



## Badanie właściwości włókninowego wkładu filtracyjnego powietrza wlotowego silnika samochodu osobowego

TADEUSZ DZIUBAK, MATEUSZ BORCHET

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,  
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, tadeusz.dziubak@wat.edu.pl

**Streszczenie.** Przedstawiono źródła zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego. Wykazano, że pył jest głównym składnikiem powietrza wlotowego silników spalinowych. Przeanalizowano wpływ pyłu na przyspieszone zużycie elementów silnika oraz wykazano wpływ zużycia skojarzenia T-P-C na pracę silnika. Przedstawiono i zdefiniowano parametry pracy filtrów powietrza. Przeanalizowano właściwości włóknin i papierów filtracyjnych stosowanych do filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych pojazdów mechanicznych. Opracowano warunki i metodykę badań wkładów włókninowych filtrów powietrza samochodów osobowych. Zaprezentowano stanowisko badawcze z licznikiem cząstek. Przedstawiono wyniki badań charakterystyk skuteczności i dokładności filtracji oraz oporu przepływu dla trzech różnych prędkości filtracji (trzech egzemplarzy wkładów włókninowych). Stwierdzono, w wyniku przeprowadzonych badań, znacznie mniejsze wartości skuteczności ( $\varphi_w = 92 \div 98\%$ ) i dokładności filtracji ( $d_{zmax} = 18,2 \mu m$ ) wkładów włókninowych w porównaniu z papierem filtracyjnym ( $\varphi_p = 95,5 \div 99,9\%$ ). Zaobserwowano wyższe wartości współczynnika chłonności  $k_m$  wkładu włókninowego ( $k_m = 1000 \div 1300 \text{ g/m}^2$ ) w stosunku do wkładów papierowych ( $k_m = 190 \div 240 \text{ g/m}^2$ ).

**Słowa kluczowe:** silnik, filtr powietrza, wkład włókninowy, skuteczność i dokładność filtracji, opór przepływu, współczynnik chłonności pyłu, rozmiar ziaren

**DOI:** 10.5604/01.3001.0010.1895

### 1. Wstęp

Zapewnienie odpowiedniej czystości powietrza wlotowego do silników spalinowych pojazdów mechanicznych i maszyn roboczych, a tym samym zminimalizowanie zużycia skojarzeń ciernych oraz uzyskanie dużej trwałości zespołów, było zawsze i pozostaje nadal ważnym problemem eksploatacyjnym i konstrukcyjnym.

Do filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych współczesnych samochodów osobowych oraz lekkich samochodów dostawczych stosowane są filtry jednostopniowe z przegrodą porowatą, którą jest najczęściej wkład wykonany z papieru filtracyjnego. W ostatnich latach coraz częściej, zwłaszcza w samochodach produkcji azjatyckiej, jako przegrodę porowatą stosuje się wkłady wykonane z włókniny filtracyjnej.

Papier filtracyjny jest obecnie dominującym materiałem, który jest stosowany do budowy wkładów filtracyjnych. Jego właściwości filtracyjne są znane dzięki pracom badawczym prowadzonym od wielu lat w tym kierunku.

Nowoczesne technologie produkcji włókien spowodowały, że coraz częściej są one stosowane jako materiały filtracyjne powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych. Ze skąpych danych firm produkujących włókniny wynika, że charakteryzują się one znacznie większym niż papiery filtracyjne współczynnikiem chłonności pyłu  $k_m = 450 \div 500 \text{ g/m}^2$  [29]. Dostępne dane informujące o skuteczności, dokładności oraz trwałości wkładów filtracyjnych z włókien są niewystarczające, szczególnie jeśli chodzi o wkłady wykonywane w postaci tłoczonej wypraski. Stąd wynika konieczność przeprowadzenia badań rozpoznawczych skuteczności i dokładności filtracji z wykorzystaniem pyłu testowego.

