], [9].

Například v důsledku špatné implementace, nedostatku informací nebo nedostatečné kvalifikace zaměstnanců může robotické pracoviště nebo umělá inteligence místo zefektivnění procesy značně zpomalit. U zaměstnanců může dojít ke vzniku stresu, obav ze ztráty zaměstnání, vzniku vynuceného pracovního tempa kvůli přizpůsobení se kolaborativním robotům. Taková psychosociální rizika mohou časem vyústit v pracovní úrazy.

Na druhou stranu správná implementace nových technologií může mít opačný efekt. Robotická pracoviště a umělá inteligence mohou nahrazovat různé druhy monotónních a rutinních pracovních úkonů, což vede ke snížení psychosociální zátěže zaměstnanců [10].

Příklady psychosociálních rizik

Nadměrné monitorování

Monitorování na pracovišti není novým pojmem, avšak v době digitalizace je každý „bit“ informace o pracovišti cenný. Právě umělá inteligence a její nástroje umožňují zvýšené monitorování a sledování, a může tedy dojít k mikromanagementu, který je největší příčinou úzkosti a stresu [11], [12]. Například na robotizovaném pracovišti vybaveném kolaborativními roboty může dojít k zaznamenávání velkého množství údajů o pracovníkovi a jeho pracovním výkonu (např. přestávkách zaměstnanců, nečinnosti zaměstnanců a strojních zařízení), i když primární úkol robotů spočívá v napomáhání pracovníkům při plnění úkolů [11], [13].

Transparentnost, informovanost

V roce 2017 vyhodnocoval počítačový program v americkém Hustonu výkonnost učitelů a porovnával výsledky jejich studentů s průměrnými americkými výsledky. Učitelé s vysokým hodnocením dostali bonusy, zatímco učitelé s nízkým hodnocením byli propuštěni. Někteří učitelé měli pocit, že je software špatně vyhodnotil, a proto přišli o práci. Bohužel učitelé neměli možnost zkontrolovat, zda software vyhodnocuje spravedlivě, či nikoli, protože společnost, která vlastnila software, považovala svůj algoritmus za obchodní tajemství a nezveřejnila jeho fungování [9], [14].

Z této případové studie vyplývá, že je nutné informovat zaměstnance o způsobu fungování AI. Pokud k tomu nedojde, rizika stresu a úzkosti z pohledu BOZP budou vzrůstat, pokud pracovníci cítí, že rozhodnutí jsou přijímána na základě dat a údajů, k nimž nemají žádný přístup [11].

Další problém plynoucí z transparentnosti je fakt, že většina společností považuje umělou inteligenci, software a data za obchodní tajemství. Tato obchodní tajemství společnosti považují za životně důležitá pro jejich konkurenceschopnost na trhu, a proto není v jejich zájmu umožnit přístup k datům a způsobu fungování AI [11].

Difuze odpovědnosti

Difuze zodpovědnosti chování spadající do oblasti prosociálního chování stojí v pozadí jevu s názvem efekt přihlížejícího.

K difuzi odpovědnosti dochází, pokud se jedinec cítí méně zodpovědný za jednání v určité situaci, protože svědky určité situace jsou i další lidé, kteří mohou být zodpovědní za jednání v dané situaci. V tomto okamžiku se z každého jedince stává přihlížející. Difuze odpovědnosti například snižuje v davu pravděpodobnost, že někdo přijde a pomůže jiné osobě v nouzové situaci [15].

Difuzi odpovědnosti nemusíme pozorovat jen při interakci mezi lidmi, ale i při interakci člověka s robotem. Důkazy ze studie [16] ukazují, že i za přítomnosti robota mají lidé tendenci k difuzi zodpovědnosti. Jeden z důvodů, proč dochází k difuzi odpovědnosti při interakci s robotem je lidská schopnost reagovat sociálně a aplikovat sociální normy na tyto technologie. Mnoho lidí, kteří interagují s robotem, vnímá tuto interakci spíše jako interakci s jiným člověkem nebo se zvířetem než jako interakci s robotickým zařízením [17], [18], [19]. Dalším důvodem, proč dochází k difuzi odpovědnosti, je, že při implementaci robotického zařízení lidé očekávají, že toto zařízení bude bezpečné. Tento předpoklad může vést k přehnané důvěře a ztrátě opatrnosti při práci, což může mít za následek vznik úrazu [20], [21].

Tyto skutečnosti mohou vést ke zvýšení pracovních úrazů zaměstnance nebo k vytvoření mimořádné události, která může ohrozit životy a zdraví mnoha zaměstnanců.

Ztráta zaměstnání

Nejistota zaměstnání byla definována jako subjektivně vnímaná a nežádoucí možnost ztráty současného zaměstnání v budoucnu, jakož i strach či obavy související s možností ztráty zaměstnání [22].

Lidé posuzují riziko ztráty zaměstnání na základě mnoha faktorů, jako jsou dojmy z médií nebo od kolegů, zejména pokud mají málo znalostí o nových technologiích, jako jsou AI nebo roboty. Studie [21] poukazuje, že hlavním problémem je nedostatek informací a znalostí, což vede k pocitům nejistoty a strachu ze ztráty zaměstnání.

Studie [23] podotýká, že při nepřiměřeném využití umělé inteligence a robotizace na pracovištích může dojít k ovlivnění a snížení rutinních, nízké a středně kvalifikovaných pracovních míst (dělníci, úředníci) v určitých průmyslových odvětvích [24].

Umělá inteligence a robotizace může znevýhodnit zejména ženy a starší pracovníky, kteří mohou mít problém s přijetím a ovládnutím nových technologií [23].

Mnohé studie [24], [25], [26] poukazují na to, že zaměstnanci, kteří jsou ohroženi ztrátou zaměstnání, vykazují vyšší úroveň vnímání stresu, úzkosti, depresí a negativních pocitů ve srovnání se zaměstnanci, kterým ztráta zaměstnání nehrozí.

Následkem stresu může být například chronický únavový syndrom, který může vzniknout u osob, které jsou dlouhodobě vystaveny stresu. Únavový syndrom se projevuje pocitem únavy a vyčerpáním při malé fyzické námaze, náchylností k onemocnění dolních a horních cest dýchacích, bolesti kloubů a svalů, poruchami spánku a soustředění. Následkem tohoto chronického syndromu je výrazné zhoršení výkonnosti [27].

Závěr

Integrace nových technologií do pracovního prostředí je poměrně nová problematika a s rostoucím množstvím technologií bude stoupat i počet psychosociálních rizik. Tato rizika mohou mít v budoucnu značný dopad na BOZP, a proto je nutné k psychosociálním rizikům přistupovat zodpovědně, provádět další výzkum v této oblasti a výsledky výzkumu delegovat příslušným orgánům a široké veřejnosti.

Největším rizikem, k němuž může ze strany umělé inteligence dojít, je ztráta schopnosti myslet sami za sebe. Již dnes můžeme vidět, jak lidé zapomínají základní dovednosti, které byly před několika lety vnímány jako samozřejmost. Pokud ztratíme schopnost myslet, žádná technologie nás v pracovním procesu neochrání před úrazy.

Použitá literatura

- [1] Psychosocial risks and workers health.: *Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci* [online]. 2019 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://oshwiki.eu/wiki/Psychosocial_risks_and_workers_health.
- [2] NEUGEBAUER, T.: *Bezpečnost a ochrana zdraví při práci v kostce, neboli, O čem je současná BOZP*. Praha: Wolters Kluwer Česká republika, 2010. *Bezpečnost práce v praxi* (Wolters Kluwer ČR). ISBN 978-80-7357-556-4.
- [3] European Survey of Enterprises on New and Emerging Risks: ESENER.: *Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://osha.europa.eu/en/facts-and-figures/esener>.
- [4] ESENER 2009.: *Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://osha.europa.eu/en/publications/european-survey-enterprises-new-and-emerging-risks-managing-safety-and-health-work/view>.
- [5] ESENER 2014.: *Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://osha.europa.eu/en/publications/summary-second-european-survey-enterprises-new-and-emerging-risks-esener-2/viewwv>.
- [6] ESNER 2019.: *Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://beta.ukdataservice.ac.uk/datacatalogue/studies/study?id=8690#/documentation>.
- [7] MOOR, P.: *The Threat of Physical and Psychosocial Violence and Harassment in Digitalized Work* [online]. Ženeva: International Labour Office, 2018 [cit. 2021-04-21]. ISBN 978-92-2-131655-8. Dostupné z: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---actrav/documents/publication/wcms_617062.pdf.

