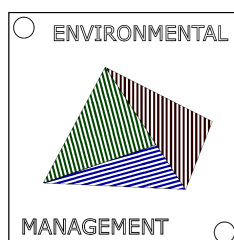


PREHLAD ADITÍVNEJ VÝROBY A EMISÍÍ UVOLŇOVANÝCH DO PRACOVNÉHO PROSTREDIA


✉ Eva BURANSKÁ ¹

REVIEW OF ADITIVE MANUFACTURING PROCESSES AND EMISSIONS RELEASED IN THE WORKING ENVIRONMENT




¹ Slovenská technická univerzita, Ústav integrovanej bezpečnosti MTF STU, Pavilón TL, Botanická 49, 917 24 Trnava, Slovenská republika

✉ Email: eva.buranska@stuba.sk

 ORCID iD: 0000-0002-2382-7508

<https://orcid.org/0000-0002-2382-7508>


 Competing interests : The author declare no competing interests.

 Publisher's Note: Slovak Society for Environment stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations. Copyright: © 2021 by the authors.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

This license allows reusers to distribute, remix, adapt, and build upon the material in any medium or format, so long as attribution is given to the creator. The license allows for commercial use.

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

ABSTRAKT

Aby hygienici zabezpečili vhodné zdravotné a bezpečné podmienky pre pracovníkov a aby toxikológovia navrhli experimentálne protokoly, ktoré sa približujú reálnym podmienkam expozície zamestnancov emisiám je potrebné lepšie pochopiť procesy vzniknutých emisií a expozícií.. Predkladaný článok predstavuje prehľad základných procesov aditívnej výroby a emisií, ktoré sa pri jednotlivých typoch aditívnej výroby tvoria, pričom sa vychádzalo z reálnych výskumov a meraní uverejnených v odborných vedeckých článkoch. Všetky kategórie procesov aditívnej výroby, okrem tých, ktoré používajú kovové materiály, uvoľňovali do pracovného prostredia organické plyny vrátane látok dráždiacich dýchacie cesty (toluén, xylény), astmagény (metylmakrylát, styrén) a karcinogény (benzén, formaldehyd, acetaldehyd). Fotoionizačné detektory pre stanovenie TVOC (celkových prchavých organických látok) v reálnom čase poskytli užitočné informácie o procesoch, ktoré využívajú pri tlači polymérne materiály. Vzhľadom k rôznorodosti materiálov ako aj samotných procesov aditívnej výroby je náročne vykonať ich vzájomné porovnanie. Je potrebné vytvoriť harmonizované prístupy monitorovania emisií a hodnotenia expozície a naďalej pokračovať vo

výskumoch zameraných na stanovenie faktorov vplyvujúcich na proces tvorby emisií a expozíciu zamestnancov najmä v súvislosti s materiálmi a samotnými zariadeniami („3D tlačiarňami“).

KLÚČOVÉ SLOVÁ: aditívne technológie, emisie, bezpečnosť, pracovné prostredie

ABSTRACT

In order for hygienists to ensure appropriate health and safety conditions for workers and for toxicologists to design experimental protocols that approximate the real conditions of exposure of employees to emissions, it is necessary to better understand the processes of the formation of these emissions and exposures. The presented article presents an overview of the basic processes of additive manufacturing and the emissions that, for individual types of additive manufacturing, are based on real research and measurements published in professional scientific articles. All categories of additive manufacturing processes, except those that use metallic materials, released organic gases into the working environment, including respiratory irritants (toluene, xylenes), asthmagens (methyl methacrylate, styrene) and carcinogens (benzene, formaldehyde, acetaldehyde). Photoionization detectors for the determination of TVOCs (total volatile organic compounds) in real time have provided useful information about processes that use polymeric materials in printing. Due to the variety of materials as well as the additive manufacturing processes themselves, it is difficult to compare them. It is necessary to create harmonized approaches for emission monitoring and exposure assessment and to continue research aimed at determining the factors influencing the emission process and the exposure of employees, especially in connection with materials and devices themselves ("3D printers").