## 2. Zanieczyszczenia powietrza i ich wpływ na zużycie elementów silnika

Powietrze atmosferyczne zasysane przez silniki spalinowe pojazdów mechanicznych zawiera znaczne ilości zanieczyszczeń, których podstawowym składnikiem są zanieczyszczenia pyłowe [3, 4, 6, 15, 16]. Za pył uznaje się fazę rozproszoną układu dwufazowego, na którą składa się ciało stałe zawieszona w gazowej fazie rozpraszającej, tj. mieszanina cząstek stałych zawieszonych w powietrzu.

Źródłami emisji pyłów są zarówno działania cywilizacyjne, jak i zjawiska naturalne, które uważa się za źródła dominujące. Są to przede wszystkim: wybuchy wulkanów, materiały osadowe, aerozole morskie, roślinne i zwierzęce, a także pożary lasów [5]. W obszarach o szczególnie intensywnej działalności przemysłu największy wpływ na zanieczyszczenie środowiska pyłami mają ich źródła antropogeniczne, którymi są właściwie wszystkie procesy i urządzenia produkcyjne przemysłu energetycznego, wydobywczego, metalurgicznego, budowlanego, produkcji cementu oraz procesy spalania paliw — głównie paliw stałych.

Powszechnie uważa się, że wszystkie ziarna pyłu o wymiarach większych od  $1 \mu\text{m}$  są przyczyną przyspieszonego zużycia elementów maszyn i to właśnie one powinny być usunięte z powietrza wlotowego silników przez filtry powietrza. Szczególne miejsce w procesach emisji pyłów (PM10 i PM2.5) ze źródeł antropogenicznych zajmuje transport drogowy ze względu na masowość użytkowania samochodów.

Pochodzi z niego około 15% obydwu frakcji wymiarowych cząstek stałych [5, 27]. Pył PM10 zawieszony w powietrzu jest jednym z ważniejszych czynników zanieczyszczających atmosferę. Źródłem tych pyłów są głównie silniki wysokoprężne. Według autora pracy [24] zawartość pyłów PM10 w powietrzu w efekcie pracy silników o ZS (wtrysk pośredni) samochodów osobowych zawiera się w zakresie  $17 \div 26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  i wzrasta wraz ze wzrostem zadymienia spalin. Podobną zależność i zbliżone wartości pyłów PM10 zawieszonych w powietrzu stwierdzono dla silników wysokoprężnych o wtrysku bezpośrednim samochodów ciężarowych średniej i dużej ładowności [24]. Pyły ze źródeł motoryzacyjnych (z ruchu drogowego) pochodzą z [4, 5, 7, 20, 21, 24, 26]:

- unoszenia z podłoża, przez ruch pojazdów mechanicznych lub przez wiatr, pyłu mineralnego (pył drogowy), którego głównym składnikiem jest  $\text{SiO}_2$ ,
- emisji spalin przez silniki pojazdów mechanicznych (pył, sadza, związki ołowiu, ciężkie węglowodory, cząstki stałe PM oraz gazy),
- emisji przez pojazdy mechaniczne pyłów pochodzących z węzłów tribologicznych, gdzie intensywnemu zużyciu ulegają materiały cierne okładzin hamulców oraz tarcz sprzęgłowych [5],
- emisji pyłów ze zużycia ogumienia kół jezdnych oraz z nawierzchni jezdni (emisja wynikająca z wzajemnej współpracy kół oraz nawierzchni [5]).

Cechą charakterystyczną zanieczyszczonego powietrza jest stężenie zapylenia powietrza, a jego miarą jest masa pyłu (w gramach lub w mg) zawarta w  $1 \text{ m}^3$  powietrza atmosferycznego. Stężenie pyłu w powietrzu jest wielkością zmienną i zależy od bardzo wielu czynników. W zależności od warunków eksploatacji pojazdów mechanicznych wartości stężenia pyłu w powietrzu są bardzo zróżnicowane.

