



ANALÝZA BEZPEČNOSTI 3D TLAČIARNE

Eva BURANSKÁ - Daniel MÉSZÁROS

RISK ANALYSIS OF THE 3D PRINTER



ENVIRONMENTAL POLICY TOOLS 2020

ABSTRAKT

Predkladaný článok je zameraný na posúdenie bezpečnostných rizík vyplývajúcich z využívania aditívnej výroby. Z bezpečnostného hľadiska bolo analýzou stanovené ako najvýznamnejšie riziko nedodržiavanie odbornej a bezpečnej manipulácie so zariadeniami aditívnej výroby, ktorá zohľadňuje prácu s horľavými a toxickými materiálmi. K ďalším zdravotným rizikám používania aditívnej výroby boli priradené emisie nanočastíc, ktoré môžu prenikať do krvného obehu. S tým je spojené nevhodné umiestnenie prístrojov v priestore, ktoré znemožňuje nedostatočné vetranie počas procesu tlače. V zmysle podrobnej analýzy týchto rizík na konkrétnom prístroji sme navrhli opatrenia, ktoré môžu viesť k bezpečnejšiemu, ale aj ekonomicky a environmentálne výhodnejšiemu využívaniu aditívnej výroby.

KEÚČOVÉ SLOVÁ: aditívnavýroba, bezpečnosť, analýza, riziko

ABSTRACT

The presented article is focused on the assessment of safety risks resulting from the use of additive manufacturing. From the safety point of view was identified this most significant risk by the risk analysis: non-compliance with professional and safe handling of additive manufacturing equipment, which takes into account the work with flammable and toxic materials. Other health risks associated with the use of additive manufacturing have been associated with emissions of nanoparticles that can enter the bloodstream. This is related with improper placement of the devices in the space, which prevents insufficient ventilation during 3D printing. In terms of a detailed analysis of these risks on a specific device, we have proposed measures that can lead to a safer, but also economically and environmentally more advantageous use of additive manufacturing.

KEY WORDS: additive manufacturing, safety, analysis, risk

Úvod

Aditívna výroba priniesla a stále prináša revolúciu v oblasti prototypovania a výroby. Vďaka možnostiam pri výrobe prototypov dostala táto technológia názov aj rýchle prototypovanie. Neskôr bol predstavený termín - 3D tlač, ktorý získal v priebehu času popularitu a 3D tlač sa postupne rozšírila tak, že zahŕňa širokú škálu techník, vrátane stereolitografie (SLA) a extrúzných procesov (napr. FDM- FusedDeposition Modeling)(Low et al. 2017).

FDM je založená na tavení plastu alebo kovu vo forme vlákna vnútri extrúzneho hlavy, ktorá taveninu vytlačí na podložku a svojím pohybom v dvoch osiach postupne nanáša veľmi tenkú vrstvu materiálu v rovine horizontálneho prierezu budúceho výrobku. Po nanosení celej vrstvy sa podložka zníži o hrúbku vrstvy vo vertikálnej osi a postupné nanášanie pokračuje nanovo až do vytvorenia celej súčiastky. Najčastejšie používanými materiálmi pre FDM sú termoplasty ABS a PLA. V profesionálnych aplikáciách sú využívané ďalšie materiály ako polykarbonáty alebo špeciálne termoplasty typu Ultem(Zein et al. 2002).



Každá technológia výroby súčiastok so sebou prináša určité riziká, či pre zdravie človeka alebo pre životné prostredie. Posudzovanie rizík pomáha minimalizovať možné poškodenie zdravia zamestnancov alebo životného prostredia spôsobeného pracovnou činnosťou (European Agency for Safety and Health at Work. 2007). Hlavným cieľom posudzovania rizík je teda ochrana zdravia a bezpečnosti zamestnancov. V tabuľke 1 uvádzame smernice anormatívne špecifikácie, ktoré sa uplatňujú pri práci so zariadeniami určenými pre aditívnu výrobu alebo pri práci s produktami týchto technológií.