KEY WORDS: additive technologies, emission, safety, environment

Úvod

Pojem „aditívna výroba“ (AV) používaný najmä v inžinierskych kruhoch či „3D tlač“, ktorý je bežnejší pre väčšinu laickej verejnosti v sebe zahŕňa širokú škálu technológií výroby súčiastok z 3D modelu postupným spájaním jednotlivých vrstiev rôznych druhov materiálu vrstvu po vrstve (Standard 2013). Tieto výrobky nájdu uplatnenie v rôznych priemyselných odvetviach: od spotrebnej elektroniky po letectvo a existuje mnoho príkladov medicínskych aplikácií, ako sú napríklad zubné implantáty alebo sluchové pomôcky (Kellens et al. 2017), (Wohlers 2017). Materiály používané v aditívnej výrobe sú vo forme prášku, kvapaliny, papiera alebo vlákna.

Použitie aditívnej výroby od výroby rýchlych prototypov presunula až po sériovú výrobu konečných produktov po roku 2005, kedy skončila platnosť patentu na FDM (Fused deposition modeling) technológiu a tým došlo k prudkému nárastu dostupnosti nízko nákladových zariadení aditívnej výroby využívajúcich princíp tavenia polymérneho vlákna (FFF – Fused filament lamination), ktoré sa tak okrem priemyselného prostredia dostali do učební, kancelárií, či domácností.

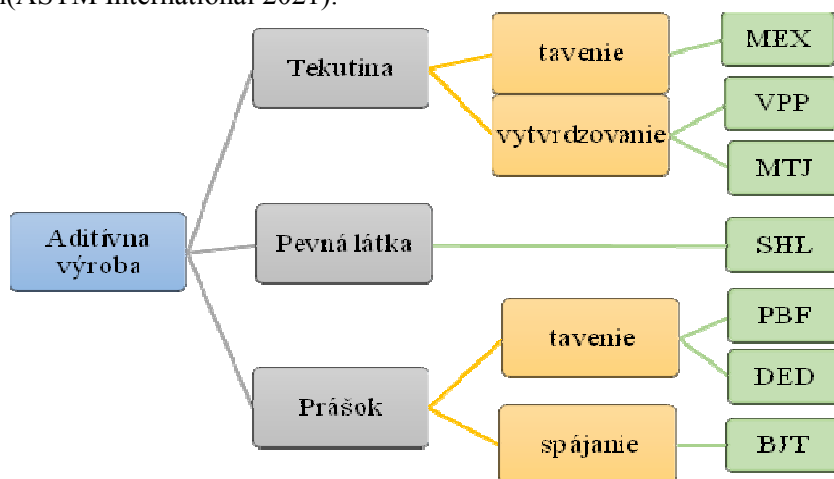
V roku 2004 bol hlásený prípad alergickej dermatitídy u pracovníka, ktorý obsluhoval zariadenia určené pre stereolitografický proces výroby komponentov do automobilového priemyslu (Chang et al. 2004). Bola to prvá správhovoriaca o nepriaznivom zdravotnom dopade aditívnej výroby na človeka. Štúdia ukázala, že pri manipulácii s výtlačkom z fotopolymerizačnej živice je nutné používať správny typ ochranných rukavíc t.j. nitrilové rukavice, ktoré dokážu efektívne ochrániť zamestnanca exponovaného živiciam pri fotopolymerizácii. Ďalšie výskumy informovali o procese uvoľňovania ultrajemných častíc do pracovného prostredia (Azimi et al. 2016), (Stephens et al. 2013), (Katz et al. 2020). Výsledky dokazujú, že koncentrácie ultrajemných častíc a organických prchavých zlúčenín a emisie z vlákien z 3D tlačiarní rozmiestnených v tesnej alebo miernej blízkosti (3 x 3 - 18 metrov) môžu prekročiť odporúčané úrovne expozície (REL) pre niektoré organické prchavé látky a typické vnútorné koncentrácie pre ultrajemné častice (Azimi, Fazli, and Stephens 2017). Dôležitou otázkou sa tiež stáva vhodný výber metódy pre meranie látok uvoľňovaných do vnútorného ovzdušia aby bolo možné navrhnuť toxikologické štúdie zamerané na reálne podmienky expozície.

Účelom tohto prehľadu je zhrnúť dostupné údaje o látkach, ktoré sú uvoľňované pri jednotlivých kategóriách aditívnej výroby do pracovného prostredia a zhodnotiť niektoré prístupy používané pre ich meranie a vyhodnocovanie.