- [8] DE STEFANO, V.: "Negotiating the algorithm": Automation, artificial intelligence and labour protection [online]. Ženeva: INTERNATIONAL LABOUR OFFICE, 2018 [cit. 2021-04-21]. ISSN 1999-2939. Dostupné z: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---emp_policy/documents/publication/wcms_634157.pdf.
- [9] BIRD, E.; FOX-SKELLY, J.; JENNER, N.; LARBHEY, R.; WEITKAMP, E.; WINFIELD, A.: The ethics of artificial intelligence: Issues and initiatives. STOA | *Panel for the Future of Science and Technology* [online]. Brusel: STOA, 2020, , 18-34 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: doi:10.2861/6644.
- [10] MOOREOVÁ, P.: BOZP A BUDOUCNOST PRÁCE: PŘÍNOSY A RIZIKA NÁSTROJŮ UMĚLÉ INTELIGENCE NA PRACOVIŠTÍCH.: *Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci* [online]. 1-16 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://osha.europa.eu/cs/publications/osh-and-future-work-benefits-and-risks-artificial-intelligence-tools-workplaces/view>.
- [11] LANEV, M.; SAINT-MARTIN, A.: The impact of Artificial Intelligence on the labour market: What do we know so far?. *OECD Social, Employment and Migration Working Papers* [online]. Paříž: OECD Publishing, 2021, (256), 43-51 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: doi:<https://dx.doi.org/10.1787/7c895724-en>.
- [12] VAN DEN BROEK, E.: Monitoring technology in the workplace. *Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci* [online]. Ženeva [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://osha.europa.eu/en/publications/monitoring-technology-workplace/view>.
- [13] Relieving operators' workload: Towards affective robotics in industrial scenarios. *ScienceDirect* [online]. Elsevier, 2018, (54) [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.07.012>.
- [14] Computer says no: why making AIs fair, accountable and transparent is crucial. *The Guardian* [online]. 2017 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/science/2017/nov/05/computer-says-no-why-making-ais-fair-accountable-and-transparent-is-crucial>.
- [15] Diffusion of Responsibility: Definition and Examples. *One Mind Therapy* [online]. mindfulmktg [cit. 2021-09-30]. Dostupné z: <https://onemindtherapy.com/social-psychology/diffusion-of-responsibility/>.
- [16] Reduced Sense of Agency in Human-Robot interaction. *Europe PMC* [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: doi:10.31234/osf.io/8bka3.
- [17] NASS, C.; MOON, Y.: Machines and mindlessness: Social responses to computers. *APA psychnet* [online]. , 81-103 [cit. 2021-06-15]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/0022-4537.00153>.
- [18] *The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Places* [online]. 8.1.1996. [cit. 2021-06-15]. ISBN 978-1575860534.
- [19] SUNG, J.Y.; GUO, L.; GRINTER, R.E.; CHRISTENSEN, H.I.: "My Roomba Is Rambo": Intimate Home Appliances. *UbiComp 2007: Ubiquitous Computing* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, 145-162 [cit. 2021-06-15]. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-540-74852-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-74853-3_9.
- [20] Would You Trust a (Faulty) Robot?: Effects of Error, Task Type and Personality on Human-Robot Cooperation and Trust. *ACM digital library* [online]. 141-148 [cit. 2021-06-15]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1145/2696454.2696497>.
- [21] Friend or Foe? Understanding Assembly Workers' Acceptance of Human-robot Collaboration. *ACM digital library* [online]. 10(1), 62020 [cit. 2021-06-15]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1145/3399433>.
- [22] Improving working conditions using Artificial Intelligence. *European Parliament* [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/662911/IPOL_STU\(2021\)662911_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/662911/IPOL_STU(2021)662911_EN.pdf).
- [23] Více intelektu a méně svalů: požadavky na budoucí pracovní sílu. *Pro vzdělání* [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: <http://provzdelavani.nuv.cz/clanky/ze-zahranici/vice-intelektu-a-mene-svalu-pozadavky-na-budouci>.
- [24] Consequences of Job Insecurity on the Psychological and Physical Health of Greek Civil Servants. *Hindawi* [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: doi:10.1097/JOM.0b013e3182677dad.
- [25] BURGARD, S.A.; KALOUSOVA, L.; SEEFELDT, K.S.: *Perceived Job Insecurity and Health* [online]. 2012, 54(9), 1101-1106 [cit. 2021-06-11]. ISSN 1076-2752. Dostupné z: doi:10.1097/JOM.0b013e3182677dad.
- [26] Effects of chronic job insecurity and change in job security on self reported health, minor psychiatric morbidity, physiological measures, and health related behaviours in British civil servants: the Whitehall II study. *BMJ journal* [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: doi:<https://jech.bmj.com/content/56/6/450.short>.
- [27] Psychologické faktory: Psychosociální rizika. *Znalostní systém prevence rizik v BOZP* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://zsbozp.vubp.cz/pracovni-prostredi/rizikove-factory/psychologicke-factory/233-psychosocialni-rizika>.
- [28] ŘEHKA, K.: *Zpráva o stavu Národní úřad pro kybernetickou a informační bezpečnost ZPRÁVA O STAVU KYBERNETICKÉ BEZPEČNOSTI ČESKÉ REPUBLIKY ZA ROK 2020*. Praha: NÚKIB, 2020.
- [29] Case study: SCADA system puts robots on a roll. *Processengineering* [online]. 2012 [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: <https://processengineering.co.uk/article/2023061/case-study-scada-system-puts-robots-on-a-rollv>.
- [30] F. MANCUSO, Vincent, Adam J. STRANG, Gregory J. FUNKE a Victor S. FINOMORE. Human Factors of Cyber Attacks: A Framework for Human-Centered Research. *Sage journal* [online]. SAGE Publications [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1177/1541931214581091>.

Expozice prachu na pracovišti během činnosti tkaninových filtrů a odsávacích systémů při výrobě polymerních materiálů

Exposure of Dust in the Workplace during the Operation of Fabric Filters and the Suction System in the Production of Polymeric Materials

Ing. Bc. Martin Vidlička

doc. Ing. Petr Štroch, Ph.D.

prof. Ing. Karol Balog, Ph.D.

VŠB-TUO, Fakulta bezpečnostního inženýrství

Lumírova 13, 700 30 Ostrava-Výškovice

martin.vidlicka.st@vsb.cz

Abstrakt

Článek se zabývá expozicí prachu na vybraném pracovišti mezinárodní společnosti vyrábějící plastový granulát pro další použití v automotive průmyslu, na kterém jsou umístěny tkaninové filtry a odsávací systém pro výrobu polymerních materiálů. Popisuje možná rizika expozice prachu na zdravotní rizika a zejména riziko výbuchu hořlavého prachu spolu s návrhem řešení.

Klíčová slova

Výbuch, polymery, expozice prachu, hořlavý prach.

Abstract

The article deals with dust exposure at a selected workplace of an international company producing plastic granulate for further use in the automotive industry. Fabric filters and a suction system for the production of polymeric materials are located at the workplace. It describes the possible risks of exposure to dust to health risks and especially the risk of flammable dust explosion, together with a proposal for a solution.

Keywords

Explosion, polymers, dust exposure, combustible dust.

Úvod

Príspevek se zabývá rizikovým pracovním prostorem v podniku zpracovávající polymerní materiály, kde je umístěna technologie se zařízením pro odsávání a akumulace prachu. Jedná se zejména o prach vznikající ze zpracování polyethylenu a polypropylenu, spolu s dalšími přídavnými materiály, které jsou rizikové jak ze zdravotního hlediska (vdechování prašných částic), tak i z hlediska možnosti požáru hořlavého prachu a následného výbuchu.

Ze zdravotního hlediska je podíl částic prachu, které jsou do lidského těla vdechovány, závislý na vlastnostech částic, rychlosti a směru pohybu vzduchu v blízkosti lidského těla. Další závislost je dechová frekvence a to, jestli se dýchá ústy nebo nosem. [1] Přípustné expoziční limity PEL_c [$mg \cdot m^{-3}$] jsou podle Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví další podmínky ochrany zdraví při práci u polyethylenových a polypropylenových prachů $5 mg \cdot m^{-3}$ a jsou definovány jako prachy s dráždivým účinkem. [4]

Polyethylenový a polypropylenový prach je hořlavý. Hořlavý prach má schopnost oxidační reakce doprovázené vývinem tepelné a světelné energie a může vznikat z hmoty obsahující více než 10 hmot. % látky schopné oxidace. Usazený prach může hořet plamenem, žhnout nebo doutnat. Nebezpečí požáru hořlavého

prachu hrozí v místech, kde se prach usazuje v souvislé vrstvě a za tu se považuje vrstva prachu 1 mm.

V rozvířeném stavu má hořlavý prach schopnost prudké oxidační reakce mající charakter výbuchu a za určitých podmínek tento děj může přejít v detonaci. Pokud dojde k výbuchu hořlavého prachu, tak je vysoká pravděpodobnost smrti nebo těžkého úrazu přítomných pracovníků, poškození technologického zařízení působením tlaku. Technologické procesy s přítomností hořlavého prachu mají vysokou pravděpodobnost rizika výbuchu, pokud se prach vyskytuje v rozvířeném stavu a je k dispozici oxidační prostředek, což je nejčastěji vzduch.

