

BADANIA SKUTECZNOŚCI URZĄDZEŃ DO ZMNIEJSZANIA EMISJI CZĄSTEK STAŁYCH Z UKŁADU HAMULCOWEGO SAMOCHODU W WARUNKACH SYMULUJĄCYCH RZECZYWISTE UŻYTKOWANIE POJAZDU

ANNA KIERACIŃSKA¹, JACEK BIEDRZYCKI², ZDZISŁAW CHŁOPEK³, ANDRZEJ JAKUBOWSKI⁴,
JAKUB LASOCKI⁵, PIOTR WÓJCIK⁶

Przemysłowy Instytut Motoryzacji (PIMOT), Politechnika Warszawska

Streszczenie

Urządzenia do zmniejszania emisji cząstek stałych z tarczowych i bębnowych układów hamulcowych samochodu zostały pozytywnie przebadane na stanowiskach laboratoryjnych. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań opracowanych urządzeń zamontowanych w samo-chodzie osobowym. Badania przeprowadzono na stanowisku hamowni podwoziowej w warunkach specjalnych testów jezdnych. Stwierdzono dobrą skuteczność urządzenia – zmniejszenie emisji cząstek stałych o około (50 ÷ 70) %. Stwierdzono, że pyły z układu hamulcowego zawierają ziarna o bardzo małych wymiarach, a w skład cząstek wchodzi m.in. metale ciężkie. W wyniku badań w czasie użytkowania pojazdu w ruchu w miejskim uzyskano potwierdzenie skuteczności opracowanych urządzeń, jednak ze względu na problemy konstrukcyjne zabudowy urządzeń w wersji autonomicznej wyniki nie były tak pozytywne jak w przypadku wyników z hamowni podwoziowej. Wnioski z badań trakcyjnych są wykorzystywane do modyfikacji urządzeń do zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego samochodu.

Słowa kluczowe: emisja spalin, emisja cząstek stałych, układy hamulcowe, pojazdy samochodowe

1. Wprowadzenie

Spośród wielu zagrożeń dla środowiska, pochodzących zarówno ze źródeł naturalnych, jak i cywilizacyjnych, jednym z najgroźniejszych jest pył [1, 3, 10, 13, 14, 17, 19, 24, 25]. Duża

¹ Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warsaw, Poland, e-mail: a.kieracinska@pimot.eu, tel.: 22 777 70 73

² Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warsaw, Poland, e-mail: j.biedrzycki@pimot.eu, tel.: 22 777 71 91

³ Politechnika Warszawska, ul. Narbutta 84, 02-524 Warsaw, Poland, e-mail: zchlopek@simr.pw.edu.pl, tel.: 22 849 03 14

⁴ Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warsaw, Poland, e-mail: a.jakubowski@pimot.eu, tel.: 22 777 71 86

⁵ Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warsaw, Poland, e-mail: j.lasocki@pimot.eu, tel.: 22 777 71 91

⁶ Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warsaw, Poland, e-mail: p.wojcik@pimot.eu, tel.: 22 777 71 91

imisja⁷ pyłów jest najczęściej stwierdzanym przekroczeniem dopuszczalnych limitów emisji zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym [3, 13, 14, 19, 24, 25]. Szkodliwość pyłów zwartych w powietrzu dla organizmów żywych jest powszechnie znana. Już w 1524 r. została napisana przez Georgiusa Agricolę praca „De re metalica” [1], zawierająca informacje o szkodliwym oddziaływaniu pyłów na zdrowie ludzi.

Pył jest definiowany jako faza rozproszona układu dwufazowego, składającego się z ciała stałego – małych cząstek stałych, zawieszonych w gazowej fazie rozpraszającej – powietrzu [11, 12, 16]. Ponieważ cząstki pyłów mają w ogólności kształt inny niż kulisty, istnieje konieczność umownej oceny ich wielkości. Istnieje wiele kryteriów wyznaczania wymiarów zastępczych cząstek pyłów. Zazwyczaj sposób wyznaczania wymiaru zastępczego cząstek określają stosowne przepisy [2, 4, 11, 12, 16, 17, 21–23].

W zależności od umownych wymiarów cząstek pyłu wyróżnia się [9, 10–12, 16, 17, 20, 22, 23]:

- całkowity pył zawieszony TSP (total suspended particles) – o umownym wymiarze cząstek mniejszym niż 300 μm ,
- pył drobnoziarnisty – o umownym wymiarze cząstek mniejszym niż 75 μm , osiadających pod wpływem swojego ciężaru, ale mogących przez pewien czas pozostawać w zawieszeniu,
- pył drobny PM10 – o umownym wymiarze cząstek mniejszym niż 10 μm ,
- pył drobny PM2.5 – o umownym wymiarze cząstek mniejszym niż 2,5 μm ,
- pył PM1 – o umownym wymiarze cząstek mniejszym niż 1 μm ,
- nanocząstki⁸ – o umownym wymiarze cząstek mniejszym niż 100 nm [2, 20] (pyły niewidzialne).

W specyficzny sposób definiuje się cząstki stałe PM10 i PM2.5. Cząstki stałe PM10 to pył przechodzący przez otwór sortujący, zdefiniowany w metodzie poboru próbek i badania cząstek PM10 wg EN 12341 przy 50% granicy sprawności dla średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 10 μm . Cząstki stałe PM2.5 są określane jako pył przechodzący przez otwór sortujący, zdefiniowany w metodzie poboru próbek i badania cząstek PM2.5 wg EN 14907 przy 50% granicy sprawności dla średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 2,5 μm . Analogicznie definiuje się inne frakcje wymiarowe cząstek stałych, np. cząstki stałe PM1.

