

A. S. FONSECA

Universidad de Barcelona, Hiszpania

M. VIANA, X. QUEROL, N. MORENO

Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDÇA-CSIC), Hiszpania

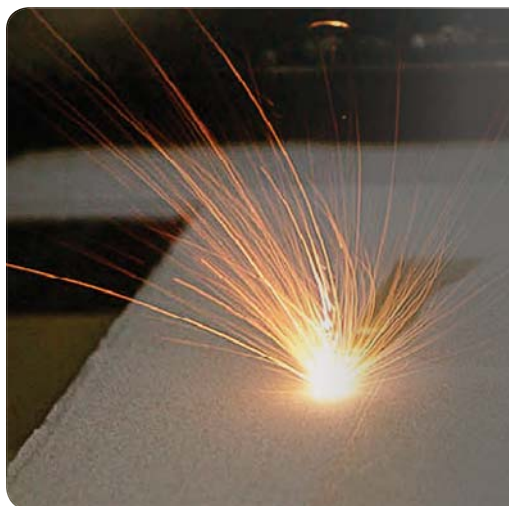
I. DE FRANCISCO, C. ESTEPA, G.F. DE LA FUENTE

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA – Universidad de Zaragoza), Hiszpania

Kontakt: ana.godinho@idaea.csic.es

DOI: 10.5604/01377043.1210101

Narażenie na nanocząstki w środowisku pracy w procesach ceramicznych wykorzystujących technologię laserową



Fot. Novomet

W artykule* przedstawiono wyniki oryginalnych badań dotyczących narażenia pracowników przemysłu ceramicznego na ultradrobne i nanocząstki, które powstają w trakcie wykorzystywania lasera do spiekania oraz w wyniku ablacji laserowej. Wyniki przeprowadzonych badań porównano z wartościami referencyjnymi, zalecanymi w stosunku do wymienionych cząstek, a także skomentowano poziom narażenia pracowników, który został uwidocznił eksperymentalnie.

Słowa kluczowe: ceramika, pyły, nanocząstki, ablacja laserowa, spiekanie laserowe, pomiary

Workplace exposure to nanoparticles in ceramic processes using laser technology

The article* presents original research results regarding the exposure of workers employed in the ceramic industry towards ultra small and nano particles created as a result of laser sintering as well as laser ablation. The results of the research were compared with the referential values for the abovementioned particles and the experimentally proven level of worker's exposure was awarded a commentary.

Keywords: ceramics, dusts, nanoparticles, laser ablation, laser sintering, measurements

Wstęp

Spiekanie laserowe i ablacja płytek ceramicznych to techniki innowacyjne, wykorzystujące dużą energię, stosowane w przemyśle ceramicznym. Zdaniem wielu ekspertów mają one również potencjał do wdrożenia ich na skalę globalną w zakładach przemysłu ceramicznego. Laserowe spiekanie płytek ma wiele zalet, z których najistotniejszymi są: wysoka szybkość tego procesu, a także wysoka trwałość powierzchni materiałów konstrukcyjnych [1,2]. Ablacja laserowa stosowana jest do grawerowania różnych wzorów na płytkach ceramicznych. Proces ten polega na usuwaniu materiału z powierzchni płytki za pomocą naświetlania jej wiązką lasera impulsowego [2,3].

Ze względu na wysoką temperaturę i/lub czynniki mechaniczne wymienione procesy mogą często emitować, w tzw. niezorganizowany sposób, ultradrobne i nanocząstki do powietrza w środowisku pracy. Istnieje wiele dowodów, opisanych m.in. w literaturze fachowej, na to, że pracownicy w przemyśle ceramicznym są narażeni na działanie szkodliwych cząstek unoszących się w powietrzu [4,5]. Jednocześnie trzeba stwierdzić, że badaniom oceny narażenia na ultradrobne cząstki i nanocząstki generowane w trakcie opisywanych procesów poświęcono stosunkowo niewiele miejsca w publikacjach – a z pewnością niewystarczająco dużo uwagi. Cząstki te mogą bowiem stanowić dla pracowników potencjalne zagrożenie dla zdrowia [6,7,8].