Pro vytvoření výbušné směsi hořlavého prachu se vzduchem, musí být k dispozici dostatečné množství prachových částic. Oblak rozvířeného prachu obvykle není homogenní, takže koncentrace může kolísat podle víření usazeného prachu. Prachy, na rozdíl od plynů a par, mohou rozvířením místní vrstvy nebo hromádky prachu vytvářet místní koncentrace. [5] Dále je potřebný iniciační zdroj. Možné iniciační zdroje na pracovištích odsávacích a akumulacích systémů jsou převážně jiskry z elektrických zařízení, plamen a horké produkty hoření, horké povrchy a elektrostatické výboje.

Zařízení pro odsávání a akumulace prachu, což jsou tkaninové filtry a jejich příslušenství, jsou umístěny v samostatném odděleném prostoru výrobní technologie. Problém je, že i v tomto prostoru, odděleném od výrobní technologie se pohybuje relativně velké množství pracovníků, zejména během pravidelné údržby, takže rizika týkající se zdravotních hledisek nebo rizik týkající se požáru a následného výbuchu jsou značná. Používaná technologie není ničím výjimečná, stejná technologie je používána i v dalších provozech a v dalších zemích, zejména v Asii.

Technologie výroby a její rizika

Expozice výbušného prachu na vybraném pracovišti odsávacích a akumulacích systémů se týká níže uvedených technologických zařízení:

- prachový tkaninový filtr pro akumulaci prachu z výroby polymerů;
- prachový filtr typu HEPA;
- prachový tkaninový filtr pro průmyslový vysavač.

Výbuchové charakteristiky prachu na daném pracovišti jsou:

- maximální výbuchový tlak p_{max} 1,4 bar;
- maximální rychlost nárůstu tlaku $(dp/dt)_{max}$ 112 bar.s⁻¹;
- konstanta výbušnosti K_{max} 30 m.bar.s⁻¹;
- minimální teplota rozvířeného prachu 560 °C.

Podle kubické konstanty K_{St} je prach vyskytující se v technologii zařazen do třídy St1.

Popis technologie

Na pracovišti je pro akumulaci prachových částic používán prachový tkaninový filtr (obr. 1). Jedná se o hadicový filtr s automatickým časově závislým proplachem stlačeným vzduchem (regeneraci). K regeneraci je využívána pulzní metoda. Filtry jsou zbavovány filtračních usazenin rozprašováním vysokotlakého vzduchu vedeného dovnitř hadicových filtrů 5 až 7krát za sekundu. Odloučený prach je shromažďován v dolní části filtrační jednotky, odkud je přes šnekový rotační podavač odváděn do velkoobjemového vaku (FIBC) umístěného pod filtrem.



Obr. 1 Tkaninový filtr s HEPA filtrem [autor]

Dalším technologickým zařízením umístěným na vybraném pracovišti je prachový filtr HEPA. HEPA je zkratkou „high efficiency particulate air filter“ (vysoce účinný filtr vzduchových částic). Je tvořen nepřetržitým pásem filtračního média, který je „varhanovitě“ uložen mezi plechy hliníkového separátoru. Tento typ filtru je schopen zachycovat částice prachu pod 0,1 μm s účinností až 99,97%. V produkci je HEPA filtr zařazen jako druhý odlučovací stupeň v systému odsávání prachu z manipulace se surovinami za tkaninový filtr pro akumulaci prachu z výroby. Vyčištěný vzduch má být odváděn do hlavních výrobních prostor produkční haly pro zlepšení hygieny pracovního prostředí (cirkulace vzduchu a vyrovnání atmosférického tlaku mezi vnějšími a venkovními prostory), ale v současnosti je zařízení využíváno pouze občas v zimních měsících.

Prachový tkaninový filtr pro průmyslový vysavač je založen na stejném principu jako tkaninový filtr pro akumulaci prachu z výroby. Odloučený prach je shromažďován v dolní části filtrační jednotky odkud je přes uzavírací klapku odváděn velkoobjemového vaku (FIBC), umístěného pod filtrem. Vyčištěná vzdušina je vypouštěna do haly technického zázemí. Pohon je zajištěn elektrickým dmýchadlem.

Riziko expozice prachových částic

Objemový prostor pracoviště, kde je výše uvedená technologie umístěna je 7 125 m^3 (15×38×12,5 m) a je odděleno od výrobních prostor. Činnost pracoviště je 24 hodin denně a během této doby je v tkaninových filtrech akumulováno cca 60 kg prachu z výroby a cca 50 kg prachu z průmyslového vysavače. Vzhledem k tomu, že technologie s přibývajícím časem používání není úplně prachotěsná, tak během její činnosti dochází k expozici prachu přímo z ní, a to zejména z připojeného potrubí nebo z horních prostor, kde jsou umístěny hadicové filtry. Během pravidelné výměny a manipulace s akumulovaným prachem nebo hadicových filtrů se expozice prachu rovněž zvyšuje. Pracoviště není vybaveno samostatným odsávacím systémem a ani ventilací. Obr. 2 ukazuje usazování prachu a na levém obrázku lze vidět usazování prachu na stěnách pracoviště.



Obr. 2 Usazování prachu v prostoru pracoviště [autor]

Vytvoření škodlivé a zejména výbušné koncentrace prachu na pracovišti závisí na rozvířitelnosti prachové směsi spolu se vzduchem. V případě expozičních limitů pro celkovou koncentraci prachu jsou tyto limity někdy překračovány v násobcích (41,38 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ dne 16.12.2020).

Pro vznik požáru a následně výbuchu hořlavého prachu je dostatečná vrstva usazeného prachu menší než 1 mm, takže riziko požáru a následného výbuchu je relativně značné. Ve výše uvedené technologii se prach rozvíříje:

- výfukovým potrubím dmýchadla centrálního vysavače, který je umístěn zhruba ve třetině pracoviště ve vertikálním směru (obr. 3);
- ventilátorem z chlazení motoru dmýchadla v horizontálním směru;
- nasátím vzduchu z venkovních prostor během vstupu do prostoru pracoviště z důvodu mírného podtlaku.



Obr. 3 Průmyslový vysavač a jeho potrubní systém [autor]

Výška výfukového potrubí je zhruba dva metry nad podlahou a ventilátor pro chlazení motoru asi 1 metr. Proud vzduchu může rozvířovat prachové částice jak horizontálně, tak i vertikálně, takže v případě vysoké koncentrace prachu v prostoru pracoviště je riziko vytvoření rizikové expozice pro:

- překročení přípustného expozičního limitu pro celkovou koncentraci prachu;
- vytvoření výbušné atmosféry v prostoru pracoviště.

Riziko rozvíření prachu je v případě výfukového potrubí vysavače podstatně vyšší než v případě nasátí vzduchu z venkovních prostor, poněvadž vysavač je v provozu po celou dobu výroby. Nasávání vzduchu z venkovních prostor nenastává během zimního období, kdy nejsou otevřena vjezdová vrata.

Jak již bylo řečeno v úvodu, požár s následným výbuchem je možný pouze tehdy, je-li k dispozici iniciační zdroj. Možné iniciační zdroje, které mohou iniciovat oblak hořlavého prachu v používané technologii jsou:

- plamen a horké produkty hoření;
- horké povrchy;
- elektrotechnická zařízení;
- statická elektřina.

Plamen a horké produkty hoření

Plameny a horké produkty hoření (tzv. svařovací perly) vznikající během svařečských a řezačských prací jsou významným iniciátorem pro vznik výbuchu prachovzdušné směsi. Plameny vznikající během řezání plamenem jsou zvláště nebezpečné, poněvadž podporují přenos velkého množství kyslíku do pracovního prostoru. Pokud je hořlavý prach rozptýlen v atmosféře obsahující více kyslíku, než obsahuje vzduch riziko iniciace hořlavého prachu spolu s následným výbuchem je podstatně vyšší. [6]

Plamen a horké produkty hoření mohou být iniciačním zdrojem zejména během údržby zařízení a oprav, což většinou jsou svařečské a řezačské práce a práce s úhlovými bruskami, které při opracovávání materiálu vytvářejí mechanické jiskry (obr. 4). Při provádění údržby nebo oprav zařízení, pracoviště není obvykle dostatečně vyčištěno od nahromaděných vrstev prachu a často jsou tyto práce také prováděny během provozu zařízení, kdy se možnost rizika výbuchu zvyšuje.



Obr. 4 Svařečské a řezačské práce prováděné na pracovišti [autor]

Horké povrchy

Horké povrchy mohou být vytvořeny tepelnou energií, tepelným projevem mechanické energie nebo jiné energie. Přípustná teplota je posuzována porovnáním s teplotou vznícení nebo samozahříváním přítomného hořlavého souboru. Iniciační schopnost horkého povrchu závisí na druhu a koncentraci výbušné směsi. V případě, že je čas styku výbušné směsi s horkým povrchem delší může dojít k tzv. studenému plamenu, což je reakce, při níž jsou vytvářeny rozkladné produkty vznětlivé při nižší teplotě než původní směs. Vznícení původní směsi je tím snadnější. Teplota vznícení výbušné směsi je také ovlivňována velikostí a tvarem horkého tělesa nebo například místní koncentrace v blízkosti horkého povrchu. [5] Na vybraném pracovišti mohou horké povrchy vznikat zejména na krytech motorů v případě jejich přetížení.