Ze względu na oddziaływanie na układ oddechowy ludzi wyróżnia się jeszcze tzw. pył respirabilny [22, 23]. Jest to zbiór cząstek przechodzących przez selektor wstępny o charakterystyce przepuszczalności według wymiarów cząstek opisanej logarytmiczno-normalną funkcją prawdopodobieństwa ze średnią wartością średnicy aerodynamicznej ($3,5 \pm 0,3$) μm i z odchyleniem standardowym ($1,5 \pm 0,1$) μm [22, 23].

Według normy EN-481 [10] zdefiniowane są dwie frakcje pyłu:

- frakcja wdychana (przedostaje się przez usta i nos),
- frakcja płucna (pył docierający do oskrzeli).

⁷ Imisja jest to stężenie zanieczyszczenia rozproszonego w powietrzu atmosferycznym mierzone na wysokości 1,5 m nad powierzchnią Ziemi [18].

⁸ Istnieją pewne różnice w definiowaniu pojęcia nanocząstek. Wynika to w znacznej mierze ze spontaniczności wprowadzania tego pojęcia zarówno w nauce, jak i w działalności pozanaukowej, a także z powodu pewnej skłonności do przyswajania w ostatnich latach przez naukę komercyjnych określeń. Spotyka się zatem jako górną granicę określenia nanocząstek również wartość 50 μm , a nawet 1 nm [2, 20].

Fracja wdychana zawiera cząstki o wymiarach mniejszych niż 100 μm . Cząstki o wymiarach większych niż 30 μm są zatrzymywane w górnym odcinku dróg oddechowych (nos, jama istna, gardło, krtań), a następnie wydalane ze śluzem. Do środkowego odcinka dróg oddechowych (tchawica, oskrzela, oskrzeliki) przedostaje się frakcja płucna, której wymiar nie przekracza 20 μm . Cząstki te mogą się kumulować w górnych i środkowych odcinkach dróg oddechowych. Do obszaru wymiany gazowej (pęcherzyki płucne) dostają się cząstki o wymiarze mniejszym niż 7 μm . Stanowią one podstawową składową pyłu respirabilnego, który zalega dość długo, powodując zmiany chorobowe. Cząstki o wymiarach mniejszych od 2,5 μm dostają się nawet do najgłębszych partii płuc, gdzie są kumulowane. Pyły rozpuszczalne w cieczach biologicznych przenikają bezpośrednio do krwi.

Szkodliwość pyłów dla zdrowia ludzi i zwierząt zależy od wymiarów ziaren pyłów, ich składu chemicznego i mineralogicznego oraz od budowy fizycznej [3, 4, 13, 14, 17, 19, 24, 25].

Pyły drobne, a szczególnie pyły PM_{2.5}, powodują liczne choroby układu oddechowego, takie jak: astma, chroniczny bronchit, prowadzą także do osłabienia czynności płuc, przyczyniając się nawet do przedwczesnej śmierci. Istnieje wiele prac jednoznacznie potwierdzających, że zanieczyszczenie powietrza pyłami jest czynnikiem wzmagającym objawy przewlekłej obturacyjnej choroby płuc (POCHP) [19].

Do pyłów szczególnie szkodliwych dla zdrowia należą cząstki zawierające związki metali ciężkich (przede wszystkim arsenu, ołowiu, kadmu, niklu i rtęci), z których wiele ma właściwości mutagenne lub kancerogenne. Szczególnie toksyczne są również cząstki zawierające ciężkie węglowodory pierścieniowe, będące związkami kancerogennymi.

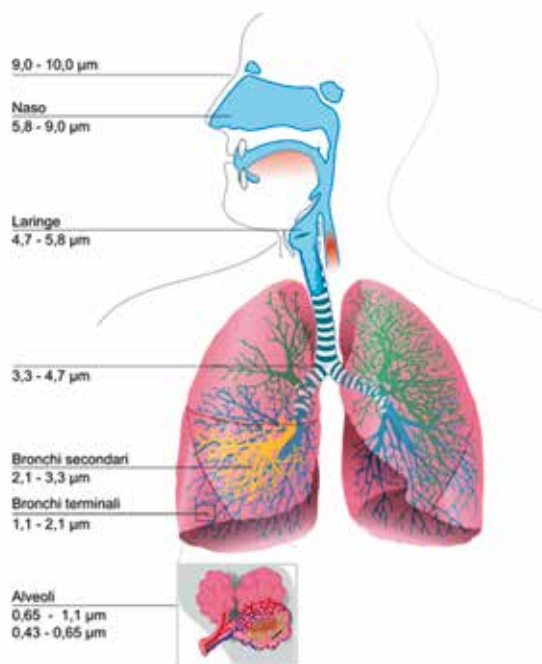
W zależności od wymiarów ziaren pyłów docierają one do różnych części układu oddechowego ludzi – rysunek 1.

Sposób oddziaływania pyłów na zdrowie ludzi można przedstawić w postaci udziałów depozycji pyłów zatrzymywanych przez różne części w zależności od średnic ziaren – rysunek 2.