Rozdelenie aditívnej výroby

Aditívnu výrobu možno na základe medzinárodnej terminológie rozdeliť do siedmich základných kategórií:

- **binderjetting (BJT)** – tekuté spojivo postupne nanášané na spájanie prášku,
- **directedenergydeposition (DED)** –využitie tepelnej energie na tavenie materiálu počas jeho ukladania, ktorý funguje pre polyméry, keramiku a kompozity s kovovou maticou, používa sa však prevažne pre kovové prášky,
- **materialextrusion (MEX)** – materiál je tavený a postupne vrstvený cez trysku alebo otvor,
- **materialjetting (MTJ)** – materiál je postupne vrstvený formou kvapiek a následne vytvrdený UV žiarením,
- **powderbedfusion (PBF)** – tepelná energia postupne spája oblasti práškového lôžka,
- **sheetlamination (SHL)** – postupne spájané pláty materiálu ako je papier, plast alebo kovová fólia, a ich laminovanie pomocou zvarovania, lepidla, tepla alebo tlaku.
- **vatphotopolymerization (VPP)** –tekutý fotopolymér v nádobe je postupne vytvrdzovaný svetlom(ASTM International 2021).



Obr. 1 Rozdelenie metód aditívnej výroby do siedmich kategórií (ASTM International 2021)

Legislatíva zastrešujúca aditívnu výrobu

AV má multidisciplinárny charakter a na jej štandardizácii sa neustále pracuje, pretože je nevyhnutná pre priemyselny sektor a aj domáce použitie. Hlavnými organizáciami, ktoré spolupracujú na štandardizácii procesov AV sú Medzinárodná organizácia pre normalizáciu, technická komisia ISO TC 261, Medzinárodná spoločnosť pre testovanie a materiály, Európsky výbor pre normalizáciu, technická komisia CEN/TC 438 a UnderwritersLaboratoriesInc. (UL). Primárnym cieľom ISO TC 261 je poskytnúť jednotné štandardy v procesoch, testovacích postupoch, kvalite, procesných reťazcoch a všetkých základných parametroch relevantných v AV. V súčasnosti je publikovaných 19 noriem radu ISO TC261. Napriek tomu sa vyvíja ďalších 35 noriem podľa ISO a ASTM. Organizácie ako ASTM a ISO uznali potrebu konkrétnych a jednotných noriem pre AV, pretože je dôležité vyplniť túto významnú medzeru vyplnenú všeobecnými normami zameranými na materiály alebo akýkoľvek inývšeobecný proces. Preto sa v súčasnej dobe pracuje na harmonizácii noriem ASTM F42 a ISO TC261 na troch úrovniach (Kawalkar, Dubey, and Lokhande 2022):

- I) Normy najvyššej priority: Všeobecné koncepcie, spoločné požiadavky a aplikovateľné vo väčšom rozsahu.

- II) Kategorizované štandardy AV: zamerané na vývoj materiálových a procesných štandardov.
- III) Špecializované normy AV: Špecifické pre materiály, procesy a aplikácie.

Cieľom harmonizácie noriem je redukcia duplicity a odstránenie rozporov medzi normami najmä v oblastiach:

- kvalifikácie a zlepšenia metód pre certifikáciu, podmienok pre návrh/dizajn, skúšobných metód vykonávaných na určenie charakteristík vstupných surovín/polotovarov,
- skúšobných metód na určenie mechanických vlastností hotových dielov AV,
- pravidiel pre materiálovú recykláciu (opätovné použitie), štandardizácie návodov pre porovnávacie testovacie metódy, štandardizácie testovacích vzoriek, požiadaviek na nákup dielov AV,
- harmonizácie terminologických pojmov.

Štandardizácia v oblasti BOZP a AV je z tohto dôvodu rovnako nejednotná a všeobecná. Hoci existuje niekoľko noriem, výskumov a meraní, ktoré postupne odhaľujú neprebádané oblasti AV, predpisy OSHA (Occupational Safety and Health Administration), normy NFPA (National Fire Protection Association) a bezpečnostné riziká spojené s AV sa v súčasnosti neuvádzajú ako dokumenty týkajúce sa priamo AV. Tým, že prostredie AV sa veľmi podobá chemickým laboratóriám kvôli používaniu potenciálne horľavých a toxických chemikálií a kvôli vznikaníu chemického odpadu, je vhodné zaradiť laboratória AV v rámci OSHA ako chemické laboratória alebo podobne regulované/kontrolované prostredia (Short et al. 2015).