Tab.1 Štandardy, smernice, príručky k bezpečnosti aditívnej výroby

P.Č.	Názov normy	Označenie normy
1.	Bezpečnosť strojov. Všeobecné zásady konštruovania strojov: Posudzovanie a znižovanie rizika	ISO 12100
2.	Postup pri vykazovaní údajov pre skúšobné vzorky pripravené aditívnou výrobou.	F2971
3.	Príručka na hodnotenie mechanických vlastností kovových materiálov vyrobených procesmi aditívnej výroby.	F3122
4.	Špecifikácia pre formát súboru aditívnej výroby verzia 1.2	EN ISO/ ASTM 52915
5.	Pokyny pre navrhovanie/dizajna aditívnej výroby.	ISO/ ASTM 52910
6.	Príručka pre aditívnu výrobu - Všeobecné princípy - Požiadavky na zakúpené súčasti aditívnej výroby.	ISO/ ASTM 52901
7.	Terminológia pre aditívnu výrobu - Všeobecné princípy.	EN ISO/ ASTM 52900
8.	Názvoslovie aditívnej výroby - súradnicové systémy a metodiky skúšok.	EN ISO/ ASTM 52921
9.	Sprievodca charakterizáciou vlastností kovových práškov používaných pri procesoch aditívnej výroby.	F3049
10.	Špecifikácia pre práškové materiály pri nanášaní.	F3091/ F3091M
11.	Sprievodca energetickým ukladaním kovov.	F3187
12.	Nariadenie pre riadenie bezpečnosti doplnkových výrobných zariadení.	UL3400
13.	Štandardná metóda testovania a hodnotenia emisií častíc a chemikálií z 3D tlačiarňami.	ANSI / CAN / UL 2904
14.	Smernica o strojových zariadeniach	2006/42/ES

Posudzovanie rizík 3D tlačiarne

V dôsledku rýchleho rozvoja týchto technológií, ako aj z dôvodu ich ľahšej dostupnosti môžeme skonštatovať, že ochrana zdravia pri práci s nimi je nedostatočná. Príčinou je aj nedostatočná reflexia bezpečnostných pravidiel na tento rýchly rozvoj. Bezpečnosť práce v zjednodušenej forme predstavuje súbor opatrení, prostredníctvom ktorých možno významne obmedziť možnosť poškodenia zdravia pri výkone pracovných činností. Súbor opatrení v tomto zmysle predstavuje súbor ciest, metód



a prostriedkov určených na dosiahnutie vytýčenej strategickej cieľovej funkcie, ktorou je ochrana zdravia pri práci, tzn. zachovanie zdravia, resp. vylúčenie jeho poškodenia (Short et al. 2015).

Terminológia súvisiaca s procesom posudzovania rizík je spájaná s nasledovnými pojmami ako je „nebezpečenstvo“, ktoré je chápané ako čokoľvek, čo má potenciálnu schopnosť spôsobiť ujmu, poškodenie. Nebezpečenstvo môže pôsobiť na ľudí, majetok a procesy a spôsobiť úraz, ochorenie, straty vo výrobe, poškodenie strojov, atď. (Pozn. Aktívne pôsobenie nebezpečenstva sa v slovenskej odbornej literatúre označuje ako ohrozenie. Používaný anglický výraz „hazard“ možno prekladať ako „nebezpečenstvo“, ale aj ako „ohrozenie“, alebo použiť oba výrazy.) Pojem „riziko“ pri práci je vyjadrením pravdepodobnosti a závažnosti zranenia alebo ochorenia pôsobením nebezpečenstva. Riziká na pracovisku sa môžu posudzovať podľa týchto piatich krokov, ako ukazuje schéma na obr.1 (European Agency for Safety and Health at Work. 2007).



*Obr. 1 Postup krokov pre posúdenie rizík na pracovisku
(European Agency for Safety and Health at Work. 2007)*