Dodać należy, że wbrew pozorom problem opisywany w artykule dotyczy również dużej grupy pracowników w Polsce. Zgodnie z danymi PAiIZ w 2010 r. produkcja sprzedana porcelanowych naczyń i ceramiki w Polsce osiągnęła 2402,0 mln PLN. Bardzo dynamicznie

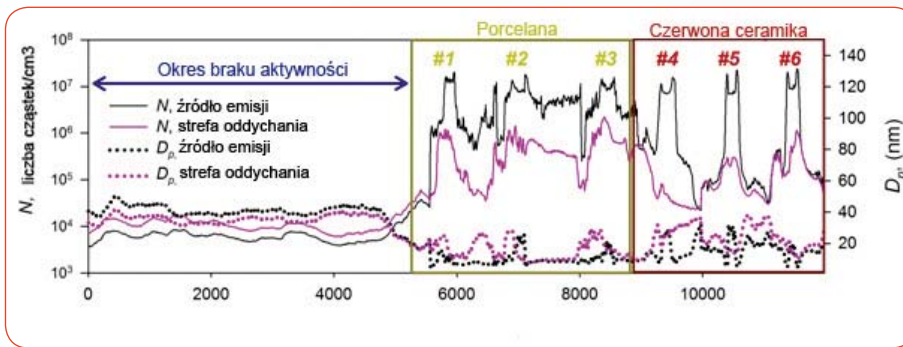
rozwija się sytuacja na rynku płytek ceramicznych, który w ostatnich latach zdecydowanie unowocześnił produkcję. Przedsiębiorstwa produkujące w Polsce porcelanę i ceramikę, zatrudniały w 2010 r. (w pierwszych trzech kwartałach) 96,8 tys. pracowników.

Celem badań, przeprowadzonych przez autorów artykułu, w ramach projektu HEXA-COMM (FP7-PEOPLE-2012-ITN nr 315760), było monitorowanie oraz scharakteryzowanie narażenia pracowników na emisję ultradrobnych oraz nanocząstek (o średnicy <100 nm), w momencie gdy może dojść do ich uwolnienia podczas wymienianych wcześniej procesów.

W tym celu, w laboratorium badawczym w Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA) w Saragossie w Hiszpanii oznaczano liczbę cząstek o znanej wielkości frakcyjnej, masie i średnicy – jednocześnie u źródła emisji, w strefie oddychania pracownika i w powietrzu na zewnątrz. Pomiary prowadzono w czasie rzeczywistym, za pomocą przyrządów

* Oryginalna wersja artykułu, przesłana do redakcji w języku angielskim (Author's copy) zostanie opublikowana w wersji cyfrowej, na stronie internetowej www.ciop.pl

* Original English version of the article (a so called Author's copy) will be published digitally at www.ciop.pl webpage.



Rys. 1. Szeregi czasowe stężenia liczby cząstek i wielkość cząstek (zakres 10-140 nm) mierzone jednocześnie przy źródle emisji i w strefie oddychania

Fig. 1. Time series of particle number concentrations and particle size (range of 10-700 nm) measured simultaneously at emission source and breathing zone

Tabela 1. Odchylenia średnie i standardowe (±σ w nawiasach) PM zmierzone w strefie oddychania podczas spiekania płytek (z materiałów 1-6), [11]

Table 1. Average and standard deviations (±σ in parenthesis) PM measured at breathing zone during tile sintering (from materials #1 to #6) and background concentrations [11]

Materiał/nr	PM ₁ (µg/m³)	PM _{2,5} (µg/m³)	PM ₁₀ (µg/m³)
1 – porcelana surowa	6,1 (0,7)	7,3 (0,7)	13,2 (0,8)
2 – porcelana z frytą powlekana	5,9 (0,4)	7,0 (0,4)	12,5 (0,7)
3 – porcelana z frytą i powłoką dekoracyjną	8,2 (2,0)	10,7 (2,0)	17,0 (2,0)
4 – glina surowa czerwona	6,5 (0,6)	8,0 (0,6)	13,8 (0,7)
5 – glina czerwona z frytą powlekana	7,3 (1,0)	9,3 (1,0)	15,7 (1,1)
6 – glina czerwona z frytą i powłoką dekoracyjną	7,7 (1,5)	10,0 (1,5)	16,3 (1,5)
Znaczenie emisji*	5,6	6,5	11,7

* Obliczone na podstawie równania 1.

pozwalających na wykonanie ich w zakresie wielkości cząstek od 5 nm do 20 µm.