Na to aby bolo možné prijať bezpečnostné opatrenia na zmiernenie potenciálneho rizika, je potrebné poznať nebezpečenstvá, ktoré AV so sebou prináša. Hoci niektoré bezpečnostné problémy AV majú podobné črty so strojárskou výrobou, existujú špecifické opatrenia, ktoré by sa mali prijať práve v prostredí AV a mali by na ne reflektovať aj spoločnosti, ktoré AV zavádzajú do bežnej výroby. Nejednotné sú aj podmienky a postupy hodnotenia emisií uvoľňovaných do pracovného prostredia počas AV a preto uvádzame niekoľko výsledkov štúdií, ktoré sa tejto problematike venovali.

Druhy emisií tvorených pri aditívnej výrobe

Počet štúdií venujúcich sa problematike emisií (akýchkoľvek látok, ktoré sa uvoľnili do prostredia počas AV) a s nimi spojenou expozíciou (množstvo látky, ktoré bolo namerané v dýchacej zóne osoby, na koži alebo v biologickej tekutine) počas AV sa postupne zvyšuje. Spočiatku boli štúdie zamerané na kategóriu procesov MEX a postupne sa diverzifikovali aj na ďalšie kategórie AV. Ich hlavným cieľom bolo odhaliť možné nebezpečenstvá AV a prispieť tak k implementovaniu správnych zdravotných a bezpečnostných opatrení pre ich elimináciu. V tab. 1 sú uvedené príklady emisií uvádzané na základe zistení z výskumov zameraných prevažne na technológie MEX, BJT a DED.

Tabuľka 1 Príklady látok emitovaných pri AV (Stefaniak, Du Preez, and Du Plessis 2021), (Damanhuri et al. 2019),

| Organické prchavé látky (VOC) | Ultrajemné častice (UFP) |
|--|--------------------------|
| <i>Konkrétne emisie zistené pri AV:</i> | |
| <i>acetaldehyd, etanol, acetón, izopropylalkohol, N-hexán, chloroform, benzén, p-xylén, benzaldehyd, etylbenzén, styrén, acetofenón, toluén, o-xylén, kaprolaktám, laktid, dekán, cyklohexanol, metylmetakrylát, a-butanol, formaldehyd,</i> | |

MEX - FDM – plastové vlákno je tavené a vytlačované cez dýzu a nanášané po vrstvách na platformu. V závislosti od funkcie môže byť tlačený predmet vyrobený najčastejšie z akrylonitrilbutadiénstyrénu (ABS), čo je tvrdý a odolný plast alebo kyseliny polymliečnej (PLA), čo

je mäkkší biologicky rozložiteľný materiál. Tiež sa ako materiál používajú filamenty z polyamidu a polyetyléntereftalátu alebo odolnejšie plasty ako polykarbonát. Autori Stephens a kol. dokázali, že FDM 3D tlač emituje ultrajemné častice s priemerom ≤ 100 nm ako aj prchavé organické polutanty (VOC)(Stephens et al. 2013). Štúdia autorov Chýlek a kol. prezentuje informácie o rozdieloch medzi jednotlivými tlačovými materiálmi z hľadiska množstva emitovaných jemných častíc, ako aj distribúcie množstva častíc v čase. Štúdia tiež naznačuje, že termogravimetrická analýza materiálov sa môže použiť na odhad emisie častíc, ku ktorej dôjde počas procesu FDM tlače(Chýlek et al. 2019).Vzhľadom na zistenia (Azimi et al. 2016) boli stanovené odporúčania, ktoré sa okrem iného týkali aj odporúčania, že v prípade výroby komponentov z iných ako nových nízkoemisných vlákien by výrobcovia 3D tlačiarňi mali hodnotiť účinnosť tesnosti krytov tlačiarňi proti úniku UFP (ultra jemných častíc) a VOC a zaviesť systémy na filtráciu týchto častíc ako súčasť tlačiarňi. Kombinácie materiálov tlačených v uzatvorených a málo vetraných miestnostiach na viacerých 3D tlačiarňach bez tesniacich krytov a filtračných systémov môže spôsobovať zdravotné riziká a pri navrhovaní takýchto prevádzok treba postupovať opatrne.