Elektrotechnická zařízení

Od začátku 20 století je známo, že elektrické jiskry a oblouky jsou schopny iniciovat hořlavý prach, takže může dojít k výbuchu prachovzdušné směsi. Minimální energie elektrické jiskry požadovaná pro iniciaci prachovzdušné směsi závisí

na specifickém měrném povrchu prachových částic, koncentraci, turbulenci, a časovém a prostorovém rozdělení elektrického výboje nebo oblouku. Dlouhou dobu se také předpokládalo, že energie elektrické jiskry potřebná pro zapálení prachovzdušné směsi musí být minimálně o jeden až dva řády vyšší, než minimální iniciační energie pro hořlavé plyny nebo výpary ve směsi se vzduchem. Nicméně je v současnosti přijato, že směs hořlavého prachu se vzduchem může být iniciována elektrickou jiskrou v rozsahu 1÷10 mJ, což je blízká hodnota pro iniciaci směsi hořlavých plynů nebo výparů. Některé hořlavé prachy mohou být iniciovány i nižší energií. [6]

Elektrotechnická zařízení jsou tvořena jednotlivými nebo vzájemně spojené provozní prostředky vyrábějící nebo spotřebovávající elektrickou energii. Při provozu elektrických zařízení mohou vznikat už při malém napětí elektrické jiskry nebo oblouky. Použitá elektrická zařízení technologie (motory) mají stupeň krytí IP54. V prostoru technologie jsou také instalovány zásuvky o napětí 400 V a 230 V, které mají stupeň krytí IP44 (obr. 5) a na kterých lze vidět stupeň zaprášení pracovního prostoru.



Obr. 5 Zásuvky umístěné vedle tkaninového filtru [autor]

Statická elektřina

Elektrostatický náboj je obecně generován na materiálu, předmětu nebo výrobku mnoha způsoby; pro dané pracoviště se jedná zejména o:

- kontakt a tření;
- přenos náboje.

Kontaktní nabíjení se může vyskytovat na rozhraní pevná látka-pevná látka. Čistý vzduch nemůže tímto způsobem nabíjet jiné materiály. Pokud ale však vzduch obsahuje pevné částice, mohou tyto částice být nabity kontaktem, a díky jim může vzduch přenášet elektrostatický náboj. V případě, že pevné látky z různých materiálů (původně nenabité a na potenciálu země) spolu přijdou do kontaktu třením, náboj je přenesen z jednoho materiálu na druhý a po vzdálení obou materiálu od sebe zůstává kladný náboj na jednom povrchu a negativní náboj na druhém. Další tření zvyšuje efektivní kontaktní oblast. K velmi silnému nabíjení také dochází, pokud se o sebe otírají dva stejné materiály.

Během přenosu náboje vedením nabíty objekt přichází do kontaktu s jiným předmětem a celkový náboj je sdílen mezi nimi v rozsahu jejich dovolené vodivosti a kapacity. Jedná se o vhodný zdroj pro elektrostatické nabíjení a jako příklad může být uveden prach dopadající nebo usazující se na pevné předměty (viz obr. 2).

K elektrostatickému výboji dochází, pokud intenzita elektrického pole přesáhne průraznou hodnotu okolního vzduchu. Elektrostatické výboje se rozdělují do mnoha typů, které závisí na podrobnostech způsobu, jakým je výboj iniciován. Zde se jedná zejména o:

- jiskrové výboje;
- kuželové výboje;
- plazivé výboje.

V případě jiskrového výboje se jedná o elektrický výboj mezi dvěma vodiči o různých potenciálech. Výboj je velmi rychlý a je doprovázen slyšitelným praskáním. [2] Předměty, mezi kterými jiskra přechází jsou většinou vodiče, takže většina nahromaděné energie se přenesla v jiskře. Ve skutečných případech dojde obvykle k vybití většiny nahromaděné energie.

V případě, že vysoce nabitý nevodivý prach je plněn do síla nebo do zásobníku, dochází v hromadě nasypaného prachu ke vzniku oblastí s velmi vysokou prostorovou hustotou náboje. Na vrcholu hromady dochází ke vzniku silného elektrického pole a ke vzniku kuželových výbojů. Bylo zaznamenáno, že kuželový výboj je schopen zapálit atmosféru i s hořlavými prachy.

Plazivé výboje mohou vznikat z povrchu nevodivých stěn zásobníků nebo také z povlaků na zařízeních. Vysoká povrchová hustota náboje, která je nezbytná pro vznik plazivých výbojů, může vznikat na místech, na které částice dopadají. Většinou se jedná o pneumatickou dopravu prachu potrubím z nevodivých materiálů nebo kovovým potrubím s nevodivými vložkami. Plazivé výboje nevznikají v důsledku náboje na vrstvě prachu, ale musí to být vrstva materiálu s vysokou elektrickou pevností. [3]

Protivýbuchová ochrana pracoviště

Co se týče primární protivýbuchové ochrany, nebezpečí výbuchu prachu hrozí, pokud jsou splněny tyto základní předpoklady:

- je k dispozici prostor, kde je možnost vytváření nebezpečné koncentrace hořlavého prachu;
- v prostoru jsou přítomny částice hořlavého prachu;
- v prostoru je přítomen oxidační prostředek;
- množství hořlavé látky a oxidačního prostředku v prostoru je takové množství, že je v něm možnost tvorby nebezpečné koncentrace.

Pokud je jeden z těchto čtyř základních předpokladů vytváření nebezpečné koncentrace vyloučen, k samotnému výbuchu nemůže dojít. Vzhledem k tomu, že všechny výše uvedené předpoklady na daném pracovišti jsou splněny, riziko možnosti výbuchu prachu je poměrně značné.

Jako sekundární výbuchová ochrana se rozumí opatření, která mají zabránit iniciaci, popřípadě omezit, aby nebezpečná výbušná atmosféra byla iniciována. Základem sekundární protivýbuchové ochrany je klasifikace nebezpečných prostorů do zón. Tyto zóny vycházejí z četnosti a trvání nebezpečné výbušné atmosféry a jsou definovány pro plyny a zvláště pro prachy. Zóny pro hořlavé prachy se rozdělují:

- Zóna 20: Prostor, v němž je výbušná atmosféra vytvořena oblakem rozvířeného hořlavého prachu ve vzduchu, který je přítomen trvale, dlouhou dobu nebo často;
- Zóna 21: Prostor, kde je výbušná atmosféra vytvořena oblakem rozvířeného prachu ve vzduchu, který vzniká během běžného provozu příležitostně;
- Zóna 22: Prostor, ve kterém je vznik výbušné atmosféry vytvořené oblakem rozvířeného prachu ve vzduchu nepravděpodobný při běžném provozu a pokud je tato atmosféra vytvořena, trvá pouze krátkou dobu.

Prostor, v kterém výskyt nebezpečné atmosféry v rozsahu, že jsou nutná zvláštní bezpečnostní opatření, není možný se považuje za prostor bez nebezpečí výbuchu.

Vybrané pracoviště je klasifikováno podle protokolu určené vnějších vlivů do zóny 21 a týká se pouze vnitřních prostor tkaninových filtrů, potrubních a odsávacích systémů. Vzhledem

k tomu, že hořlavé prachové částice jsou ve výše uvedených prostorech po celou dobu provozu, je zvláštní, že vybrané pracoviště nemá klasifikaci zóny 20. Pracovní prostory v okolí tkaninových filtrů jsou klasifikovány jako prostor bez nebezpečí výbuchu, což se jeví přinejmenším jako podivné.

Konstrukční protivýbuchová ochrana sice nezabrání tomu, aby výbuch nastal, ale zajišťuje, že nedojde k ohrožení osob a ani k poškození zařízení. Zařízení je po krátké době opět schopno provozu. Konstrukční opatření omezující účinky výbuchu na únosnou míru jsou rozdělena na:

- konstrukce odolné výbuchu;
- odlehčení výbuchu;
- potlačení výbuchu;
- zabránění přenosu výbuchu a plamene. [5]

V případě vybraného pracoviště, žádný prvek konstrukční protivýbuchové ochrany není použit.

Diskuse

Pracoviště odsávacích a akumulacích systému pro výrobu polymerních materiálů je vystaveno rizikové expozici prachu ze zdravotního hlediska. Jedná se o vdechování prachu s dráždivými účinky na lidský organismus, který vzniká zejména během manipulace s prachem. Pro řešení tohoto rizika je zde možnost nařídit používání ochrany dýchacích cest pracovníkům, kteří na tomto pracovišti vykonávají pracovní činnost.

Dalším, a to podstatným rizikem je možnost požáru a následného výbuchu hořlavého prachu a naopak. Iniciace hořlavého prachu je možná od instalovaných elektrických zařízení, jenž nemají dostatečný stupeň krytí IP, takže je možnost tvorby elektrických jisker, které mohou zapálit vrstvu hořlavého prachu s následným výbuchem. Pokud elektrická zařízení budou vyměněna na stupeň krytí ideálně IP64, riziko sice bude sníženo, ale ne odstraněno, poněvadž je zde stále riziko vzniku elektrostatického výboje přenosem náboje v případě usazování prachových částic na zařízení nebo při jejich dopadu na zařízení. Také horké povrchy vznikající např. na krytech při přetížení motorů mohou prachovou směs iniciovat. Nelze rovněž opomenout riziko požáru a následného výbuchu při provádění svářečských a řezačských prací během mimořádných údržbách, které jsou prováděny za provozu.