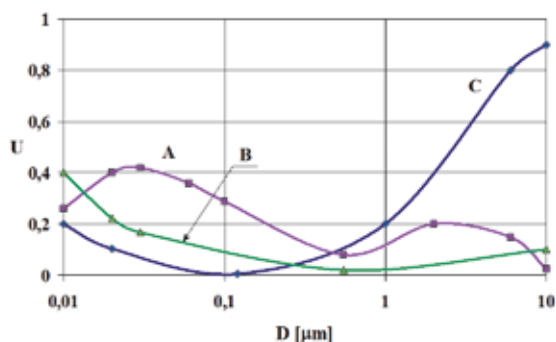
Pochodzenie pyłów może być zarówno naturalne, jak i cywilizacyjne (antropogenie) [9, 10, 18, 20, 24]. Podstawowymi naturalnymi źródłami pyłów są materiały osadowe, aerozole morskie, roślinne i zwierzęce, a przede wszystkim materiał pochodzący z wybuchów wulkanów i pożarów lasów [8, 9, 24]. Antropogenne źródła pyłów są związane praktycznie z całą działalnością cywilizacyjną, przede wszystkim procesów produkcyjnych, a szczególnie procesów spalania paliw (przede wszystkim paliw stałych), w tym z domowych palenisk. Znaczącym źródłem emisji cząstek stałych jest również transport.

Źródłami pyłów związanych z transportem samochodowym są [6, 9, 10]:

- silnik spalinowy emitujący cząstki stałe wraz ze spalinami,
- węzły trybologiczne w pojeździe,
- ogumienie kół jezdnych i materiał nawierzchni jezdnej, ścierane w wyniku współpracy,
- materiały innych części pojazdu, ulegających zużyciu,
- materiał wzniesany z nawierzchni jezdnej przez poruszające się po niej pojazdy.



Rys. 1. Obszary układu oddechowego człowieka narażone na przedostawanie się poszczególnych frakcji cząstek stałych [15]



Rys. 2. Rozkład średnic pyłów - D (udział depozycji - U), zatrzymywanych w różnych częściach układu oddechowego człowieka (na podstawie [24]):
A - płuca, B - tchawica i oskrzela, C - nosogardło

Motoryzacyjne pyły, pochodzące ze źródeł innych niż silniki spalinowe, mogą mieć znaczący udział w emisji cząstek stałych ze źródeł transportowych. Ocenia się, że – szczególnie w przypadku transportu ciężkiego – emisja frakcji pyłów ze źródeł innych niż silniki spalinowe może znacznie przekraczać emisję cząstek stałych zawartych w spalinach [3, 4]. Spośród par trybologicznych w samochodach szczególną rolę – ze względu na wytwarzanie pyłów – odgrywa układ hamulcowy. Pary trące w układzie hamulcowym są znaczącym

źródłem emisji pyłów w związku z zadaniem spełnianym przez układ hamulcowy w postaci rozpraszania energii kinetycznej pojazdu. Ocenia się, że przeciętny samochód zużywa rocznie około 0,5 kg materiału ciernego z układu hamulcowego [6, 7]. Dodatkowo jest wiadome, że pyły pochodzące z układów hamulcowych są bardzo drobne i zawierają substancje szczególnie szkodliwe dla zdrowia ludzi i zwierząt.

W związku z tym w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji podjęto prace nad zmniejszeniem emisji cząstek stałych z układów hamulcowych pojazdów samochodowych. Opracowano badawcze urządzenia do zmniejszania emisji cząstek stałych z układów zarówno tarczowych, jak i bębnowych [5–8]. Badania laboratoryjne opracowanych urządzeń, wykonane na stanowiskach w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji, dały bardzo obiecujące wyniki. Szczególnie w przypadku hamulców tarczowych uzyskano współczynnik skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego dochodzący do 0,8 [6, 7].

W ramach projektu rozwojowego Narodowego Centrum Badań i Rozwoju nr 10–0050–10/2010 pt. „Opracowanie urządzeń do ograniczenia emisji pyłów z tarczowych i bębnowych układów hamulcowych pojazdów samochodowych”, realizowanego w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji, podjęto się zadania opracowania i przebadania urządzeń do zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego zabudowanych w samochodach. W niniejszej pracy przedstawiono niektóre wyniki badań przeprowadzonych w ramach realizowanego przedsięwzięcia.

2. Badania urządzenia do zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego samochodu osobowego na hamowni podwoziowej i w eksploatacji nadzorowanej

2.1. Urządzenie do zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego w wersji zamontowanej w samochodzie

Układ do ograniczania emisji pyłów zamontowano w samochodzie Citroen Berlingo wyprodukowanym w 2000 r. z silnikiem o zapłonie samoczynnym o objętości skokowej 1868 cm³. Samochód jest wyposażony w tarczowy układ hamulcowy kół osi przedniej i bębnowy układ hamulcowy kół osi tylnej.

W fabrycznym układzie hamulcowym samochodu wymieniono następujące elementy:

- w przypadku hamulców tarczowych: tarcze, jarzma zacisków, zaciski i klocki hamulcowe,
- w przypadku hamulców bębnowych: bębny, szczęki hamulcowe i sprężyny samoregulacji.

Elementy ssące układu do ograniczania emisji pyłów z tarczowego układu hamulcowego samochodu zamontowano na odpowiednio wyprofilowanych uchwytach przykręconych do zwrotnic kół w miejscach mocowania jarzm zacisków. Ustalono położenie ssawek względem tarcz hamulcowych, pozostawiając między nimi szczeliny o szerokości 1 mm.

Ssawki połączono elastycznymi przewodami o średnicy 8 mm z filtrami zamocowanymi do eżektorów.