Najmniejsze stężenie pyłu w powietrzu, około  $0,001 \text{ g}/\text{m}^3$  [1, 7, 13], występuje podczas poruszania się pojazdów po drogach utwardzonych i ulicach, poniżej  $0,001 \text{ g}/\text{m}^3$  w dzielnicach mieszkaniowych. Największe stężenie pyłu w powietrzu, dochodzące do  $7 \text{ g}/\text{m}^3$  [1, 7, 8, 11, 20, 21], występuje podczas jazdy pojazdów gąsienicowych w kolumnie po poligonowych placach ćwiczeń o suchym podłożu. W czasie burzy piaskowej stężenie pyłu w powietrzu osiąga wartość  $10 \text{ g}/\text{m}^3$  [20, 26].

Powszechnym szkodliwym dla eksploatowanych pojazdów zanieczyszczeniem powietrza jest polidispersyjny pył drogowy, który unoszony jest z powierzchni ziemi podczas ruchu pojazdów mechanicznych lub przez wiatr, tworząc zawiesinę w powietrzu, skąd następnie zasysany jest wraz z powietrzem przez czerpnie filtrów powietrza. Ziarna pyłu o rozmiarach  $d_z = 2 \div 10 \mu\text{m}$  utrzymują się długo w powietrzu, a tym samym zasysane są przez silniki. Ziarna pyłu o  $d_z = 10, 50 \mu\text{m}$  stanowią znaczny udział w ogólnej masie powietrza zasysanego przez silniki w przypadku, gdy pojazd pracuje w warunkach dużego stężenia pyłu w powietrzu. Ziarna pyłu większe od  $50 \mu\text{m}$  znajdują się w powietrzu, na placach budów, w kopalniach, kamieniołomach, poligonach, ale szybko opadają.

Podstawowymi składnikami pyłu drogowego są ziarna o nieregularnych kształtach i ostrych krawędziach twardych minerałów:  $\text{SiO}_2$  (krzemionki) oraz  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (korundu), których udział w pyłe dochodzi do 60÷95% [1]. Twardość ziaren krzemionki, określana w dziesięciostopniowej skali Mohsa, wynosi 7, a korundu 9, czyli więcej niż twardość materiałów konstrukcyjnych stosowanych do budowy silników spalinowych.

Wraz z powietrzem do cylindrów silnika dostają się przez układ zasilania powietrzem ziarna pyłu o rozmiarach poniżej  $d_z = 2\div 5 \mu\text{m}$ , gdyż z taką dokładnością działają współczesne filtry powietrza. Część zanieczyszczeń powietrza jest spalana w silniku, część jest usuwana wraz ze spalinami. Na ściankach tulei cylindrowej osiada tylko 10÷20% pyłu, który dostaje się do silnika przez układ dolotowy. Ta część pyłu tworzy wraz z olejem rodzaj pasty ścierniej, która w zetknięciu z powierzchniami skojarzenia tłok–pierścienie tłokowe–cylinder (T-P-C) powoduje przyspieszone zużycie tulei cylindrowej, pierścieni tłokowych i rowków pierścieniowych tłoka. W wyniku ruchu tłoka w kierunku DMP pierścienie zgarniają z gładzi cylindrowej olej wraz z zanieczyszczeniami do miski olejowej. Po przedostaniu się do układu smarowania, zanieczyszczenia rozprawdane są przez instalację olejową do tych obszarów tribologicznych silnika, które są smarowane olejem, na przykład do skojarzeń: czop–panewka wału korbowego, czop–panewka wałka rozrządu, prowadnica zaworu–trzonek zaworu, powodując ich przyspieszone zużycie.