BJT (binderjetting) – nanášaniekvapalného spojiva do práškoveho lôžka, pričom vytvrdzovanie je založené na chemickej reakcii spojiva a prášku. Práškove materiály môžu byť rôzneho charakteru napríklad sádra alebo nehrdzavejúca oceľ a iné. Pri týchto dvoch materiáloch bola urobená štúdia, kde sa merali celkové koncentrácie častíc a prchavých organických zlúčenín, ktoré v miestnosti s objemom 157m^3 dosahovali maximálne $1725\mu\text{g}/\text{cm}^3$ pre sádrový proces, keď sa otvoril horný kryt tlačiarne a priemerná koncentrácia častíc pre nehrdzavejúcu oceľ bola $700 \text{ #}/\text{cm}^3$ (Afshar-Mohajer et al. 2015), (Lewinski, Secondo, and James 2019).

DED (directenergydeposition)– tavenie práškoveho materiálu prostredníctvom tepelnej energie, ktorej zdrojom môže byť laser, elektrónový lúč, plazma alebo elektrický oblúk.Experimentálne meranie počas DED s použitím 316L nehrdzavejúcej ocele a prášku Inconel 625 potvrdilo emitovanie častíc s priemerom len niekoľko nanometrov a viac ako 90% častíc menších ako 250 nm, pričom na niektorých vzorkách boli kvantifikované stopy Cr(VI). Vysoké úrovne častíc ($> 5 \times 10^5 \text{ #}/\text{cm}^3$, 300 až $1300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ inhalovateľných častíc a 200 až $6000 \mu\text{g Cr(VI)}/\text{m}^3$) sa uvoľnili vo vnútri tlačiarne počas rôznych výrobných cyklov, pričom typ materiálu aj vstrekovacia dýza mali významný vplyv na koncentráciu počtu častíc(Nagarajan et al. 2020).

MTJ (materialjetting) – kvapôčky stavebného materiálu sa selektívne ukladajú a následne vytvrdzujú svetlom. Štúdia Ryana a Hubbarda (2016) analyzovala VOC a častice vo vnútri tlačiarne pri tlači kvapalnou živicom. Hmotnostná koncentrácia častíc sa pohybovala od $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (pevné častice s aerodynamickým priemerom menším ako $10 \mu\text{m}$ (PM10) mimo tlačiarne) do $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (pevné častice s aerodynamickým priemerom menším ako $1 \mu\text{m}$ (PM1) vo vnútri tlačiarne), pričom PM1 počas tlače klesala a PM2,5 stúpala. V miestnosti boli stanovené acetón, n-butanón, 2-butanón, 1,4-dioxán, etanol, izopropylalkohol a toluén. 1,4-dioxán, potenciálny profesionálny karcinogén (NIOSH 2007), bol prítomný v najvyššej koncentrácii ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$); žiadna z ďalších šiestich VOC nepresiahla $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ryan and Hubbard 2016).

PBF (powderbedfusion) – tepelná energia selektívne spája oblasti práškoveho lôžka. Publikované články sa venujú prevažne kovovým práškom a menej polymérom. Jedna z mnohých štúdií Graff a kol. (2017), ktorá bola zameraná na monitorovanie osobnej expozície počas 45 minút, ktoré zahŕňali otvorenie tlačiarne, vysávanie konštrukčnej/základnej dosky, manipuláciu s konštrukčnou/základnou doskou, preosievanie kovového prášku, čistenie tlačiarne a jej plnenie kovovým práškom, potvrdila expozíciu prachom ($210 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cr ($< 44 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ni ($< 99 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Co ($< 38 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a Fe ($< 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)(Graff et al. 2017).

VPP (vatpolymerization)– tekutý fotopolymér je v nádobe selektívne vytvrdzovaný svetlom.Štúdia zameraná na environmentálnu testovaciu komoru uviedla, že priemerné výnosy emisií častíc boli vyššie pre tlačiarne typu DLP v porovnaní s tlačiarňami typu SLA, čo naznačuje, že

technológia tlačiarne je dôležitým faktorom, ktorý ovplyvňuje emisie (Stefaniak, Du Preez, and Du Plessis 2021).

Záver a diskusia

Rýchly vývoj technológií AV z hľadiska konštrukcie strojov a nových materiálov predstavujú výzvy pre zabezpečenie vhodných zdravotných a bezpečnostných podmienok. V súčasnosti neexistuje prístroj schopný simultánneho monitorovania a charakterizačných meraní v reálnom čase, ktorý by bol vhodný pre všetky kategórie procesov AV (Stefaniak, Du Preez, and Du Plessis 2021).