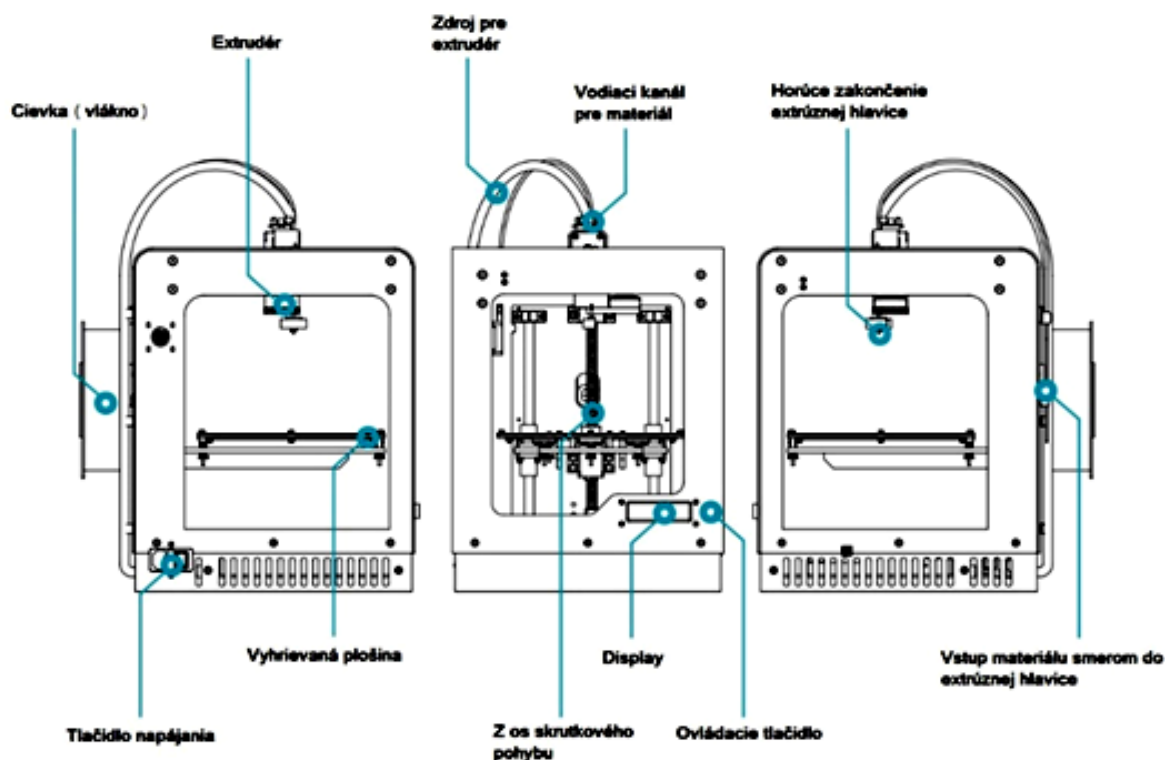
Metóda, ktorou sa zisťuje aká je pravdepodobnosť, že dôjde k nežiadúcej udalosti, a aké budú jej dôsledky spočíva v identifikácii nebezpečenstiev, ohrození a vyhodnotení rizík. Základom pre vykonanie analýzy je určenie objektu posudzovania (či sa bude posudzovať stroj, technológia, pracovná činnosť, pracovné prostredie a pod.) a zistenie základných parametrov posudzovaného systému. Analýza rizík je teda súčasťou procesu posudzovania rizík. Po posúdení rizika nasleduje etapa plánovania a návrh prijatia opatrení pre elimináciu identifikovaných rizík.

Charakteristika technického zariadenia 3D tlačiarne Zortrax M200

Zortrax M200 je 3D tlačiareň, ktorá pomocou špeciálnych materiálov umožňuje vyrobiť trojrozmerné výtlačky. Technológia zahŕňa nanášanie jednej vrstvy materiálu za druhou, aby sa vytvoril vopred navrhnutý tvar (Zortrax M200 - Manual 2014). Časti zariadenia sú opísané v obr. 2 a technická špecifikácia 3D tlačiarne je uvedená v tab.2.

Tab.2 Technická špecifikácia 3D tlačiarne (Zortrax M200 - Manual 2014)

Názov:	Zortrax M200
Typ:	3D tlačiareň
Pracovný priestor:	200 x 200 x 180 mm
Priemer materiálu:	1,75 mm
Priemer dýzy:	0,4 mm
Hlavica extrudéra:	Jedna hlavica (trojbodové zahrievanie)
Teplota:	max. 380°C
Vyhrievaná plošina:	max. 110°C
Prevádzková teplota:	20 - 35°C
Rok výroby:	---
Skladovacia teplota:	0 - 35°C
Požiadavky na napájanie:	Vstup AC 110/240V - 2A 50/60 Hz
Spotreba energie:	300W



Obr. 2 Základný popis častí FDM tlačiarne (Zortrax M200 - Manual 2014)