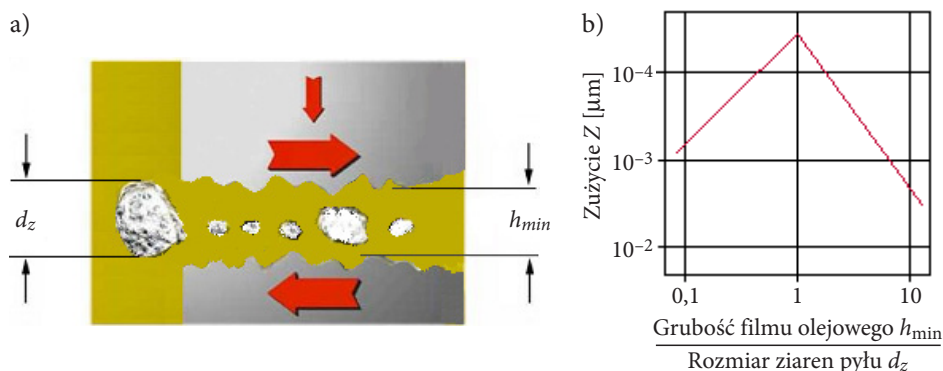
Wśród autorów prac, którzy badali wpływ zanieczyszczeń płynów eksploatacyjnych na zużycie elementów silnika tłokowego, dominuje pogląd, że największe zużycie powodują ziarna pyłu o rozmiarach  $d_z$  równych  $h_{\min}$  grubości warstwy oleju potrzebnej do utworzenia klina smarnego między powierzchniami współpracującymi, czyli gdy zachodzi następująca zależność [17]:

$$\frac{h_{\min}}{d_z} = 1. \quad (1)$$

Dla każdej innej wartości ilorazu  $h_{\min}/d_z$  zużycie skojarzenia maleje (rys. 1b) [17].

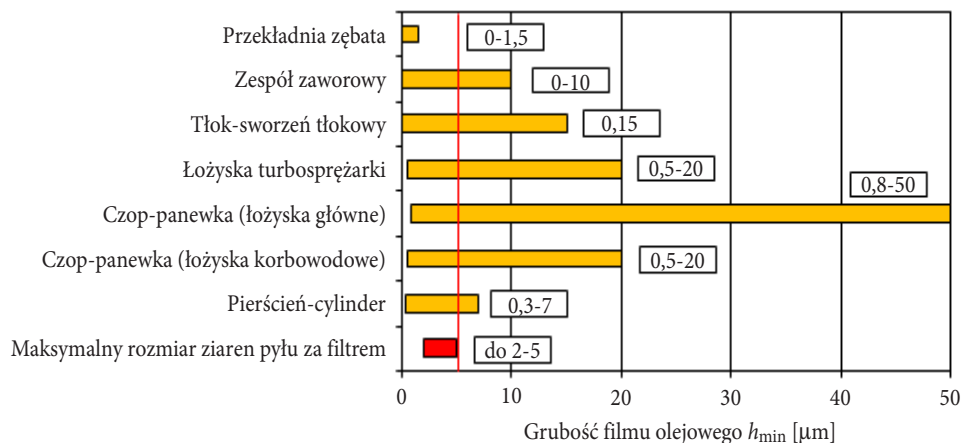
Dla ustalonych warunków pracy silnika grubość filmu olejowego  $h_{\min}$  zmienia się cyklicznie w obszarze skojarzeń tribologicznych w zależności od kąta obrotu wału korbowego. Między tuleją cylindrową a pierścieniami tłokowymi grubość filmu olejowego zdeterminowana jest prędkością tłoka. Między zwrotami zewnętrznymi DMP i GMP prędkość tłoka (pierścieni tłokowych) jest największa, a więc grubość filmu olejowego w tym obszarze przyjmuje maksymalne wartości.

Zmiana kierunku ruchu tłoka w skrajnych położeniach tulei cylindrowej powoduje, że jego prędkość w tym obszarze jest najmniejsza, a w DMP i GMP równa zeru, co prowadzi do ograniczania filmu olejowego lub jego całkowitego zaniku (smarowanie graniczne). W tych warunkach teoretycznie każda cząstka o dowolnie małych rozmiarach może powodować zużycie.