Przygotowany do badań hamulec tarczowy samochodu Citroen Berlingo z zainstalowanym układem do ograniczania emisji pyłów przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Hamulec tarczowy samochodu Citroen Berlingo z zabudowanym układem do ograniczania emisji pyłów

W celu zamontowania elementów ssących w bębnowym układzie hamulcowym dokonano modyfikacji szczęk hamulcowych i tylnych obudów hamulców bębnowych. Ze względu na konieczność zmniejszenia odległości między powierzchniami ssawek i wewnętrznymi powierzchniami bębnow, w celu uszczelnienia, na krawędzie ssawek naniesiono silikon odporny na działanie wysokich temperatur. W tylnych obudowach hamulców bębnowych wywiercono po dwa otwory, przez które poprowadzono metalowe przewody o średnicy 8 mm do elementów ssących znajdujących się na szczękach hamulcowych. Przewody odprowadzające pył z dwóch elementów ssących znajdujących się w jednym hamulcu bębnowym połączono ze sobą i za pomocą elastycznego przewodu poprowadzono do jednego filtra. Wszystkie otwory technologiczne wykonane na potrzeby zainstalowania układu ssącego uszczelniono za pomocą silikonu odpornego na działanie wysokich temperatur.

Na rysunku 4 przedstawiono hamulec bębnowy z zabudowanym układem do ograniczania emisji pyłów.

Do badań zamontowano w samochodzie przetworniki:

- ciśnienia w układzie hamulcowym – ADZ Nagano SML o zakresie pomiarowym (0 ÷ 25) MPa,
- podciśnienia w układzie pneumatycznym – ADZ Nagano SML o zakresie pomiarowym (-0,1 ÷ 0,3) MPa,
- prędkości obrotowej koła,



Rys. 4. Hamulec bębnowy samochodu Citroen Berlingo z zabudowanym układem do ograniczania emisji pyłów (kolorem czerwonym zaznaczono elementy ssące)

- temperatury tarcz hamulcowych i bębnow hamulcowych – Optris CSmicro o zakresie pomiarowym $(-20 \div 500)^{\circ}\text{C}$.

Czujniki połączone przewodami ze specjalnie opracowaną jednostką centralną, której zadaniem było rejestrowanie przebiegów mierzonych wielkości. W celu bieżącej weryfikacji wybranych parametrów pracy układu hamulcowego oraz układu do ograniczania emisji pyłów, jednostka centralna umożliwiała bezpośredni podgląd ich wartości na ekranie monitora.

2.2. Badania skuteczności urządzenia do zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego samochodu

Badania skuteczności urządzeń do zmniejszania emisji cząstek stałych z układów hamulcowych przeprowadzono na hamowni podwoziowej Schenk Komeg EMDY 48 z układem Horiba CRSD-7000 wspomagającym realizację testów jezdnych.

Ruch samochodu był symulowany w specjalnym teście jezdnym, umożliwiającym zapewnienie odpowiedniej intensywności hamowania oraz powtarzalności warunków prowadzanych badań. Napęd samochodu jest wymuszony ruchem rolki ze stałą prędkością 20 km/h, a nie silnikiem pojazdu. Zastosowano stałą częstotliwość hamowania: czas pojedynczego hamowania wynosi 5 s, a czas między kolejnymi hamowaniami 10 s. Przyjęto liczbę pojedynczych hamowań równą 240, w związku z czym czas trwania testu wynosi 3600 s, a droga przebywana przez samochód 20 km. Udział czasu hamowania w całkowitym czasie testu wynosi 0,33.

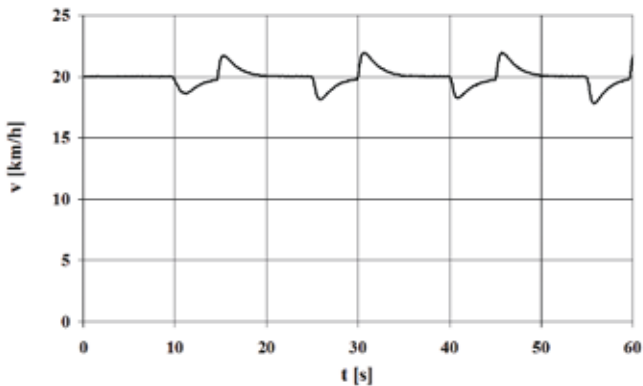
W początkowej fazie hamowania prędkość samochodu ulegała zmniejszeniu. W wyniku działania regulatora prędkości rolki hamowni podwoziowej, pomimo zachowania stałej siły

nacisku na pedał hamulca, wartość prędkości samochodu wzrastała do około 20 km/h. Po zwolnieniu hamulca prędkość gwałtownie zwiększała się, a następnie była ponownie korygowana przez regulator prędkości rolki.

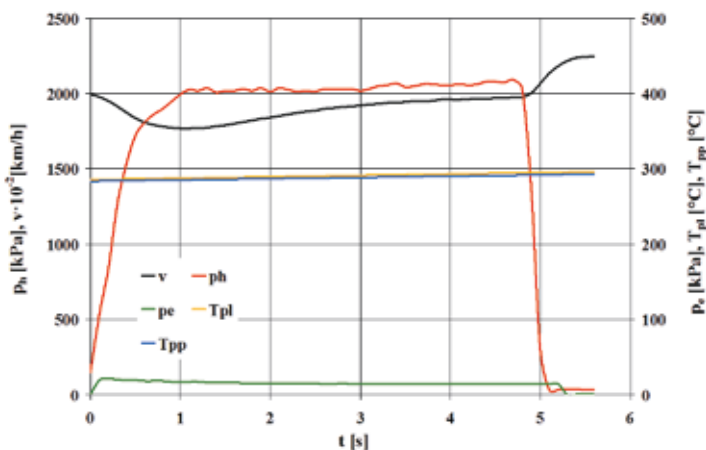
Na rysunku 5 przedstawiono fragment specjalnego testu do badania skuteczności urządzeń do ograniczania emisji cząstek stałych z układów hamulcowych samochodu osobowego.