Z prieskumu literatúry zameranej na charakteristiku podmienok vzniku, druhu a množstva emisií ako aj na expozíciu počas AV vyplývajú nasledovné odporúčania v oblasti budúceho výskumu (Stefaniak, Du Preez, and Du Plessis 2021) :

- poznanie faktorov, ktoré ovplyvňujú tvorbu emisií a expozíciu v reálnych podmienkach,
- venovať pozornosť všetkým kategóriám AV (v súčasnosti nie sú dostupné údaje o SHL),
- vyhodnocovať faktory súvisiace so zariadením AV a pracovným priestorom, v ktorom je zariadenie umiestnené,
- vetranie (všeobecné vetranie, systémy HVAC, lokálne odsávacie vetranie atď.) a ich účinnosť,
- vyhodnocovanie faktorov súvisiace so zariadeniami AV ako sú dizajn tlačiarne (utesnenie, filtre, zabudovaná ventilácia atď.) a prevádzkové konfigurácie (otvorené/zatvorené dvere atď.)
- vyhodnocovanie faktorov súvisiacich so surovinami najmä zložiek surovín, ktoré nie sú uvedené v KBÚ,
- prísady (umelo vytvorené nanomateriály, farbivá, zmäkčovadlá, retardéry horenia, estetické a funkčné materiály),
- recyklované prášky a polyméry v porovnaní s pôvodnými surovinami,
- rozšírenie hodnotenia expozície tak, aby zahŕňala cestu dermálnej expozície a biologické markery expozície, ak sú k dispozícii,
- vyvíjanie prediktívnych modelov na hodnotenie emisií z objemových charakteristík východiskových materiálov s cieľom informovať používateľov,
- vykonať viac terénnych hodnotení, aby sa pochopili deje, ktoré najviac prispievajú k expozíciám počas procesu AV (predtlač, tlač, posttlač a následné spracovanie),
- vyvíjanie medzinárodných harmonizovaných metód hodnotenia emisií a expozícií na pracovisku a oznamovanie údajov, ktoré zahŕňajú príslušné metriky častíc (počet a povrchová plocha pre procesy ako MEX, ktoré prevažne emitujú UFP a hmotnosť pre procesy ako BJT, ktoré emitujú mikrónové častice vodného kameňa) a prístupy monitorovania prchavých organických látok a zlúčenín SVOC (poloprchavých organických zlúčenín) pre všetky procesy okrem procesov na báze kovov,
- presadzovanie koncepcie prevencie prostredníctvom návrhu pri konštrukcii stroja a školení operátorov s cieľom znížiť emisie a expozíciu,
- vyvíjanie nástrojov pre monitorovanie hmotnostných ER špecifických pre danú látku v reálnom čase, ktoré sú dostatočne citlivé a prenosné,
- vyhodnocovanie emisií a expozície z viacerých typov kategórií AV procesov pracujúcich súčasne v rovnakom priestore pre aditívne alebo synergické efekty.

Vzhľadom k rôznorodosti materiálov ako aj samotných procesov aditívnej výroby je náročné vykonať ich vzájomné porovnanie. Je potrebné vytvoriť harmonizované prístupy monitorovania emisií a hodnotenia expozície a naďalej pokračovať vo výskumoch zameraných na stanovenie faktorov vplývajúcich na proces tvorby emisií a expozíciu zamestnancov najmä v súvislosti s materiálmi a samotnými zariadeniami („3D tlačiarňami“).