Rys. 1. Wpływ grubości filmu olejowego na zużycie skojarzenia: a) działanie cząstek stałych na parę tribologiczną; b) zależność zużycia skojarzenia od ilorazu  $h_{min}/d_z$  [17]

Agresywność ścierna pyłu maleje w przypadku, gdy rozmiary ziaren pyłu są mniejsze niż  $5 \mu\text{m}$ . Taką wartość uważa się za górną dopuszczalną wielkość ziaren pyłu, które mogą być przepuszczane przez filtry powietrza, paliwa i oleju [18, 19, 26]. Grubość filmu olejowego w typowych skojarzeniach silnika spalinowego podana przez autorów prac [6, 17] przyjmuje zróżnicowane wartości (rys. 2).

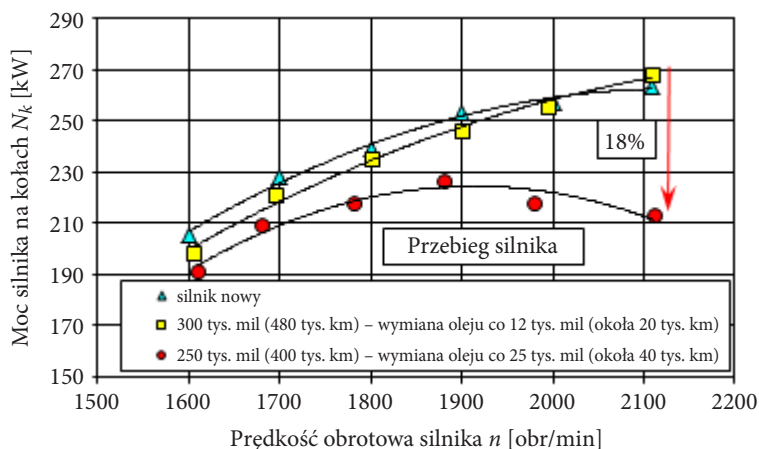


Rys. 2. Grubości filmu olejowego w typowych skojarzeniach silnika spalinowego [6]

Widać wyraźnie, że nawet najmniejsze ziarna pyłu i te poniżej  $2\div 5 \mu\text{m}$  będą powodowały przyspieszone zużycie.

W wyniku zachodzących w skojarzeniach współpracujących tarciowo procesów zużyciowych intensyfikowanych obecnością ziaren pyłu następuje powiększanie się luzów, co negatywnie wpływa na pracę silnika [8, 23]. Zużycie skojarzenia tłok-pierścień-cylinder (T-P-C) powoduje spadek szczelności komory spalania. W efekcie

następuje ubytek sprężanego czynnika, a tym samym spadek ciśnienia w końcu suwu sprężania. W konsekwencji dochodzi do spadku mocy silnika (rys. 3) i wzrostu jednostkowego zużycia paliwa. Nadmierny luz w skojarzeniu T-P-C jest przyczyną zwiększonego przepływu czynnika roboczego podczas sprężania. W efekcie obniżają się zdolności rozruchowe zimnego silnika. Nadmierny w skojarzeniu luz powoduje zwiększony przepływ gazów spalinowych do miski olejowej, co powoduje wzrost temperatury oleju smarującego, spadek jego lepkości oraz wydmuchiwanie oleju przez gazy spalinowe. W efekcie następuje zanik klina smarowego, w wyniku czego układ przechodzi z warunków tarcia płynnego w tarcie graniczne. Zwiększony w skojarzeniu T-P-C luz intensyfikuje zjawisko pompującego działania pierścieni tłokowych, tym samym wzrasta zużycie oleju oraz emisja związków toksycznych.



Rys. 3. Zmiana mocy silnika Cummins N14 – nowego i po różnych przebiegach pojazdu z wymianą oleju, co 12 tys. mil (20 tys. km) i 25 tys. mil (40 tys. km) [17]

Niezbędne są więc dane informujące o skuteczności i dokładności filtracji powietrza przez materiały stosowane jako przegrody porowate filtrów samochodów osobowych. Dane takie można uzyskać tylko w podczas badań eksperymentalnych rzeczywistych wkładów filtracyjnych na specjalnych stanowiskach badawczych.