Metodika posudzovania rizika na vybranej 3D tlačiarňi

Z veľkého počtu metód vhodných pre posúdenie rizika 3D tlačiarne bola zvolená metóda „FMEA“ (Failure Mode and Effects Analysis) Analýza vplyvov porúch a ich následkov, ktorá hodnotí možné poruchy zariadenia a ich vplyvy na technologický proces, ku ktorým môže dôjsť na rôznych úrovniach – v systéme, subsysteme alebo v jeho komponentoch. Používa sa na identifikáciu možností druhu porúch jednotlivých zariadení a systémov. Pri analýze FMEA sa vytvára tabuľka možností porúch zariadení a ich účinkov na systém alebo podnik. Poruchový stav popisuje ako zariadenie zlyhá (počas chodu, vo vypnutom stave, únik...). Účinok spôsobenej poruchy je určený reakciou systému na zlyhanie zariadenia. FMEA identifikuje jednoduché spôsoby porúch, ktoré buď priamo vedú k nehode, alebo k nej prispievajú. FMEA je jedným z prvých systematických postupov na analýzu porúch. Jej princípom je skúmanie každého komponentu systému a zodpovedanie nasledujúcich otázok: - Ako sa môže komponent poškodiť? - Čo sa môže stať, keď sa komponent poškodí? (Tureková et al. 2012).

Môže byť rozšírená o početnosť výskytu porúch alebo o ich pravdepodobnosť. V tom prípade sa realizuje Analýza príčin, následkov a kritickosti porúch (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis – FMECA), pričom v postupe FMECA sa každá identifikovaná porucha ohodnotí kombinovaným vplyvom svojej pravdepodobnosti výsledku a závažnosti svojich následkov. Záverečným krokom je štúdium kritickosti porúch, pričom sa vyberajú tie prípady porúch, ktoré sú najzávažnejšie. Úspech FMEA závisí od dobrej koncepcie odhadu, aké možné poruchy sa môžu vyskytnúť vo výrobnom procese, na výrobnom zariadení a aké príčiny ich spôsobujú.

Výsledky FMEA sú obvykle dokumentované v tabuľkách. Analytik obvyčajne uvádza aj návrhy na zlepšenie bezpečnosti v príslušných položkách v tabuľke. (Tureková et al. 2012).

V tab.3 sú uvedené výsledky posúdenia rizík na 3D tlačiarňi pomocou FMEA metódy, kde bolo zariadenie rozdelené na jednotlivé subsystemy, na subsystemoch boli identifikované možné poruchy, ich príčiny ako aj spôsob odhalenia (detekcie). Po ohodnotení rizika vyplývajúceho z možných porúch prostredníctvom RPN indexu boli pre najzávažnejšie riziká navrhnuté opatrenia pre ich elimináciu. Nakoniec prebehlo opätovné hodnotenie rizika pomocou RPN indexu, kde sa ukázalo, že po prijatí opatrení klesá hodnota RPN a teda aj závažnosť rizika vyplývajúceho z možných porúch.



Tab.3 Analýza 3D tlačiarne Zotrax M200 pomocou FMEA (Mészáros 2020)