Dodatkowo zebrano próbki do chemicznej i morfologicznej charakterystyki cząstek (ICP-AES, ICP-MS, TEM, EDX). Wybrano sześć rodzajów płytek najczęściej używanych w przemyśle ceramicznym: 1 – z porcelany surowej, 2 – z porcelany powlekanej z frytą, 3 – z porcelany z frytą i powłoką dekoracyjną, 4 – z surowej gliny w kolorze czerwonym, 5 – z gliny w kolorze czerwonym powlekanej z frytą oraz 6 – z gliny w kolorze czerwonym z frytą i powłoką dekoracyjną.

Proces spiekania laserowego płytek przeprowadzono w sposób pilotażowy (piec oporowy o długości 3 m), wykorzystując metodę topienia „in situ”¹. Zastosowano w niej laser falowodowo-szczelinowy CO₂ 350 W typu SLAB o wysokiej mocy, emitujący falę o długości 10,6 µm i wyposażony w optyczny system kierowania wiązki.

Płytki były wprowadzane do pieca o stałej prędkości (1500 mm h⁻¹) w kierunku prostopadłym do ogniska lasera, a następnie stopniowo ogrzewane zewnętrznie do temperatury: do 1195 °C w przypadku płytek porcelanowych oraz do 1115 °C w przypadku płytek ceramicznych w kolorze czerwonym. Po osiągnięciu przez nie odpowiedniej temperatury szczytowej, uruchamiano wiązkę laserową, którą

kierowano za pomocą optycznego układu sterowania, który przekształcał ją z przekroju okrągłego w linię o grubości 1 mm i zmiennej szerokości (w tym przypadku ustawiona była na 170 mm) [1,9].

W procesie ablacji laserowej używano wspomnianego lasera falowodowo-szczelinowego CO₂ w trybie impulsowym (tzw. ablacja indukowana laserowo), umożliwiającym usuwanie ścieranego materiału poprzez jego odparowywanie [2,10]. Emisje cząstek podczas ablacji laserowej oceniano tylko w odniesieniu do jednego rodzaju materiału (porcelany surowej).

Narażenie pracowników podczas spiekania laserowego

Na rys. 1. przedstawiono wielkość cząstek (D_p) oraz szeregi czasowe ich stężenia liczbowego, mierzone przy źródle emisji w strefie oddychania, w odniesieniu do każdego materiału.

Jak pokazano na rys. 1., każdą z płytek poddawano obróbce cieplnej i w tym czasie zarejestrowano znaczne emisje ultradrobnych i nanocząstek, dochodzące do 2,4 x 10⁷ cząstek/cm³ o średniej średnicy 18 nm u źródła emisji. Wykazano zatem, że poziom ekspozycji w środowisku pracy na ultra- i nanocząstki podczas obróbki materiałów ceramicznych wyniósł > 10⁵ cząstek/cm³ i był silnie powiązany z mechanizmami emisji.

Wyjaśnienia przyczyn takiej sytuacji dostarcza m.in. lektura artykułu Fonseca i in. [11], w którym autorzy dowodzili, że emisje cząstek w tego rodzaju sytuacjach są powiązane ze składem chemicznym płytek surowych i dwoma rodzajami procesów podczas obróbki cieplnej, niezależnie od zastosowania lasera: a) emisjami indukowanymi termicznie podczas topienia powierzchni płytek; b) tworzeniem się nowych cząstek o średnicy < 30 nm z emisji gazowych wskutek enukleacji [11].

Zgodnie z metodą opisaną przez Asbacha i in. [12], stężenie cząstek w powietrzu środowiska pracy, uwalnianych w trakcie procesów produkcyjnych, należy uznać za ważne statystycznie. Dzieje się tak, ponieważ średnie stężenie cząstek w powietrzu środowiska pracy jest zawsze wyższe niż stężenia tła (BG) powiększone o trzykrotność odchylenia standardowego stężenia tła (3,9 cząstek/cm³ dla cząstek w zakresie 10-700 nm):