Podakovanie [zaradenie príspevku] - Acknowledgments

Tento článok bol vytvorený s podporou Kultúrnej a vzdelávacej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky na základe zmluvy č. 020STU-4/2021.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- Afshar-Mohajer, Nima, Chang Yu Wu, Thomas Ladun, Didier A. Rajon, and Yong Huang. 2015. "Characterization of Particulate Matters and Total VOC Emissions from a Binder Jetting 3D Printer." *Building and Environment* 93 (P2): 293–301. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.013>.
- ASTM International. 2021. *ISO/ASTM 52900:2021 Additive Manufacturing - General Principles-Fundamentals and Vocabulary*. <https://www.iso.org/standard/74514.html>.
- Azimi, Parham, Torkan Fazli, and Brent Stephens. 2017. "Predicting Concentrations of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds Resulting from Desktop 3D Printer Operation and the Impact of Potential Control Strategies." *Journal of Industrial Ecology* 21: 107-S119. <https://doi.org/DOI: 10.1111/jiec.12578>.
- Azimi, Parham, Dan Zhao, Claire Pouzet, Neil E. Crain, and Brent Stephens. 2016. "Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments." *Environmental Science and Technology* 50 (3): 1260–68. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04983>.
- Chang, Ta Yuan, Lukas Jyuhn Hsiarn Lee, Jung Der Wang, Ruei Hao Shie, and Chang Chuan Chan. 2004. "Occupational Risk Assessment on Allergic Contact Dermatitis in a Resin Model Making Process." *Journal of Occupational Health* 46 (2): 148–52. <https://doi.org/10.1539/joh.46.148>.
- Chýlek, Radomír, Libor Kudela, Jiří Pospíšil, and Ladislav Šnajdárek. 2019. "Fine Particle Emission during Fused Deposition Modelling and Thermogravimetric Analysis for Various Filaments." *Journal of Cleaner Production* 237. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117790>.
- Damanhuri, Amir Abdullah Muhamad, Azian Hariri, Muhammad Hafidz Fazli Md Fauadi, Mohd Alkahari Rizal, and Mohamad Rafi Omar. 2019. "Emission of Selected Environmental Exposure from Selective Laser Sintering (SLS) Polyamide Nylon (PA12) 3D Printing Process." *Journal of Safety, Health and Ergonomics* 1 (1): 1–6. <https://fazpublishing.com/jshe/index.php/jshe/article/view/1>.
- Graff, Pål, Bengt Ståhlbom, Eva Nordenberg, Andreas Graichen, Pontus Johansson, and Helen Karlsson. 2017. "Evaluating Measuring Techniques for Occupational Exposure during Additive Manufacturing of Metals: A Pilot Study." *Journal of Industrial Ecology* 21: S120–29. <https://doi.org/10.1111/jiec.12498>.
- Katz, Erin F., J. Douglas Goetz, Chunyi Wang, James L. Hart, Brandon Terranova, Mitra L. Taheri, Michael S. Waring, and Peter F. Decarlo. 2020. "Chemical and Physical Characterization of 3D Printer Aerosol Emissions with and without a Filter Attachment." *Environmental Science and Technology* 54 (2): 947–54. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04012>.
- Kawalkar, Rajat, Harrsh Kumar Dubey, and Satish P. Lokhande. 2022. "A Review for Advancements in Standardization for Additive Manufacturing." *Materials Today: Proceedings* 50: 1983–90. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.333>.
- Kellens, Karel, Martin Baumer, Timothy G. Gutowski, William Flanagan, Reid Lifset, and Joost R. Duflou. 2017. "Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications." *Journal of Industrial Ecology* 21: S49–68. <https://doi.org/10.1111/jiec.12629>.
- Lewinski, Nastassja A., Lynn E. Secondo, and K.Ferri James. 2019. "On-Site Three - dimensional Printer Aerosol Hazard Assessment: Pilot Study of a Portable in Vitro Exposure Cassette." *Process Safety Progress* 38 (3): 6. <https://doi.org/10.1002/prs.12030>.
- Nagarajan, Hari P.N., Suraj Panicker, Hossein Mokhtarian, Eric Coatanéa, and Karl R. Haapala. 2020. "Improving Worker Health and Safety in Wire Arc Additive Manufacturing: A Graph-Based Approach." *Procedia CIRP* 90: 461–66. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.116>.
- 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>.

- Standard, A.S.T.M. 2013. "F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012)."
- Stefaniak, A. B., S. Du Preez, and J. L. Du Plessis. 2021. "Additive Manufacturing for Occupational Hygiene: A Comprehensive Review of Processes, Emissions, & Exposures." *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews* 24 (5): 173–222. <https://doi.org/10.1080/10937404.2021.1936319>.
- Stephens, Brent, Parham Azimi, Zeineb El Orch, and Tiffanie Ramos. 2013. "Ultrafine Particle Emissions from Desktop 3D Printers." *Atmospheric Environment* 79: 334–39. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.050>.
- Wohlers. 2017. *Wohlers Report 2017 : 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry : Annual Worldwide Progress Report*. 22nd ed. FORT COLLINS, COLORADO, USA: Wohlers Associates, Inc. <https://wohlersassociates.com/2017report.htm>.
- Ryan, T., Hubbard. D. 2016. „3-D printing hazards: Literaturereview&preliminary hazard assessment“. *Professional Safety* 61:56–62.