Objekt/časť	Potenciálny spôsob poruchy	Závažnosť	Potenciálna príčina	Podrobná príčina	Výskyt	Detekcia	RPN	Nápravné opatrenia	S	O	D	RPN
Dýza	Upchatá dýza.	9	Nevhodný materiál.	Tlačiareň má určené materiály na použitie, bol však zvolený nevhodný.	3	Indikované zariadením, skontrolujte prísun materiálu.	4	Vždy použij vhodný materiál podľa návodu.	2	1	2	4
	Prehriata dýza.	7	Chyba zdroja el. energie.	Odkrytý zväzok vodičov el. energie, ktorý bol vplyvom časti a vonkajšieho tepla nadmerne opotrebený.	6	Zistený deformovaný materiál obsluhou, detekovaná chyba servisným technikom.	5	Výmena a zakrytie zväzku káblov servisným technikom.	2	2	3	12
Vyhrievaná plošina	Nevyhrievanie plošiny.	8	Odpojený zväzok vodičov el. energie.	Pri presune tlačiarne nastalo porušenie.	4	Komplikované odstránenie výtlačku, zistené obsluhou.	7	Odstránenie obsluhou, skontrolovanie a utiahnutie komponentov.	3	2	2	12
	Zaumožnený pohyb plošiny.	6	Teleso v dráhe posuvu.	Nahromadený odpad od predošlých výtlačkov.	4	Indikované zariadením, znemožnený pohyb plošiny.	3	Odstránenie odpadu.	2	2	2	8
Cievka	Zaseknutie cievky.	5	Zle navinutý materiál od výroby. Nesprávne vložená cievka.	Štiepenie materiálu. Nesprávne odoberanie materiálu tlačiarňou.	3	Indikované zariadením, chyba prísunu materiálu.	1	Pravidelná kontrola obsluhou počas tlače.	2	1	1	2
	Poskodenie cievky.	5	Prasknutý naviják.	Zlé skladovanie, pád cievky.	3	Indikované zariadením, chyba prísunu materiálu.	2	Pravidelná kontrola obsluhou počas tlače.	2	2	2	8
Konštrukčné chyby	Chyby automatickej kalibrácie.	9	Opotrebenie /nesprávna obsluha.	Prerušený vodič indukčnej sondy.	7	Indikované zariadením, chyba XXX skontrolujte manuál.	5	Odborná obsluha.	4	4	1	16
	Nesprávne uchytená kabeláž.	7	Neodborne zložená tlačiareň.	Kabeláž (zväzok vodičov elektrickej energie) sa pri posúvaní hlavice extrudera dotýkala výtlačku.	7	Obsluhou, chybný výtlačok.	6	Správne uchytenie a zakrytie kabeláže.	2	2	2	8
Material/ látka	Ohrozenie horiacim materiálom.	9	Styk obsluhy z horiacim materiálom.	Nesprávna obsluha, výtlačok musí chladnúť.	7	Obsluhou, popálenie.	2	Odborná obsluha, používanie ochranných pomôcok.	2	3	1	6
	Ohrozenie aerosólom, prehriatou látkou alebo plynom.	10	Tavenie materiálu bez ochranných prvkov.	Pri tavení materiálu vznikajú ultrajemné častice a organické prechavé látky.	9	Pomocou rozboru plynového vaku napehneného počas tlače.	9	Používanie ochrannej masky s filtrom. Inštalácia HEPA filtra na zariadenie.	4	4	5	80
Elektrická časť	Poskodenie hlavice extrudera.	7	Výdrata plastová ochrana zväzku vodičov.	Pohybom hlavice extrudera a vplyvom vysokej teploty pri pravidelnom používaní sa prerušil kontakt s hlavitou.	5	Zariadením, materiál sa prestal ohrievať.	4	Pravidelná kontrola zariadenia. Nesuspnenie zariadenia pri odkrytých vodičoch.	2	2	2	8
	Úplné zhorenie vodičov a komponentov.	10	Poskodený zdrojový kábel.	Odhátá ochrana zdrojového kábla.	7	Požiarový hlásič.	10	Vizuálna kontrola zariadenia pred spustením.	6	5	3	90



Navrhnuté opatrenia

Na základe vykonanej analýzy rizík navrhujeme nasledovné opatrenia, ktoré by mohli prispieť k zvýšeniu bezpečnosti využívania aditívnej výroby:

- Odborná manipulácia a dodržiavanie návodu na používanie.
- Pri tlačení nezasahovať do zariadenia.
- Používanie rukavíc kvôli teplote hlavice extrúdera a tlačového lôžka, ktoré je vyhrievané, tiež kvôli ostrým častiam výtlaku.
- Používanie okuliarov a krytov kvôli vylomeniu časti tlačeného materiálu, tiež kvôli mechanickým súčastiam zariadenia.
- Filtre a masky sú nutné kvôli ultrajemným časticiam, ktoré sa uvoľňujú pri tepelnej extrúzii materiálu.
- Ideálne stabilné klimatické prostredie, 0-35°C.
- Vždy použiť vhodný materiál podľa návodu, ideálne certifikované materiály.
- Vetrateľnú miestnosť, v ktorej nie je odporúčané byť prítomný v čase tlače, kvôli emisiám jemných častí a organických prchavých látok. Z toho vyplýva opatrenie=lepší, ktoré využije multimediálne zariadenia ako fotoaparát či videozáznam. Neodporúča sa byť v jednej miestnosti s 3D tlačiarňou kvôli vyššie spomenutým emisiám, avšak najviac deformovaných výtlakov vzniká pri nesledovaní zariadenia. Sledovanie zariadenia však môže pomôcť zabrániť vzniku odpadu pomocou včasného zásahu obsluhy. Preto je vhodné použiť videozáznam na včasný zásah a šetrenie materiálu. Tým znížiť globálny problém odpadov a zároveň znížiť vystavenie obsluhy spomínaným emisiám.
- Kontrola stavu napájania v priestore, prepäťová ochrana.