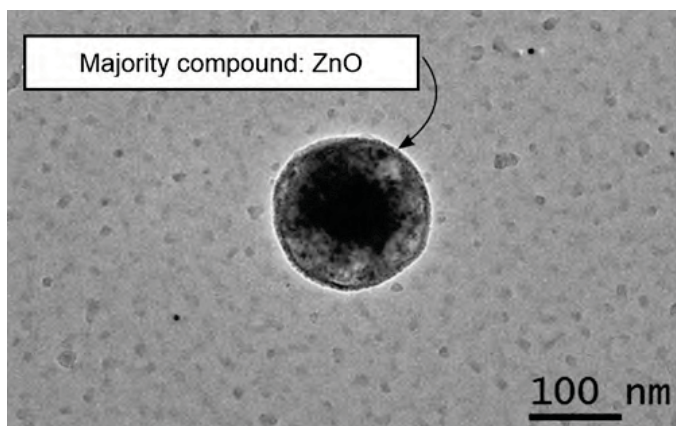
$$\begin{aligned} & \text{Znaczna emisja} > \text{BG} + 3 \sigma_{\text{tlo}} \\ \Leftrightarrow & \text{Znaczna emisja} > 1,3 \times 10^4 + 2,6 \times 10^4 \\ & \text{cząstek na cm}^3 \quad (1) \end{aligned}$$

Przeciętny poziom ekspozycji na ultradrobne i nanocząstki był wyższy podczas spiekania porcelany (5,5 x 10⁵ cząstek/cm³) niż podczas spiekania płytek z gliny w kolorze czerwonym (1,5 x 10⁵ cząstek/cm³). Nanocząstki wytworzone podczas spiekania porcelany w strefie oddychania były mniejsze (16 nm) niż podczas spiekania płytek z gliny w kolorze czerwonym (24 nm). Informacja ta jest szczególnie istotna dla przemysłu produkcji płytek, zważywszy na fakt, że obecnie popyt na płytki porcelanowe na światowym rynku ceramicznym rośnie.

Narażenie pracowników na stężenie masowe cząstek było podobne do ich stężenia ilościowego (tabela 1.) i należy je również uznać za narażenie na statystycznie znaczącym poziomie (równanie 1; Emisja > BG + 3 σ_{tlo}). Przeciętnie spiekanie płytek powodowało wzrost stężenia masowego cząstek w stosunku do powietrza tła o współczynnik 1,3 dla PM₁, 1,5 dla PM_{2,5} i 1,4 w odniesieniu do PM₁₀. Stosunki te zmieniały się jednak w zależności od składu płytek. Na przykład PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀ w przypadku porcelany surowej (materiał nr 1) wynosiły odpowiednio 1,2, 1,2, 1,2 razy stężenie tła, a w odniesieniu do porcelany z frytą i powłoką dekoracyjną (materiał nr 3) wskaźniki te wynosiły, odpowiednio, 1,5, 1,8 i 1,6, wykazując wyższą emisję cząstek grubych. W przypadku pozostałych materiałów zaobserwowano wyższe emisje cząstek submikronowych.

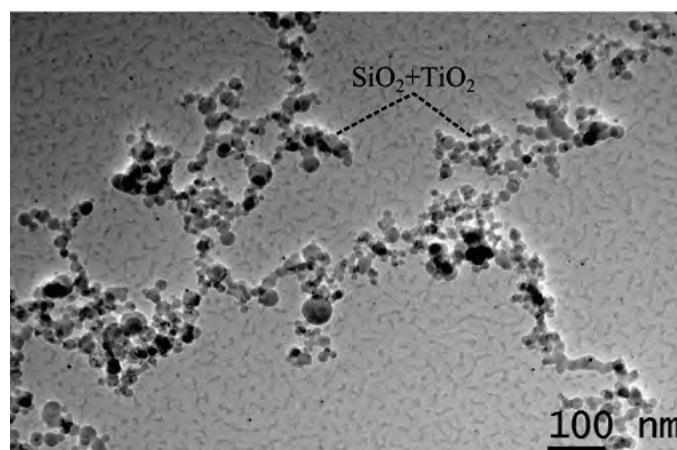
Ponadto stężenia masowe PM_{0,25-10}, PM_{0,25-25} i PM_{2,5-10} zebrane w powietrzu w pomieszczeniu (łącznie dla wszystkich procesów spiekania, od 1 do 6) wyniosły, odpowiednio: 43,1 µg/m³; 5,3 µg/m³ i 4,8 µg/m³. Stężenia te były odpowiednio 4,3; 1,3 i 1,7 razy wyższe niż te, które uzyskano w tym samym czasie na zewnątrz.