Jako možné celkové řešení výše uvedených rizik je vybavení tohoto pracoviště samostatnou ventilací nebo odsávacím systémem, pro odvod prachu z vnitřních prostor pracoviště jako způsob zajištění primární protivýbuchovou ochranou. Odsávací systémy a ventilace u hořlavých prachů ale zajišťují dostatečnou ochranu pouze tehdy, pokud je prach odsáván z místa jeho vzniku a současně je zabráněno usazování prachu v okolí. Další možností může být použití metody ionizace, která je schopna neutralizovat elektrostatický náboj na izolantech a izolovaných objektech pomocí ionizovaných molekul plynu obklopujících vzduch. Musí být, ale navržena pro konkrétní aplikaci a vyhodnocena v reálném provozu. Pokud se jedná o sekundární protivýbuchovou ochranu, bylo by vhodné upravit klasifikaci a zařadit vybrané pracoviště do zóny 20.

Závěr

Polymerní produkty jsou vyráběny po celém světě a technologie popsané v tomto článku se používají také v dalších podnicích, zejména v Asii. Příspěvek sice popisuje technologie a činnost prováděné v jednom podniku, ale je zde pravděpodobnost, že i v dalších podnicích je stav podobný. Uvedená rizika jsou závislá zejména na lidském faktoru a dodržování bezpečnosti práce, což se týká nejen řadových pracovníků, ale zejména středního a nejvyššího managementu, kteří mají k dispozici finanční zdroje pro vyřešení výše uvedených a dalších rizik.

Použitá literatura

- [1] ČSN EN 481 Ovzduší na pracovišti - Vymezení velikostních frakcí pro měření polétavého prachu.
- [2] ČSN IEC/TR 61340-1 Elektrostatika - Část 1: Elektrostatické jevy - Principy a měření.
- [3] ČSN CLC/TR 60079-32-1 Výbušné atmosféry - Část 32-1: Návod na ochranu před účinky statické elektřiny.
- [4] Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví další podmínky ochrany zdraví při práci.
- [5] DAMEC, J.: *Protivýbuchová prevence*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s. 2005, 188 s. ISBN 80-86111-21-0.
- [6] DUST EXPLOSION: AN OVERVIEW.: *Dust Explosions - Origin, propagation, Prevention, and Mitigation: An Overview*. Dostupné Web of Science www: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7602-1.50002-0> | Elsevier Enhanced Reader.

Výroba polymerních materiálů - riziko iniciace hořlavého prachu elektrostatickým nábojem

Production of Polymeric Materials - the Risk of Initiation of Combustible Dust by Electrostatic Charge

Ing. Bc. Martin Vidlička
prof. Ing. Karol Balog, Ph.D.

VŠB-TUO, Fakulta bezpečnostního inženýrství
Lumírova 13, 700 30 Ostrava-Výškovice
martin.vidlicka.st@vsb.cz

Abstrakt

Článek pojednává o riziku výbuchu prachu při výrobě polymerních materiálů (směs polypropylenu a polyethylenu), kde iniciačním zdrojem je elektrostatický náboj. Podrobně se zabývá vysvětlením principu vzniku elektrostatických výbojů a možnostmi jejich vytváření se na vybraných pracovištích, spolu s návrhem opatření na eliminaci tohoto rizika.

Klíčová slova

Výbuch, elektrostatický náboj, hořlavý prach.

Abstract

This article deals with the risk of dust explosion in the production of polymeric materials (mixture of polypropylene and polyethylene), where an electrostatic charge is the source of initiation. It deals in detail with explaining the principle of electrostatic discharges and the possibilities of its creation at selected workplaces, together with the proposal of measures to eliminate the risk.

Keywords

Explosion, electrostatic charge, combustible polymer dust.

Úvod

Jedním z rizik, které mohou hrozit během výroby polymerních materiálů je i riziko požáru a následného výbuchu (nebo naopak), který je výsledkem iniciace hořlavého prachu elektrostatickým nábojem. Článek popisuje výše uvedené riziko na vybraném pracovišti mezinárodní společnosti vyrábějící směs polyethylenového a polypropylenového granulátu pro další použití v automotive průmyslu. Riziko může nastat v případě transportu vstupního materiálu z provozních sil do násypků v počáteční fázi výroby (část materiálu je sypána i ručně jeřábem z velkoobjemových vaků, viz obr. 2), kde je umístěn čistý vstupní materiál (obsah polypropylenu nebo polyethylenu je 100 %) nebo během přesypávání vyrobeného materiálu z produkční sila do velkoobjemových pytlů v konečné fázi výroby, kde obsah obou polymerů ve směsi se pohybuje v rozsahu 70 až 80 % (obr. 1).

Polyethylen i polypropylen patří do skupiny termoplastů. Termoplasty při vyšších teplotách přecházejí do formy viskózní kapaliny, kterou je možné tvarovat a jejich tvar je možno stabilizovat po jejím ochlazení. Výhodou je, že tento proces je opakovatelný, takže po dalším zahřátí je termoplast schopen opětovného plastického stavu a být opět tvarován. Směs polyethylenu a polypropylenu (spolu s dalšími přísadami, vesměs anorganického původu, pro pozměnění jejich vlastností, podle požadavku zákazníka) při prvním zahřátí je vyráběna ve formě granulát, které jsou poté u dalších výrobců využity pro finální tvar konečného výrobku pomocí vstřikovacích lisů (např. blatník u auta).

Většina polymerů je elektricky nevodivá, ale při jejich vzájemném tření vzniká elektrostatický náboj, při kterém je možnost proskakování jisker a tím může docházet ke vzniku požáru. Polymery s měrným povrchovým izolačním odporem $\rho_p > 10^4 \Omega$ jsou obvykle považovány za elektricky vodivé, pokud mají měrný povrchový izolační odpor $\rho_p > 10^4 \Omega$ až $\rho_p > 10^8 \Omega$ jsou považovány za antistatické, a nad $\rho_p > 10^8 \Omega$ jsou považovány za izolační. Hodnota měrného povrchového izolačního odporu pro polyethylen je $\rho_p = 10^{14} \Omega$ a pro polypropylen $\rho_p = 10^{13} \Omega$. Patří tedy mezi dobré elektrické izolanty. Pokud měrný povrchový izolační odpor má vysoké hodnoty, snadno se nabíjí elektrostatickou elektřinou, poněvadž se elektrostatický náboj nestáčí odvádět dostatečně rychle [1].



Obr. 1 Provozní a produkční sila

Polyethylenový a polypropylenový prach je hořlavý. Hořlavý prach má schopnost oxidační reakce doprovázené vývinem tepelné a světelné energie a může vznikat z hmoty obsahující více než 10 hmot. % látky schopné oxidace.

V rozvířeném stavu má hořlavý prach schopnost prudké oxidační reakce mající charakter výbuchu a za určitých podmínek tento děj může přejít v detonaci. Pokud dojde k výbuchu hořlavého prachu, tak je vysoká pravděpodobnost smrti nebo těžkého úrazu přítomných pracovníků, poškození technologického zařízení působením tlaku. Technologické procesy s přítomností hořlavého prachu mají vysokou pravděpodobnost rizika výbuchu, pokud se prach vyskytuje v rozvířeném stavu a je k dispozici oxidační prostředek, což je nejčastěji vzduch.

Pro vytvoření výbušné směsi hořlavého prachu se vzduchem, musí být k dispozici dostatečné množství prachových částic. Oblak rozvířeného prachu obvykle není homogenní, takže koncentrace může kolísat podle víření usazeného prachu. [2]

Pro zapálení směsi je nutný iniciační zdroj. Elektrostatický náboj je schopen výbušnou prachovou směs iniciovat, tudíž pokud je výbušná prachová směs iniciována, je zde vysoká pravděpodobnost, že požár a následný výbuch bude přenesen potrubím do další části technologie, a jedná se o zařízení pro akumulaci prachu z výroby (tkaninové filtry).

Elektrostatický náboj

Vznik elektrostatického náboje je obecně dán Coulombovým zákonem:

$$F_e = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad [\text{N}]$$

veličiny Q_1 a Q_2 jsou bodové náboje, r^2 je vzdálenost bodových nábojů od sebe a k je bezrozměrná konstanta úměrnosti:

$$k = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \varepsilon$$

kde ε je permitivita prostředí, což je veličina charakterizující prostředí mezi bodovými náboji, které jsou sledovány. Pro libovolné dielektrikum je dána hodnota relativní permitivity ε_r :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

ε_0 je permitivita vakua.