Záver

Aditívna výroba priniesla obrovský pokrok v tvorbe návrhov modelov a výrobkov s veľmi širokým využitím. Postupne sa rozširujúca dostupnosť aj z hľadiska ceny, veľkosti, materiálov a času tlače, dostupnosť aditívnych technológií bežným spotrebiteľom prináša so sebou riziká v oblasti environmentálnych záťaží, ale aj bezpečnostné riziká ich bežného využívania. Prostredie, ktoré obsahuje aditívne technológie sa, z hľadiska potenciálne horľavých a toxických chemikálií, podobá chemickým laboratóriám. Analyzovali sme riziká využívania konkrétneho zariadenia Zortrax M200, ktoré sme predtým charakterizovali a vymedzili jeho mechanické, tepelné a elektrické rizikové faktory. Analýza rizík pomocou FMEA využívajúca systematický postup podrobnej charakteristiky systému za účelom zistenia potenciálnych spôsobov porúch, ich príčin a dôsledkov pomohla identifikovať riziká tlačiarne spojené so vznikom porúch jednotlivých subsystémov tlačiarne ako je napríklad dýza, vyhrievaná platňa a iné. Na základe vykonanej analýzy rizík FDM 3D tlačiarne boli navrhnuté opatrenia, ktoré znižujú bezpečnostné riziká pri práci s 3D tlačiarňou v konkrétnom prostredí. Tieto opatrenia sa týkali najmä dôsledného využívania ochranných pomôcok, odbornej manipulácie s tlačiarňou, ale aj uplatnenie materiálových a priestorových nárokov na zariadenie.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- European Agency for Safety and Health at Work. 2007. "Bezpečnosť a Ochrana Zdravia Pri Práci Sa Týka Každého. Základy Posudzovania Rizík." <http://hwi.osha.europa.eu>.
- Low, Ze Xian, Yen Thien Chua, Brian Michael Ray, Davide Mattia, Ian Saxley Metcalfe, and Darrell Alec Patterson. 2017. "Perspective on 3D Printing of Separation Membranes and Comparison to Related Unconventional Fabrication Techniques." *Journal of Membrane Science* 523 (May 2016): 596–613. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.10.006>.
- Mészáros, Daniel. 2020. "Environmentálne a Bezpečnostné Aspekty Aditívnych Technológií - Bakalárska Práca." MTF STU so sídlom v Trnave.
- Short, D. B., A. Sirinterlikci, P. Badger, and B. Artieri. 2015. "Environmental, Health, and Safety



- Issues in Rapid Prototyping.” *Rapid Prototyping Journal* 21 (1): 105–10.
<https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2012-0111>.
- Tureková, Ivana, Richard Kuracina, Karol Balog, and Jozef Martinka. 2012. *Technologické a Prírodné Havárie*. MTF STU Trnava.
- Zein, I, W Hutmacher, Kim-cheng Tan, and SH Teoh. 2002. “Fused Deposition Modeling of Novel Scaffold Architectures for Tissue Engineering Applications.” *Biomaterials* 23: 1169–85.
[https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(01\)00232-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(01)00232-0).
- Zortrax M200 - Manual. 2014. “Návod Na Používanie Tlačiarne Zortrax M200.” 2014.
<https://zortrax.com/blog/zortrax-manual-is-ready-for-download/>.

ADRESY AUTOROV

Ing. Eva BURANSKÁ, PhD.

Slovenská technická univerzita, Materiálovotechnologická fakulta, Ústav integrovanej bezpečnosti,
Pavilón TL, Botanická 49, 917 24 Trnava, Slovenská republika
e-mail: eva.buranska@stuba.sk

Daniel MÉSZÁROS

Slovenská technická univerzita, Materiálovotechnologická fakulta, Ústav integrovanej bezpečnosti,
Pavilón TL, Botanická 49, 917 24 Trnava, Slovenská republika
e-mail: xmeszaros@stuba.sk



RECENZIA TEXTOV V ZBORNÍKU

Recenzované dvomi recenzentmi, členmi vedeckej rady konferencie. Za textovú a jazykovú úpravu príspevku zodpovedajú autori.

REVIEW TEXT IN THE CONFERENCE PROCEEDINGS

Contributions published in proceedings were reviewed by two members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.