¹ In situ to w chemii metoda, w rezultacie zastosowania której występuje nietrwały produkt pośredni generowany celowo z trwałego, ale mniej reaktywnego substratu.



Rys. 2. Przykład obrazu nanocząstki zebranej w powietrzu środowiska pracy z elektronowego mikroskopu transmisyjnego podczas spiekania porcelany powlekanej z frytą. Przedstawiono cząstkę określoną za pomocą spektroskopii rentgenowskiej z dyspersją energii (ang. majority compound: ZnO = związek większościowy ZnO), [11]

Fig. 2. Example of TEM image of nanoparticle collected in workplace air during sintering of porcelain with frit coated. Corresponding identified particles by EDX are shown in each figure [11]



Rys. 3. Obrazy z elektronowego mikroskopu transmisyjnego przedstawiające nanocząstki zgromadzone w powietrzu wewnątrz pomieszczeń podczas ablacji porcelany surowej. Przedstawiono odnośne cząstki, określone za pomocą elektronowego mikroskopu transmisyjnego / spektroskopii rentgenowskiej z dyspersją energii [11]

Fig. 3. TEM images of nanoparticles collected in indoor air during ablation of raw porcelain. Corresponding identified particles by TEM/EDX are shown in each figure [11]

W analogicznych badaniach Fonseki [11] oraz innych autorów [13], poświęconych m.in. mechanizmom powstawania i emisji ultradrobnych i nanocząstek podczas obróbki laserowej materiałów ceramicznych, potwierdzono wpływ głównych źródeł wewnętrznych, czyli procesów spiekania, na powstawanie głównie drobnych cząstek. Średnice cząstek identyfikowanych metali, takich jak: Zn, Pb, Cu, Cr, As i Ti, wynosiły < 250 nm. Co więcej, obrazy z elektronowego mikroskopu transmisyjnego wykazały w powietrzu środowiska pracy drobne kuliste cząstki, pochodzące z procesów topienia płytek. Analiza chemiczna wykonana za pomocą spektroskopii rentgenowskiej z dyspersją energii wykazała, że cząstki ultradrobne zawierały ślady Zn, Cr i Fe z powodu potencjalnego wykorzystania ich w substancjach kryjących i pigmentowych, stosowanych do pokrywania płytek ceramicznych (rys. 2.).

Do oceny narażenia na ultra- i nanocząstki, uwalniane w badanych procesach, wykorzystano wartości referencyjne (zalecane) dopuszczalnych granic narażenia w odniesieniu do nanomateriałów (NRV), opracowane przez Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung [14]. Zgodnie z tym opracowaniem, wobec cząstek ziarnistych, trwałych w środowisku i nanowłókien w zakresie 1-100 nm i gęstości >6000 kg/m³, takich jak Al₂O₃, SiO₂, TiN, TiO₂, ZnO, sadza, nanoglinki, C₆₀, dendrymery, nanowłókna polistyrenu, zaproponowano wartość średnią ważoną stężenia, odniesioną do 8-godzinnej zmiany roboczej (TWA-8h), wynoszącą 40 000 cząstek/cm³.

W tym badaniu analizowano narażenie równoważne pracowników w czasie 7-godzinnej zmiany roboczej podczas spiekania i 1-godzinnej zmiany roboczej w okresie braku aktywności. W związku z tym narażenie pra-

Tabela 2. Średnie stężenie cząstek i odpowiadające mu odchylenie standardowe (±σ_g) w trakcie procesu ablacji i w powietrzu tła

Table 2. Mean particle concentrations and corresponding standard deviation (±σ_g) during the ablation process and background air

Materiał	Dp (nm)	N _{10-700nm} (cząstek/cm ³)	PM ₁ (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
Ablacja	69	2,4 x 10 ⁶ ± 1,6 x 10 ⁶	54 ± 29	90 ± 50	114 ± 60
Tłó*	34	1,3 x 10 ⁴ ± 8,6 x 10 ³	5,3 ± 0,1	5,9 ± 0,2	10,8 ± 0,3

* Odpowiednio do okresu braku aktywności.

cowników na 8-godzinnej zmianie roboczej obliczono w następujący sposób:

$$\begin{aligned} \text{Narażenie pracownika} &= \frac{\sum C_i t_i}{\sum t_i} = \\ &= \frac{C_1 t_1 + C_2 t_2}{8} - BG \quad (2) \end{aligned}$$

gdzie

C_i jest stężeniem w dowolnym okresie t

∑_iⁿ t_i jest czasem trwania zmiany roboczej uznanej za 8-godzinną.