Vzhledem k tomu, že Coulombov zákon nepodává žádné informace o elektrostatickém poli, je zavedena další fyzikální veličina, intenzita elektrostatického pole E_{el} :

$$E_{el} = \frac{F_e}{Q} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2} \quad [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Zdroje elektrostatického nabíjení

Elektrostatický náboj je obvykle generován na materiálu mnoha způsoby, pro téma článku se jedná zejména o:

- kontakt a tření;
- indukce v elektrickém poli;
- přenos náboje.

Hlavním zdrojem elektrostatického náboje je ale triboelektrické nabíjení. Pokud dvě původně nenabitě látky přijdou do kontaktu, dochází k přenosu náboje na jejich společném rozhraní. V případě, že vzduch obsahuje pevné částice a tyto částice se stanou při kontaktu a oddělení nabitě, tak se vzduch jeví jako přenášeč elektrostatického náboje. Během oddělení, každý povrch ponese další náboj o stejné velikosti, ale s opačnou polaritou.

Kontakt a tření

Kontaktní nabíjení se vyskytuje na rozhraní pevná látka / pevná látka. Vzduch není schopen tímto způsobem nabíjet jiné materiály. V případě, že vzduch obsahuje pevné částice, mohou být tyto pevné částice nabitы kontaktem a díky těmto částicím může vzduch elektrostatický náboj přenášet. Během tohoto přenášení náboje Q v elektrickém poli s intenzitou E je nutno překonat sílu $F = E \cdot Q$, tudíž je vykonána určitá práce a náboj získává potenciální energii nazývanou elektrostatickou potenciální energií. Při přemísťování bodového náboje Q_o síly homogenního elektrostatického pole vykonají práci:

$$E = Q_o \cdot E \cdot r \quad [\text{J}]$$

Pro každý systém složeným ze dvou a více nabitých částic je možno přiřadit elektrostatickou potenciální energii E_p . Pokud nabitá částice Q_o změní v systému svoji polohu, elektrostatická síla poté vykoná práci odpovídající změně potenciální energie ΔE_p . Dvojice bodových nábojů má v tomto případě elektrickou potenciální energii podle obecného vztahu:

$$E_p = \frac{Q \cdot Q_o}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r} \quad [\text{J}]$$

Pod názvem elektrický potenciál φ se rozumí fyzikální veličina charakterizující pole v určité vzdálenosti od zdroje. Charakterizována je podílem elektrické potenciální energie E_p kladného bodového náboje Q_o podle výrazu:

$$\varphi = \frac{E_p}{Q_o} \quad [\text{V}]$$

Rozdíl potenciálu mezi dvěma body elektrického pole v bodech φ_1 a φ_2 je vždy rovno napětí U mezi těmito body:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = E \cdot r \quad [\text{V}]$$

a je také rovno práci, jenž je vykonána během přemístění náboje Q_o z jednoho bodu do druhého podle výrazu:

$$W = Q_o \cdot U \quad [\text{W}]$$

V případě, že látka je vodivá, existuje i fyzikální veličina intenzita proudového pole E_{pr} , která je dána poměrem napětí U k délce vodiče l podle vztahu:

$$E_{pr} = \frac{U}{l} \quad [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Výše uvedená veličina je nazývána jako spád napětí.

Pokud máme k dispozici pevné látky z různých materiálů, které jsou původně bez náboje a na potenciálu země a tyto látky přijdou do společného kontaktu, náboj se přenáší z jednoho materiálu na druhý.

Když se materiály od sebe vzdálí, výsledný kladný náboj zůstává na jednom povrchu a výsledný záporný náboj na povrchu druhém. S velikostí kontaktních ploch se množství náboje zvyšuje. Další tření také zvyšuje efektivní kontaktní oblast a pokud se o sebe otírají dva vzorky ze stejného materiálu, nabíjení může být velice silné.

Jakmile jsou dva materiály opačně nabitы, elektrické pole se vyskytuje mezi nimi. Když se materiály poté navzájem vzdalují, pro překonání přitažlivých sil opačných nábojů musí být vykonána určitá práce a rozdíl potenciálů se lineárně zvětšuje se vzdáleností. Větší potenciální rozdíl se snaží přitahovat náboje zpět do libovolného bodu zbytkového kontaktu. Pokud jsou materiály nevodivé (nebo i jeden), nelze dojít k úplné rekombinaci a na oddělených materiálech část náboje zůstává a může jít pouze o malé množství náboje. Jestliže jsou povrchy v kontaktu, vzdálenost mezi náboji je velmi malá. Potenciál, který je generován při oddělování je schopen snadno dosáhnout mnoha kilovoltů.

Indukce v elektrickém poli

Indukované náboje jsou náboje nahromaděné na povrchu látky. Jakmile je vytvořena rovnováha statickým rozložením náboje, uvnitř vodiče je nulová intenzita elektrického pole, ale protilehlé části jsou opačně elektricky nabitě. Jedná se ojev elektrostatické indukce. Podle Gaussovy věty elektrostatiky platí:

$$\frac{Q}{S} = \varepsilon \cdot E = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E = D \quad [\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}]$$

kde veličina D se nazývá elektrická indukce.

Elektrické pole se vyskytuje okolo každého nabitého předmětu. Vodič nebo disipativní materiál (materiál se střední rezistivitou nebo odporem, který leží mezi rozsahy pro vodivé a nevodivé materiály), který je zaveden do tohoto pole mění rozložení elektrického pole ve svém okolí a vytváří redistribuci nábojů v materiálu působením pole. Pokud je vodič od země izolován, tak přebírá potenciál závisející na poloze v poli, a díky tomuto potenciálu materiál je schopen vytvářet elektrostatický náboj. Jestliže je materiál v poli krátkodobě uzemněn, jeho potenciál je snížen na nulu, ale nerovnováha nábojů je zachována. Po odstranění elektrického

pole od předmětu, výsledný náboj zůstává. Pokud je materiál nyní od země izolován a elektrické pole je odstraněno, materiál má k dispozici náboj pro vytvoření elektrostatického výboje. Po tomto procesu je vodivý předmět nabit elektrickou indukci. Elektrostatický výboj z tohoto předmětu může být nebezpečný, například když se izolovaná osoba pohybuje v oblasti elektrostaticky nabitých materiálů.

Přenos náboje vedením

Kdykoliv nabitý předmět přijde do kontaktu s jiným předmětem, celkový náboj mezi nimi je sdílen v rozsahu jejich vodivosti a kapacity. Jedná se o vhodný zdroj pro elektrostatické nabíjení. Jako příklad může být uveden prach, dopadající nebo se usazující na pevné předměty.

Vodivost je závislá na proudové hustotě j a intenzitě proudového pole E_{pr} podle vztahu:

$$j = \gamma \cdot E_{pr} \quad [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Konstanta úměrnosti γ se nazývá měrná elektrická vodivost (konduktivita) pro daný kov a její jednotka je $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$. Převrácená jednotka elektrické vodivosti γ opět platí pro daný kov, nazývá se měrný elektrický odpor ρ (rezistivita) a je dán výrazem:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

Pokud je na různé vodiče přivedeno stejné množství náboje, tak jejich potenciál může být různý. V závislosti na geometrii vodiče se výsledný potenciál φ mění a je závislý současně na přítomnosti jiných nabitých těles Q , jenž se nacházejí v blízkosti vodiče podle výrazu:

$$Q = C \cdot \varphi$$

kde C se nazývá kapacita vodiče a má jednotku [F]. Kapacitu vodiče je možno zvětšit tak, že do jeho těsné blízkosti se umístí opačně nabitý vodič snižující jeho potenciál. Soustava izolovaných vodičů, které jsou od sebe odděleny dielektrikem (nevodivým prostředím) se nazývají kondenzátory. Kapacita kondenzátoru je dána výrazem:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U} \quad [\text{F}]$$

Pro deskový kondenzátor se vychází z Gaussova zákona elektrostatiky. Náboj jedné desky je uzavřen do Gaussovy plochy podle vztahu: $Q = \varepsilon_0 \cdot E_{pr} \cdot S$, kde S je plocha vodiče. Napětí mezi nabitými deskami je: $U = E_{pr} \cdot l$, kde l je vzdálenost elektrod. Po dosazení vztahů, dostáváme:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon_0 \cdot E_{pr} \cdot S}{E_{pr} \cdot l} = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{l}$$

což je podobný vztah jako pro elektrický odpor R vodiče, resp. elektrickou vodivost vodiče G :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad G = \gamma \cdot \frac{S}{l} \quad [\text{S}]$$

Uchování náboje

Po oddělení během procesu nabíjení se elektrostatické náboje rychle rekombinují přímo nebo přes zem, pokud tomu není vhodně zabráněno. V případě, že se náboj nachází na nevodíči, náboj se uchovává díky odporu (rezistanci) vlastního materiálu. Pro uchování náboje na vodiči se musí vodič izolovat od jiných vodičů a od země.

Vzduch je za normálních podmínek nevodíče a částice vytvářející oblaky prachu, mohou uchovávat svůj náboj po velice dlouhou dobu, bez ohledu na vodivost vlastních částic. Náboj je odváděn rychlostí, odpovídající odporům nevodíčů v systému a kapacitám vodičů.