W czasie wykonywania testów jezdnych rejestrowano przebiegi:

- ciśnienia w układzie hamulcowym,
- podciśnienia w układzie pneumatycznym,



Rys. 5. Schemat testu jezdnych do badań urządzeń do ograniczania emisji cząstek stałych z układów hamulcowych samochodu osobowego - przebieg prędkości - v



Rys. 6. Przykład przebiegów prędkości samochodu - v, ciśnienia w układzie hamulcowym - p_h , podciśnienia w układzie pneumatycznym - p_e oraz temperatur tarcz hamulców: lewej - T_{pi} i prawej - T_{pp} podczas hamowania samochodu w specjalnym teście jezdnych

- prędkości samochodu,
- temperatury tarcz lub bębnow hamulcowych.

Przykładowe przebiegi rejestrowanych wielkości, uzyskane podczas jednej realizacji hamowania z użyciem hamulców tarczowych, przedstawiono na rysunku 6. Podobne przebiegi otrzymano także dla hamulców bębnowych.

W czasie badań wykonano dla tarczowego i bębnowego układu hamulcowego po sześć serii pomiarów, które składały się z czterech cykli hamowań (pojedynczych realizacji specjalnego testu jezdnego).

Skuteczność działania urządzenia do zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego oceniano na podstawie współczynnika zmniejszania emisji cząstek stałych, który zdefiniowano w postaci wzoru:

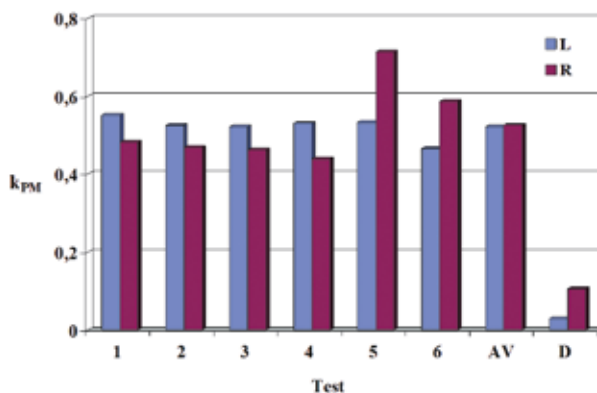
$$k_{PM} = 1 - \frac{m_k - m_f}{m_k}$$

gdzie:

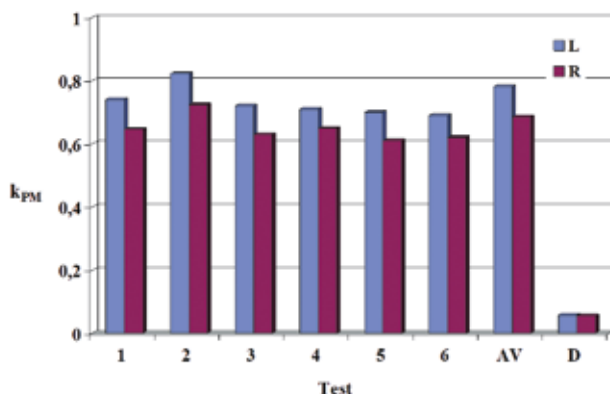
m_f – różnica masy filtra,

m_k – różnica masy klocka hamulcowego lub szczęki hamulcowej.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono współczynnik zmniejszania emisji cząstek stałych z układów hamulcowych samochodu w poszczególnych badaniach oraz wartość średnią i odchylenie standardowe zbioru wartości współczynnika.



Rys. 7. Współczynnik zmniejszania emisji cząstek stałych - k_{PM} z tarczowego układu hamulcowego samochodu w poszczególnych badaniach, AV - wartość średnia współczynnika oraz D - odchylenie standardowe współczynnika, L - lewa strona samochodu, R - prawa strona samochodu



Rys. 8. Współczynnik zmniejszania emisji cząstek stałych - k_{PM} z bębnowego układu hamulcowego samochodu w poszczególnych badaniach, AV - wartość średnia współczynnika oraz D - odchylenie standardowe współczynnika, L - lewa strona samochodu, R - prawa strona samochodu

Następnie wykonywano badania w czasie użytkowania pojazdu w ruchu w miejskim, charakteryzującym się dużą intensywnością hamowania. Badania te są cały czas kontynuowane. Na podstawie dotychczasowych wyników badań uzyskano potwierdzenie skuteczności opracowanych urządzeń, jednak ze względu na problemy konstrukcyjne zabudowy urządzeń w wersji autonomicznej wyniki nie były tak pozytywne jak w przypadku modyfikacji z hamowni podwozowej. Wnioski z badań trakcyjnych są wykorzystywane do modyfikacji urządzeń do zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego samochodu.

2.3. Badania mikrostruktury pyłów pochodzących z układu hamulcowego samochodu

Badania mikrostruktury pyłów pochodzących z układów hamulcowych przeprowadzono dla próbek z układu tarczowego i układu bębnowego.

Zakres badań obejmował wykonanie zdjęć za pomocą mikroskopu metalograficznego, analizę mikrostruktury próbek i wyznaczenie rozkładu wymiarów cząstek pyłów.