Porównując poziomy narażenia na stężenia ultradrobnych i nanocząstek w strefie oddychania pracowników w okresie aktywności, w tym badaniu przy NRV, można stwierdzić, że pracownicy byłiby narażeni na stężenia powyżej progu NRV, ponieważ w ich przypadku wartość średnia ważona stężenia, odniesiona do 8 godzin pracy (TWA), wyniosłaby 2,8 x 10⁵ cząstek/cm³ (wartość obliczona na podstawie równania 2.).

Pod względem masy obecne przepisy (ACGIH) określają, że najwyższe dopuszczalne stężenie pyłów obojętnych respirabilnych (TLV) w stosunku do wartości średniego ważonego stężenia, odniesione do 8 godzin pracy (8-godzinne TWA), wynosi 3 mg/m³ [15] w przypadku frakcji respirabilnej ogółem, która nie zostałaby przekroczona w warunkach spiekania, przyjmując, że PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀ w odniesieniu do 8-godzinne TWA wynoszą odpowiednio: 1,4; 2,3 i 3,3 µg/m³.

Narażenie pracowników podczas ablacji płytek

Korzystając z przedstawionej strategii pomiaru i interpretacji danych, w tabeli 2. zestawiono wyniki pomiarów cząstek podczas ablacji płytek z porcelany surowej w strefie oddychania.

Wyniki przedstawione w tabeli 2. wskazują, że narażenie na cząstki powstające podczas procesu ablacji było wyższe pod względem masy (PM₁ = 54; PM_{2,5} = 90 i PM₁₀ = 114 µg/m³) i stężenia liczby cząstek (2,4 x 10⁶ cząstek/cm³) niż podczas spiekania płytek. Te wyniki dowodzą, że ultradrobne i nanocząstki powstawały i były emitowane do powietrza w środowisku pracy podczas procesu ablacji na poziomie istotnym statystycznie (> BG + 3 σ_{T0}; [12]). Ponadto wielkość tych cząstek była większa: te w zakresie 10-700 nm charakteryzowały się przeciętną średnicą 69 nm. Spodziewano się takiego scenariusza, ponieważ w przeciwieństwie do procesu spiekania, ablacja jest procesem mechanicznym, w którym grawerowanie laserowe powoduje przemiany fazowe, prowadząc do katastrofalnego rozpadu materiału [2] i przyczyniając się do powstawania emisji masowej cząstek.

Agregaty cząstek sferycznych w zakresie wielkości nano- stwierdzono za pomocą analizy z wykorzystaniem elektronowego mi-



Znajdziesz nas w Internecie: www.ciop.pl, e-mail: bpredakcja@ciop.pl

kroskopu transmisyjnego (rys. 3.). Analiza chemiczna za jego pomocą oraz spektroskopii rentgenowskiej z dyspersją energii wykazała, że głównym składnikiem nieorganicznym emisji jest tlenek krzemu (SiO_2). Ponadto w strefie oddychania stwierdzono stężenia śladowe Ti, Cr, Fe, P i Ca w innych składnikach, pełniących rolę topników, kryjącą lub pigmentów.

Podobnie jak w przypadku opisanego wcześniej spiekania, również w rezultacie procesu ablacji powstają emisje cząstek. Ze względu na poziomy ich stężenie, narażenia na nie są niższe niż najwyższe dopuszczalne stężenie, wynoszące – zgodnie z [15] – 3 mg/m^3 . Biorąc zatem pod uwagę krótki czas trwania tej czynności (20 min), nie można obliczyć wartości średnioważonych w przeliczeniu na okres odniesienia.