V průmyslových procesech může docházet často ke kontinuálnímu generování elektrostatického náboje, který se akumuluje na izolantech nebo na izolovaných vodičích (např. proudění prachového materiálu do izolované nádoby, pohyb osoby přes izolovanou podlahu). Na izolovaném vodiči je pak potenciál výsledkem rovnováhy mezi rychlostí dodávání náboje a rychlostí odvádění náboje. Potenciál vodiče je dán rovnicí:

$$U_p = U_{p0} \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} + I \cdot R \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right)$$

kde:

U_p potenciál na vodiči [V];

U_{p0} počáteční potenciál;

R rezistence k zemi [Ω];

I proud [A];

t doba od začátku nabíjení [s];

C kapacita [F].

Maximálního potenciálu lze dosáhnout, pokud $t \gg R \cdot C$ podle vztahu: $U_{p,max} = I \cdot R$.

Rychlost odvádění náboje izolantů je značně zvyšována, pokud materiály absorbují atmosférickou vlhkost. Absorbovaná voda na povrchu náboje je hlavní příčinou povrchové konduktivity. Konduktivita se zvyšuje s množstvím absorbované relativní vlhkosti.

Elektrostatické výboje

K elektrostatickému výboji dochází, jestliže intenzita elektrického pole přesáhne prázdnou hodnotu okolního vzduchu. V případě normálních podmínek je prázdná intenzita pole pro ploché povrchy nebo pro povrchy o velkém poloměru pro vzdálenost 10 mm mezi elektrodami přibližně 3 MV.m⁻¹. Elektrostatické výboje mohou být definovány:

Jiskrové výboje - Elektrický výboj mezi dvěma vodiči mající různý potenciál. Výboj bývá velmi rychlý a je doprovázen charakteristickým dobře slyšitelným praskáním. Bývá viděn například mezi prstem osoby a velkým kovovým předmětem. Rozdíl potenciálů mezi vodiči, který je nutný pro vytvoření pole přesahující elektrickou pevnost okolní atmosféry, je závislý na tvaru vodičů a vzdálenosti mezi nimi. Výboje, které trvají delší dobu zvyšují pravděpodobnost iniciace hořlavých oblaků prachu.

Korónové výboje - Pokud mají vodiče ostré hroty nebo hrany, koróna se může vyskytovat v případech, jestliže je takový vodič uzemněn a pohybuje se směrem k velmi nabitému tělesu, nebo se potenciál vodiče zvyšuje na vysokou hodnotu. Výboje vznikají, když lokální elektrické pole v blízkosti ostrého povrchu je velmi vysoké, takže přesahuje prázdnou hodnotu. Korónový výboj je schopen také přenášet náboj na povrch nebo předmět. Hustota energie během korónového výboje je podstatně menší než při jiskrovém výboji, ale pokud je na hrotovém vodiči zvýšený potenciál, koróna je schopna přejít do jiskry mezi hrotem a dalším předmětem.

Postupující trsový výboj - Vysoká hustota povrchového náboje, jenž je vyžadována pro nastartování postupujícího trsového výboje může být generována na místech, kde prachové částice narážejí na stěny z vysoce rezistivního materiálu nebo na povlaky. Jedná se například o pneumatickou přepravu prachu pomocí trubek z materiálu o vysoké rezistivitě, nebo kovovými trubkami s vložkami z podobného materiálu.

Kuželové výboje - Kuželové výboje se vyskytují, pokud je například do síla plněny granule s velkou rezistivitou (polypropylenový a polyetylenový granulát). Během plnění nabitých částic jako jsou plastové granule, dochází do síla

k akumulaci náboje na hromadě. Pole z tohoto náboje vykazují odpuzivou sílu vůči podobně nabitým částicím dopadajícím na hromadu. Gravitační síly na částice působí proti těmto odpuzivým silám, takže dochází ke zvyšování hustoty náboje materiálu na hromadě. Pokud nabitá částice dopadají dále na hromadu a intenzita elektrického pole dosáhla průrazné hodnoty pro vzduch v této oblasti, dochází k výbojům ve směru k vodivým stěnám uzemněného sila [3].

Plazivé výboje - Plazivé výboje mohou vznikat během procesů silného nebo opakovaného nabíjení izolovaných vrstev, nebo povlaků, jenž jsou umístěny na vodivých plochách. Může k němu dojít například během manipulace prachu s vysokou rezistivitou pneumatickou dopravou při plnění velkoobjemových vaků [4].

Výboje z osob - Osoba izolovaná od země může snadno získávat a uchovávat elektrostatický náboj. Izolace od země souvisí s podlahovou krytinou nebo obuvi. Mechanismů způsobujících nabíjení osob je celá řada např. chůze po podlaze, manipulace s plasty, pobyt v blízkosti nabitých předmětů atd. V případě, že se elektrostaticky nabitá osoba dotkne vodivého předmětu, může dojít k jiskrovému výboji v místě kontaktu [3].

Popis technologie

Jak již bylo řečeno v úvodu, rizika iniciace výbušného prachu z výroby polymerů může nastat na těchto pracovištích:

- násypky, a to během transportu vstupního materiálu z provozních sil;
- produkční hala během přesypávání vyrobeného materiálu z produkčních sil do velkoobjemových vaků v konečné fázi výroby.

Násypky

Na pracovišti násypky je vstupní materiál (polypropylen, polyetylen) sypan do násypných sil dvěma způsoby:

- pneumaticky, potrubním systémem z provozních sil umístěných na venkovním prostoru mimo pracoviště (obr. 1). Jedná se o většinu zpracovávaného materiálu;
- gravitačně pomocí jeřábu, ale jedná se o menší část zpracovávaného materiálu.



Obr. 2 Násypná sila na pracovišti

Vstupní materiál z provozních sil je dopravován do provozu násypek (jedná se o dvě násypná sila, určené pouze pro vstupní materiál), pneumaticky, tlakovým vzduchem s tlakem 2 bar a potrubím o průměru 100 mm, které je vyrobeno z pozinkovaného plechu. Odbočky jsou plastové. Potrubní rozvod od provozních sil do násypných prostor je cca 30 m. Během přepravy, plastový granulát vytváří oteřem určité množství prachu. Další polymerní prach se nachází v provozní silu během přepravy cisternovým vozidlem a při dopravě z cisterny do provozního sila, který je prováděn rovněž tlakovým vzduchem. Při přepravě je horní část násypky opatřena ochranným víkem, aby vstupní materiál neunikal mimo prostor.

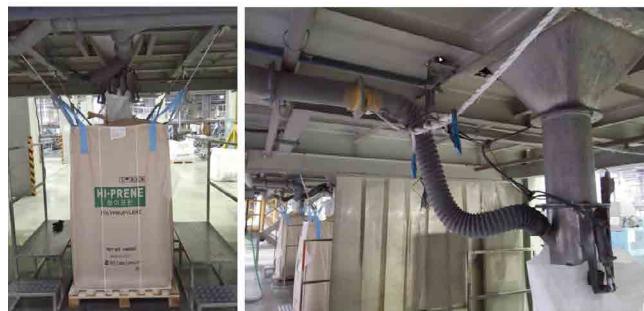
Během gravitačního sypaní jeřábem je z velkoobjemových vaků uvolňováno rovněž určité množství polymerního prachu vznikajícího oteřem během nakládky a přepravy, takže je zde rovněž možnost vytváření rizikových prachových oblaků polymerů. Velkoobjemové vaky nejsou provedeny v antistatické verzi.

Prostor násypek je pro odvádění prachu vybaven podtlakovým odsávacím systémem, který prachové částice odvádí mimo prostor pracoviště pomocí potrubního systému do technických prostor výrobního závodu, kde je umístěn tkaninový filtr pro čištění a akumulaci prachu. Potrubní systém se skládá z nerezových trubek, ale jen od délky 0,5 m od vývodu z násypek; pro tuto část je zde použit tkaninový plastový rukáv. Potrubní systém a ani samotný tkaninový filtr není vybaven žádnou ochranou proti možnosti výbuchu nebo požáru.

Produkční hala

V produkční hale je umístěno šest produkčních sil, do kterých je výsledný produkt dopravován tlakovým vzduchem. Jedno ze sil lze vidět na obr. 1. Spodní část produkčního sila je vybaveno vázicím mechanismem, který po dávkách uvolňuje požadované množství materiálu. Vyrobenej materiál se většinou nasypává do velkoobjemových vaků, jenž nejsou provedeny v antistatické verzi.

Násypné hrdlo (obr. 3) je vybaveno odbočkou pro odvádění prachu. Jedná se o potrubní systém s pozinkovanými trubkami, ale od odbočky do vzdálenosti cca 0,5 m je potrubí opatřeno flexibilní plastovou hadicí.



Obr. 3 Plnění velkoobjemových vaků výstupním produktem

Odsávané prachové částice jsou odváděny podtlakovým potrubním odsávacím systémem odváděny do technických prostor podniku, kde je umístěn tkaninový filtr pro čištění a akumulaci prachu.