Próbki zainkludowano w żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem Z-1, ich powierzchnie zeszlifowano papierem ściernym o granulacji 100 ÷ 800, a następnie wypolerowano sukniem zwilżonym zawiesiną tlenku glinu o granulacji 0,1 μm w wodzie zdemineralizowanej. Próbki badano w stanie nietrawionym lub po trawieniu odczynnikami Mi1Fe wg PN-61/H-04503 (roztwór 5% kwasu azotowego HNO_3 w alkoholu etylowym), stosowanym do trawienia stopów żelaza.

Do badań wykorzystano mikroskop metalograficzny Neophot-2, wyposażony w kamerę, monitor i drukarkę termowizyjną. Powiększenia mikroskopu dobierano w zależności od wymiarów składników struktury badanych obiektów: od 76 do 2600.

W wyniku badań uzyskano:

- dla próbki z hamulców tarczowych – 20 zdjęć,
- dla próbki z hamulców bębnowych – 42 zdjęcia.

Zdjęcia poddano przetwarzaniu, dzięki czemu było możliwe wyznaczenie histogramów wymiarów ziaren badanych pyłów.

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowy przekrój przez aglomeraty pyłu z próbki z hamulca tarczowego (białe pola stanowią pory).

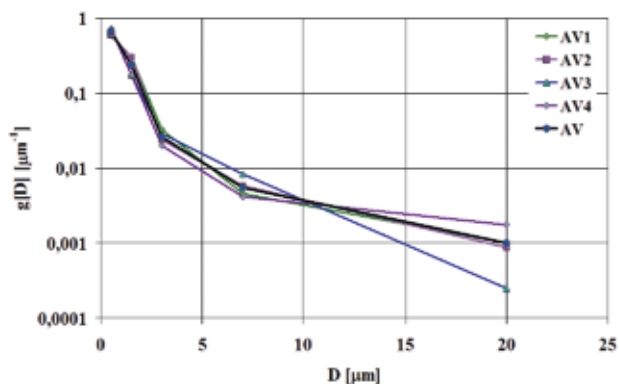


Rys. 9. Pył z próbki z hamulca tarczowego, obraz powiększony 76 razy (z prawej) i 910 razy (z lewej)

Stwierdzono, że pył ulega aglomeracji z powodu występowania ładunków elektrostatycznych, tworzących się w wyniku tarcia cząstek pyłu o siebie i o wewnętrzne ścianki węży z tworzywa sztucznego, doprowadzających pył ze ssawek do filtra. Zjawisko aglomeracji pyłu może też być spowodowane jego dużą higroskopijnością.

Spośród wielu możliwości w niniejszej pracy przyjęto jako umowny wymiar cząstki pyłu tzw. wymiar powierzchniowy, czyli średnicę zastępczą, będącą średnicą cząstki kulistej o takim samym polu powierzchni co badana cząstka [4, 21].

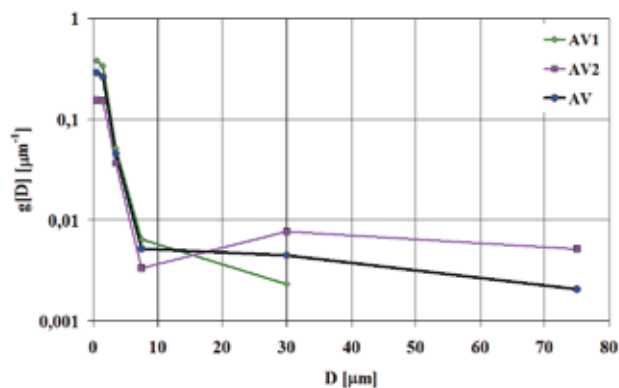
Na rysunku 10 przedstawiono gęstość prawdopodobieństwa średnicy zastępczej cząstek pyłów próbki pochodzącej z hamulca tarczowego: wartości średnie dla poszczególnych miejsc analizy AV1 – AV4 oraz wartość średnią dla całej próbki – AV.



Rys. 10. Gęstość prawdopodobieństwa średnicy zastępczej cząstek pyłów próbki z hamulca tarczowego: wartości średnie dla poszczególnych miejsc analizy AV1 – AV4 oraz wartość średnia dla próbki – AV

Jest charakterystyczna mała niepowtarzalność wyznaczonych charakterystyk gęstości prawdopodobieństwa średnicy zastępczej cząstek pyłów, zarówno dla poszczególnych miejsc analizy w każdej z próbek, jak i dla wartości średnich. W związku z tym można ocenić, że uzyskane wyniki są wiarygodne i rzetelnie charakteryzują badane właściwości ocenianych próbek pyłów.

Na rysunku 11 przedstawiono gęstość prawdopodobieństwa średnicy zastępczej cząstek pyłów próbki pochodzącej z hamulca bębnowego: wartości średnie dla poszczególnych miejsc analizy AV1 i AV2 oraz wartość średnią dla całej próbki – AV.