Podsumowanie

Wyniki opisanego w artykule badania potwierdzają przypuszczenia, że cząstki w zakresie wielkości poniżej 100 nm zostały uwolnione do powietrza w środowisku pracy. Świadczy to o ryzyku narażenia zawodowego na nie w przemyśle ceramicznym, zwłaszcza w odniesieniu do procesów, przy których wykorzystuje się laser o wysokiej energii. Wskazane byłoby w takich przypadkach wprowadzenie działań zapobiegawczych i ochronnych (np. zainstalowanie odciągów pyłów), w celu zmniejszenia narażenia pracowników na zdarzenia, podczas których uwalniane są cząstki w stężeniach przekraczających dopuszczalne wartości referencyjne.

BIBLIOGRAFIA

- [1] de Francisco I., Lennikov V.V., Bea J.A., Vegas A., Carda J.B., de la Fuente G.F. (2011). In-situ laser synthesis of rare earth aluminate coatings in the system Ln-Al-O (Ln = Y, Gd). "Sol State Sci" 13(9), 1813-1819. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2011.07.013>
- [2] Lahoz R., de la Fuente G.F., Pedra J.M., Carda J.B. (2011). Laser Engraving of Ceramic Tiles. "Int J Appl Ceram Technol." 8(5), 1208-1217. doi: [10.1111/j.1744-7402.2010.02566.x](http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7402.2010.02566.x)
- [3] Rubahn H.-G. (1999). "Laser Applications in Surface Science and Technology". New York: John Wiley & Sons
- [4] Hirtle B., Teschke K., van Netten C., Brauer M. (1998). Kiln emissions and potters' exposures. [Research Support, Non-U S Gov't]. "Am Ind Hyg Assoc J" 59(10), 706-714
- [5] Monfort E., García-Ten J., Celades I., Gazulla M.F., Gomar S. (2008). Evolution of fluorine emissions during the fast firing of ceramic tile. "Appl Clay Sci", 38(3-4), 250-258. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2007.03.001>
- [6] Evans D.E., Ku B.K., Birch M.E., Dunn K.H. (2010). Aerosol Monitoring during Carbon Nanofiber Production: Mobile Direct-Reading Sampling. "Annals of Occupational Hygiene" 54(5), 514-531. doi: [10.1093/annhyg/meq015](http://dx.doi.org/10.1093/annhyg/meq015)
- [7] Van Broekhuizen P. (2012). *Nano Matters: Building Blocks for a Precautionary Approach*. PhD thesis. Available at: www.ivam.uva.nl/?nanomatters
- [8] Voliotis A., Bezantakos S., Giamarelou M., Valenti M., Kumar P., Biskos G. (2014). Nanoparticle emissions from traditional pottery manufacturing. [Research Support, Non-U S Gov't]. "Environ Sci Process Impacts" 16(6), 1489-1494
- [9] Estepa C., Fuente G.F.d.l. (2006). P 200600560
- [10] Bäuerle D. (1996). *Laser Processing and Chemistry*: Springer-Verlag, Berlin
- [11] Fonseca A.S., Viana M., Querol X., Moreno N., de Francisco I., Estepa C., de la Fuente G.F. Ultrafine and nanoparticle formation and emission mechanisms during laser processing of ceramic materials. "J Aerosol Sci" 88 (2015) 48-57 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.05.013>
- [12] Asbach C., Kuhlbusch T., Kaminski H., Stahlmecke B., Plitzko S., Götz U., Voetz M., Kiesling H.J., Dahmann D. (2012). NanoGEM Standard Operation Procedures for assessing exposure to nanomaterials, following a tiered approach
- [13] Kumar P., Fennell P., Britter R. (2008). Effect of wind direction and speed on the dispersion of nucleation and accumulation mode particles in an urban street canyon. "Science of The Total Environment" 402(1), 82-94. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.04.032>
- [14] IFA. (2009). Technical Information – Nanoparticles at the workplace: <http://www.dguv.de/ifa/Fachinfos/Nanopartikel-am-Arbeitsplatz/index-2.jsp>
- [15] ACGIH. (2013). Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. American Conference of Governmental Industrial Hygienists

Podziękowania

Ta praca uzyskała wsparcie w postaci grantu z siódmego programu ramowego Wspólnoty Europejskiej (FP7-PEOPLE-2012-ITN) nr 315.760 (projekt HEXACOMM). Dodatkowo wsparcie pochodziło z projektów LIFE: AIRUSE (LIFE11 ENV/ES/584), CERAMGLASS (LIFE11 ENV/ES/560) i LASERFIRING (LIFE09 ENV/ES/435).