Velkoobjemové vaky a statická elektřina

Velkoobjemové vaky pro sypké materiály jsou používány pro skladování prachů a granulátů. Obvykle jsou vyrobeny z polypropylenové tkaniny nebo z podobného pevného izolačního materiálu, který snese velkou zátěž.

Elektrostatický náboj se vytváří během plnění a vyprazdňování a může se akumulovat na povrchu i na tkanině z které je vak vyroben, nebo na jiných jeho částech. V případě, že dojde k uvolnění náboje formou zápalného výboje, může dojít k iniciaci. Jsou zde možné jiskrové, trsové, kuželové a plazivé výboje.

Podle charakteru a citlivosti výbušné atmosféry, která je přítomná během plnění a vyprazdňování velkoobjemových vaků, musí tyto vaky splňovat určité požadavky pro potlačení nebo eliminaci výboje. Velkoobjemové vaky jsou proto rozděleny do těchto typů:

- Typ A - bez jakýchkoliv opatření proti hromadění statické elektřiny;
- Typ B - konstruován pro předcházení vzniku jiskrových a plazivých výbojů;

- Typ C - konstruován pro předcházení vzniku zápalných jisker, trsových a plazivých výbojů, při vyprazdňování a plnění musí být uzemněn;
- Typ D - stejně jako typ C, ale bez nutnosti uzemnění.

Diskuse

Nebezpečí výše uvedených manipulací spočívá v tom, že prach vznikající třením granulátu je extrémně náchylný na statickou elektřinu, umí totiž vytvářet elektrostatický náboj a tím může docházet k jiskrovým, postupujícím trsovým nebo kuželovým výbojům, které byly popsány výše. Kromě toho má velmi nízkou iniciační energii, která leží v rozmezí 0,001 J až 10 J. V podstatě všechny pevné hořlavé materiály vytvářejí výbušnou atmosféru, pokud jsou jemně rozptýleny ve vzduchu. Jestliže jsou částice prachu menší než 0,5 mm a koncentrace prachu se pohybuje v rozsahu výbušnosti, nebezpečí výbuchu je možné. Pro většinu organických prachů se nebezpečná koncentrace pohybuje od 20 g.m⁻³ do několika kg.m⁻³. Nebezpečí výbuchu je nejvyšší pro velmi jemné prachy. Minimální iniciační energie pro hořlavé prachy, které jsou usazeny na povrchu je několikrát nižší, než když jsou rozptýleny ve vzduchu. Z tohoto důvodu je nebezpečí vznícení hořlavého prachu elektrostatickým nábojem vyšší, jestliže je prach usazen ve vrstvě než u prachu, který je rozvířen ve vzduchu [4].

První riziko iniciace hořlavého prachu polymerů elektrostatickým nábojem vzniká, během sypaní vstupního materiálu z velkoobjemových vaků do prostoru násypky a sypaní výsledného produktu z produkčního sila do velkoobjemových vaků. Měřením bylo prokázáno, že ve velkoobjemových vacích po nasypání výsledného produktu byl potenciál pohybující se od 5 000 V do 8 000 V. Podobné množství potenciálu se může vyskytovat i ve vacích obsahující vstupní materiál, takže v případě vytvoření výbušné atmosféry hořlavého prachu je iniciace elektrostatickými výboji možná, včetně možnosti výboje z osob během manipulace se zařízením. Pro zabránění tohoto rizika, by bylo výhodné nahradit velkoobjemové vaky typu A, za velkoobjemové vaky typu C nebo D.

V případě pneumatické dopravy vstupního materiálu z provozních sil do násypky přes potrubí je vytvářeno velké množství elektrostatického náboje. Dopravovaný materiál a také všechny části potrubního systému se mohou silně elektrostaticky nabíjet, takže riziko výbojů je zde také. Pro vyřešení tohoto problému je nutné uzemnění a pospojování elektricky vodivých částí, poněvadž jde o nejúčinnější způsob pro vyloučení nebezpečí od statické elektřiny. Zejména se jedná o pospojování tkaninových a plastových pohyblivých přívodů od vstupních hrdel násypných systémů. Tím je vyřešen nejčastější problém, což je hromadění nábojů na vodičích a prakticky je veškerá energie uvolněna v jediné jiskře proti zemi nebo jinému vodiči. Také je nutná pravidelná kontrola uzemňovacích vodičů odpovědnými pracovníky, protože často bývají spojovací a uzemňovací vodiče poškozeny manipulací s materiálem.

Pokud by ale k výbuchu hořlavého prachu došlo, maximální výbuchový tlak a maximální rychlost výbuchového tlaku bude přenesena potrubím do zařízení pro čištění a akumulaci prachu (tkaninový filtr), kde je možnost další exploze s podstatně vyšší brizancí. Pro tento případ by bylo vhodné vybavit tkaninový filtr zařízením pro zabránění přenosu plamene a výbuchového tlaku, popřípadě zařízením pro odlehčení výbuchu.

Závěr

Článek se soustředil na riziko vzniku požáru a následného výbuchu hořlavého prachu na vybraných pracovištích během výroby polypropylenového a polyethylenového granulátu, jenž je iniciován elektrostatickým nábojem. I když statická elektřina je známá přibližně 2 500 let, dopady na lidstvo byly shledány v podstatě nedávno. Elektrostatický náboj v průmyslu běžně

vzniká, během výroby polymerů se jedná o každodenní jev. Je sice fakt, že mnohé z účinků elektrostatické elektřiny jsou neškodné, nebo pouze nepříjemné, když nás to tzv. kopne, ale mimo to, elektrostatický náboj může také vést k nebezpečným situacím.

Výbuchy a požáry hořlavého prachu během zpracování plastů sice nepatří mezi časté případy, nicméně i během výroby a zpracování polymerních materiálů existují určitá rizika, o kterých bychom měli vědět. Současně s tím je nutné dodržovat základní bezpečnostní pravidla, které by každý provozovatel tohoto odvětví průmyslu měl znát a samozřejmě i vyžadovat, aby všichni jeho zaměstnanci tyto pravidla dodržovali.

Použitá literatura

- [1] DUCHÁČEK, V.: *Polymery, výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 3. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015, 276 s. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [2] DAMEC, J.: *Protivýbuchová prevence*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s. 2005, 188 s. ISBN 80-86111-21-0.
- [3] ČSN IEC/TR 61340-1 Elektrostatika - Část 1: Elektrostatické jevy - Principy a měření.
- [4] ČSN CLC/TR 60079-32-1 Výbušné atmosféry - Část 32-1: Návod na ochranu před účinky statické elektřiny.

Plán konferencí FBI a SPBI, z.s.

21. - 23. červen 2022 Fire Safety

Požární bezpečnost jaderných elektráren - mezinárodní seminář, který se koná vždy 2 roky České republice a 2 roky na Slovensku. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s. ho spolupřipřádá s Fakultou bezpečnostního inženýrství a Slovenskou společností propagace vědy a techniky. Seminář je zaměřený na problematiku požární bezpečnosti jaderných elektráren.

7. - 8. září 2022 Požární ochrana

Mezinárodní konference pořádaná ve spolupřipráci s Fakultou bezpečnostního inženýrství, Českou asociací hasičských důstojníků, z.s. a MV-Generálním ředitelstvím HZS ČR. Jednání konference je rozděleno do sekcí: Požární ochrana, Technologie pro bezpečnost, Protivýbuchová prevence, Věda a výzkum v požární ochraně, Zkušebnictví v požární ochraně.

1. - 2. únor 2023 Ochrana obyvatelstva

Mezinárodní konference pořádaná ve spolupřipráci s Fakultou bezpečnostního inženýrství a MV-Generálním ředitelstvím HZS ČR. V programu konference jsou zastoupeny tématické obory: krizový management, ochrana obyvatelstva, ochrana kritické infrastruktury, nebezpečné látky. Cílem konference je vyvolat diskusi mezi odborníky o zapojení moderních technologií do systémů ochrany obyvatelstva.

26. - 27. duben 2023 Bezpečnost a ochrana zdraví při práci

Mezinárodní konference pořádaná ve spolupřipráci s Fakultou bezpečnostního inženýrství, Ministerstvem práce a sociálních věcí ČR a Výzkumným ústavem bezpečnosti práce, v. v. i. Hlavní témata konference se týkají nových výzev v řízení bezpečnosti práce a procesů.

duben 2023 Požární bezpečnost stavebních objektů

Národní konference pořádaná ve spolupřipráci s Fakultou bezpečnostního inženýrství. Jednání konference je zaměřeno do oblastí týkající se požární bezpečnosti staveb, legislativních postupů při výstavbě, problematiky požárně bezpečnostních zařízení a logických návazností bezpečnostních a protipožárních systémů.

Aktuální informace ke konferencím najdete na www.spbi.cz.

VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

FAKULTA
BEZPEČNOSTNÍHO
INŽENÝRSTVÍ



ZUBOZ
ZNALCKÝ ÚSTAV BEZPEČNOSTI
A OCHRANY ZDRAVÍ, z.ú.