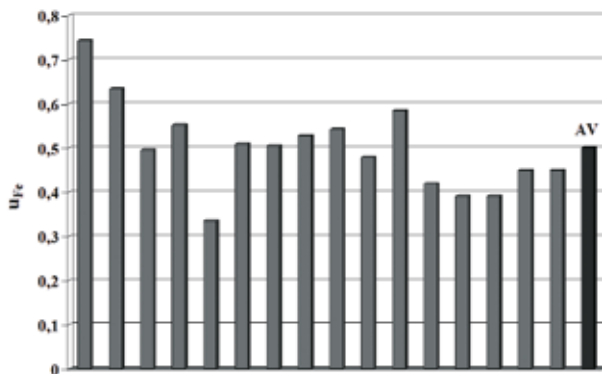
Rys. 11. Gęstość prawdopodobieństwa średnicy zastępczej cząstek pyłów próbki z hamulca bębnowego: wartości średnie dla poszczególnych miejsc analizy – AV1 i AV2 oraz wartość średnia dla całej próbki – AV

Z badań pyłów, przeprowadzonych w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji oraz w Państwowym Instytucie Geologicznym wynika, że próbki składały się głównie z cząstek zawierających żelazo na różnym stopniu utlenienia z domieszką baru, krzemu, glinu, wapnia i miedzi. Ponadto stwierdzono obecność: nitki wełny mineralnej, kawałków drutu stalowego, barytu (cząstki o wymiarach mniejszych od 20 μm), mosiądzu (liczne drobiny o wymiarach mniejszych od 10 μm), miedzi (pojedyncze ziarna o wymiarach nie większych niż 200 μm), ziaren antymonitu o wymiarach (10 ÷ 100) μm i blaszek węglowych (drobiny o wymiarach ok. 200 μm). Znaleziono również ziarna: srebra (o wymiarach nie większych niż 20 μm), molibdenu (o wymiarach nie większych niż 10 μm), tlenku magnezu (o wymiarach nie większych niż 10 μm) oraz hercynitu.

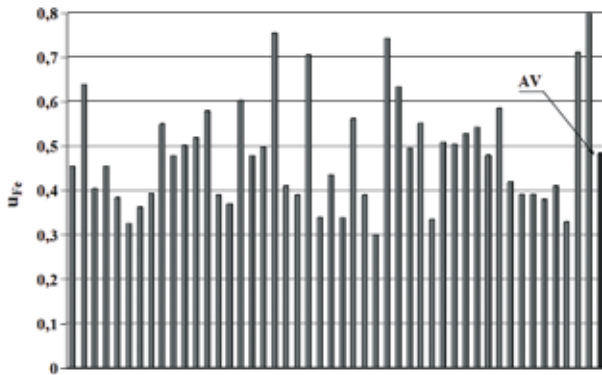
Pyły występujące w badanych próbkach miały różne formy:

- porowate, kuliste i nieregularnie zaokrąglone,
- drobno-kuliste,
- drobno-ostrokrawędziste.

Zawartość metali ciężkich w cząstkach stałych z układów hamulcowych powoduje, że są to pyły szczególnie szkodliwe dla zdrowia ludzi. Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono udział pola powierzchni przekroju ziaren żelaza w cząstkach stałych z układów hamulcowych.



Rys. 12. Udział pola powierzchni przekroju ziaren żelaza – u_{Fe} w cząstkach stałych z tarczowego układu hamulcowego: AV – wartość średnia



Rys. 13. Udział pola powierzchni przekroju ziaren żelaza - u_{Fe} w cząstkach stałych z bębnowego układu hamulcowego: AV - wartość średnia

Z wykresów tych wynika, że udział pola powierzchni przekroju ziaren żelaza w cząstkach stałych z układów hamulcowych wynosi średnio około 50%.

3. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wyników można sformułować następujące wnioski:

1. W wyniku przeprowadzonych badań opracowano oryginalną procedurę badawczą do oceny skuteczności urządzeń do zmniejszania emisji cząstek stałych z układów hamulcowych w warunkach symulujących ruch samochodów. Badania te przeprowadza się na hamowni podwoziowej w teście jezdnym o stałej prędkości z napędem samochodu rolką hamowni oraz z cyklami hamowań. Opracowana procedura umożliwiła obiektywną ocenę skuteczności urządzeń do zmniejszania emisji cząstek stałych z układów hamulcowych
2. W próbach, przeprowadzonych na stanowiskach badawczych, uzyskano współczynnik skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego dochodzący do 0,8. W badaniach na hamowni podwoziowej potwierdziły się właściwości opracowanego urządzenia - uzyskano współczynnik skuteczności zmniejszania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego $0,5 \div 0,7$.
3. Układ hamulcowy samochodu jest źródłem emisji cząstek stałych o właściwościach szczególnie groźnych dla zdrowia ludzi. Cząstki te zawierają metale ciężkie - w wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że udział pola powierzchni przekroju ziaren żelaza w cząstkach stałych z układów hamulcowych wynosi średnio około 50%. Ponadto wymiary charakterystyczne cząstek stałych z układu hamulcowego są w przeważającym stopniu mniejsze od $1 \mu m$ - potwierdzeniem tego stanu są wyznaczone gęstości prawdopodobieństwa uśrednionych średnic cząstek stałych.

4. Badania wykazały, że większość cząstek pyłu powstającego w czasie hamowania ma średnie wymiary od 0,1 μm do 0,2 μm .
5. Pył zgromadzony w filtrze składa się w większości z aglomeratów (grudki) wielu cząstek, co wyjaśnia zatrzymywanie w filtrze mniejszych cząstek niż to wynika z charakterystyki filtra.
6. Większość składników strukturalnych pary czarnej zostaje dokładnie rozdrobniona i zniekształcona w procesie hamowania (stąd przewaga cząstek o wymiarach mniejszych niż 2 μm). Niektóre drobne składniki okładziny czarnej wykruszają się w czasie pracy i przechodzą do pyłu w stanie praktycznie niezmienionym. Cząstki metalowe mogą ulegać skrośnemu utlenieniu w wysokiej temperaturze (szczególnie cząstki o najmniejszych wymiarach). Pozostałe składniki też ulegają przemianom, zwłaszcza że tarcza – sądząc po odbarwieniu – osiąga temperaturę ponad 300°C, natomiast temperatura na styku pary czarnej jest znacznie wyższa.

Zidentyfikowana struktura wymiarowa cząstek pyłów powstających w czasie hamowania potwierdza, jak znacznym zagrożeniem dla zdrowia ludzi są pyły pochodzące z układów hamulcowych samochodów. Cząstki te są składową pyłu respirabilnego, docierającego aż do pęcherzyków płucnych w dolnym odcinku dróg oddechowych. Może to prowadzić do poważnych chorób przede wszystkim układu oddechowego. Tak znaczne zagrożenie dla zdrowia ludzi ze strony pyłów powstających w czasie hamowania potwierdza celowość podjęcia inicjatywy opracowania urządzeń do zmniejszania emisji cząstek stałych z układów hamulcowych samochodów.

Podziękowanie

Artykuł opracowano na podstawie wyników badań realizowanych w ramach pracy naukowej NR10–0050–10 „Opracowanie urządzeń do ograniczania emisji pyłów z tarczowych i bębnowych układów hamulcowych pojazdów samochodowych”, finansowanej ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- [1] AGRICOLA G.: *De re metalica*. <http://www.farlang.com/gemstones/agricola-metallica/>.
- [2] ASTM E 2456 – 06. *Standard Terminology Relating to Nanotechnology*.
- [3] CANAGARATNA M.: *Chase studies of particulate emissions from in-use New York City vehicles*. *Aerosol Science and Technology* 2004, 38(6), 555–573.
- [4] CAPES C. E.: *Particle size enlargement*. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam 1980.
- [5] CHŁOPEK Z., JAKUBOWSKI A., KIERACIŃSKA A.: *Examination of a laboratory system to reduce dust emission from braking systems of automotive vehicles*. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji* 3/2011, 5–17, 103–115.
- [6] CHŁOPEK Z., JAKUBOWSKI A.: *A study of the particulate matter emission from the braking systems of motor vehicles*. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* No. 4 (44)/2009, 45–52.

- [7] CHŁOPEK Z., JAKUBOWSKI A.: *Ograniczanie emisji cząstek stałych z układu hamulcowego pojazdu samochodowego*. Archiwum Motoryzacji 1/2010, 3–15 (in Polish).
- [8] CHŁOPEK Z., JAKUBOWSKI A.: *The examination of the reduction of particulate matter emission from motor vehicle braking systems*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability No. 4(48)/2010, 29–36.
- [9] CHŁOPEK Z., ŻEGOTA M.: *The emission of particulate matter PM10 from vehicles*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability No. 1 (21)/2004, 3–13.
- [10] CHŁOPEK Z.: *Modelowanie emisji cząstek stałych PM10 ze źródeł motoryzacyjnych do celów oceny oddziaływania transportu drogowego na środowisko*. Report of research project No. N N509 083637 sponsored by the Ministry of Science and Higher Education, Warszawa 2012.
- [11] EN 1540:1998. *Workplace Atmospheres*. Terminology.
- [12] EN 481: 1993. *Workplace atmospheres. Size fraction definitions for measurement of airborne particles*.
- [13] FORSBERG B. et al.: *Comparative health impact assessment of local and regional particulate air pollutants in Scandinavia*. Journal of the Human Environment 34(1), 2005, 11–19.
- [14] HARRISON R. M., JONES A. M., LAWRENCE R. G.: *Major component composition of PM10 and PM2.5 from roadside and urban background sites*. Atmos. Environ 38, 2004, 4531–4538.
- [15] <http://www.commons.wikimedia.org/>
- [16] ISO 4225:1994. *Air quality. General aspects. Vocabulary*.
- [17] ISO 7708:1995. *Air quality. Particle size fraction definitions for health-related sampling*.
- [18] *Leksykon ekoinżynierii*. Edited by Gabriel Borowski, Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej, Warszawa 2010 (in Polish).
- [19] MACNEE W., DONALDSON K.: *Exacerbations of COPD – environmental mechanism*. Chest 2000, 117, 390–397.
- [20] MAYER A. et al.: *Nanoparticle-emissions of EURO 4 and EURO 5 HDV compared to EURO 3 with and without DPF*. SAE Emissions Measurement and Testing 2007, 335–43.
- [21] PAMPUCH R., HABERKO K., KORDEK M.: *Nauka o procesach ceramicznych*. PWN, Warszawa 1992 (in Polish).
- [22] RADWAG: *Oznaczanie pyłu całkowitego i respirabilnego metodą filtracyjno – wagową na stanowiskach pracy*. http://www.radwag.pl/e-sklep/pliki/artykuly/oznaczanie_pylu.pdf (in Polish).
- [23] *Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*. Dz. U. 2002 No. 217, item 1833 (in Polish).
- [24] SIEMIŃSKI M.: *Środowiskowe zagrożenie zdrowia*. PWN, Warszawa 2001 (in Polish).
- [25] YUH-SHEN WU et al.: *The measurements of ambient particulates (TSP, PM2.5, PM2.5–10), chemical component concentration variation, and mutagenicity study during 1998–2001 in central Taiwan*. Journal of Environmental Science and Health, Part C, Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews; Volume 20 Issue 1 2002, 45–59.