### 3. Parametry charakteryzujące pracę filtrów powietrza

Filtr powietrza, aby móc realizować usuwanie zanieczyszczeń z powietrza wlotowego do silnika pojazdu mechanicznego, musi mieć odpowiednie właściwości, które określają następujące podstawowe parametry [1]:

- skuteczność filtracji,
- opór przepływu filtru,

- dokładność filtracji,
- chłonność filtru.

**Skuteczność filtracji**  $\varphi$  określa zdolność filtru do jakościowego i ilościowego zatrzymania zanieczyszczeń ze strumienia powietrza. Wyznaczana jest najczęściej jako iloraz masy  $m_{PF}$  pyłu testowego zatrzymywanego przez filtr i masy  $m_{PD}$  pyłu testowego doprowadzanego do filtru w strumieniu powietrza w jednostce czasu.

$$\varphi_f = \frac{m_{PF}}{m_{PD}} = \frac{m_{PD} - m_{P2}}{m_{PD}} 100\%, \quad (2)$$

gdzie:  $m_{P2}$  — masa pyłu przepuszczona przez filtr.

Dla filtrów wielostopniowych, w których stopnie filtracji ustawione są szeregowo, skuteczność filtracji określa się najczęściej według zależności [21]:

$$\varphi_f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \varphi_i), \quad (3)$$

gdzie:  $n$  — liczba stopni filtracji;  
 $\varphi_i$  — skuteczność filtracji  $i$ -tego stopnia.

**Opór przepływu filtru powietrza**  $\Delta p_f$  jest rozumiany jako całkowita strata ciśnienia przy przepływie powietrza przez filtr i określa się jako różnicę ciśnień całkowitych mierzonych bezpośrednio na wlocie  $p_{c1}$  i wylocie  $p_{c2}$  powietrza z filtru.

$$\Delta p_f = p_{c1} - p_{c2} \text{ [kPa]}. \quad (4)$$

W szczególnym przypadku, jeżeli przewody dolotowy i wylotowy znajdują się na jednakowym poziomie i mają jednakowe średnice  $D_1 = D_2$ , a tym samym prędkości przepływu powietrza mają te same wartości, wtedy opór przepływu wyraża się różnicą ciśnień statycznych i przyjmuje postać:

$$\Delta p_f = \Delta p_s = p_{s1} - p_{s2} \text{ [kPa]}. \quad (5)$$

**Dokładność filtracji**  $d_{zmax}$  oznacza maksymalny rozmiar ziarna pyłu, który przechodzi przez warstwę filtracyjną.

**Chłonność filtru** opisywana jest współczynnikiem chłonności pyłu  $k_m$ , który jest ilorazem całkowitej masy pyłu  $m_c$ , jaka została zatrzymana przez wkład filtracyjny dla przyjętej wartości  $\Delta p_{fdop}$ , i pola powierzchni czynnej papieru filtracyjnego  $F_w$  przy założeniu równomiernego rozkładu pyłu na całej powierzchni czynnej papieru  $F_w$ :

$$k_m = \frac{m_c}{F_w} \text{ [g / m}^2\text{]}. \quad (6)$$

Charakterystyki przegrodowych filtrów powietrza silników pojazdów mechanicznych są funkcją parametrów: przepływającego powietrza, pyłu i struktury warstwy filtracyjnej. W praktyce charakterystyki filtrów powietrza wyznacza się najczęściej w zależności od jednego parametru w warunkach laboratoryjnych na standardowych stanowiskach z wykorzystaniem znormalizowanych testów badawczych oraz pyłu testowego. Dla określonej konstrukcji filtru powietrza pracującego w określonym zakresie wartości strumienia powietrza  $Q_{\min} \div Q_{\max}$ , przy założeniu stałych parametrów powietrza atmosferycznego i pyłu, charakterystyki przegrodowego filtru powietrza wlotowego silnika pojazdu mechanicznego przybierają postać [9]:

$$\varphi_f = f(m_p) \text{ lub } \varphi_f = f(k_m), \quad (7)$$

$$d_{z\max} = f(m_p) \text{ lub } d_{z\max} = f(k_m), \quad (8)$$

$$\Delta p_f = f(k_m), \quad (9)$$

$$\Delta p_f = f(Q). \quad (10)$$

#### 4. Materiały filtracyjne powietrza wlotowego silników samochodów osobowych

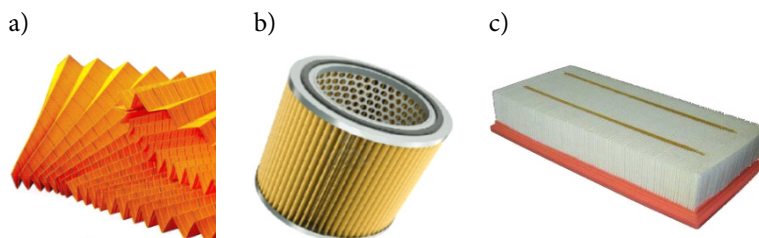
Najliczniejszą grupą filtrów powietrza pojazdów mechanicznych i maszyn roboczych są filtry przegrodowe, które ze względu na rodzaj materiału filtracyjnego dzielą się na: powierzchniowe, objętościowe i powierzchniowo-objętościowe. Dominującym materiałem filtracyjnym (powierzchniowo-objętościowym), który stosowany jest do filtracji płynów eksploatacyjnych pojazdów mechanicznych, są papiery filtracyjne. Ze względu na to, że firmy produkujące papiery filtracyjne stosują różne metody do określania ich parametrów, trudno jest je porównywać. Ogólnie papiery filtracyjne charakteryzują następujące parametry [1, 8, 12-14]:

- skuteczność filtracji  $\varphi = 99,95 \div 99,99\%$ ,
- gramatura  $w = 115 \div 240 \text{ g/m}^2$ ,
- grubość papieru  $g = 0,3 \div 0,9 \text{ mm}$ ,
- współczynnik chłonności zanieczyszczeń podczas pracy w układzie filtracji:
  - jednostopniowej  $k_m$  do  $190 \div 240 \text{ g/m}^2$ ,
  - dwustopniowej (cyklon-przegroda papierowa)  $k_m$  do  $50 \div 110 \text{ g/m}^2$ ,
- średni wymiar porów  $d_p = 40 \div 95 \text{ }\mu\text{m}$ ,
- średnica włókien  $d_w = 10 \div 20 \text{ }\mu\text{m}$ .

Z papieru filtracyjnego kształtuje się plisowaną taśmę (rys. 4a), z której następnie montowane są wkłady filtracyjne cylindryczne o przekroju koła (rys. 4b) oraz panelowe (rys. 4c). Wkłady filtracyjne powinny być tak skonstruowane, aby przy



określonych parametrach filtracyjnych miały maksymalną skuteczność filtracji, minimalny opór przepływu i maksymalną trwałość. Jednocześnie wkład filtracyjny należy tak kształtować, aby miał on maksymalną powierzchnię przy minimalnej objętości wkładu i spełniał warunek dopuszczalnej prędkości filtracji  $v_F$ . Dla wkładów papierowych filtrów powietrza samochodów osobowych prędkość filtracji  $v_F$  nie powinna przekraczać wartości  $v_F = 0,08 \div 0,12$  m/s.



Rys. 4. Kształtowanie wkładu z papieru filtracyjnego: a) plisowana taśma; b) wkład cylindryczny; c) wkład panelowy

Producenci pojazdów samochodowych z krajów azjatyckich (Japonia, Korea Płd.) jako element przegrodowy filtrów powietrza wlotowego silników spalinowych coraz częściej stosują wkłady z syntetycznych włókien filtracyjnych. Ich właściwości filtracyjne podawane są tylko w nielicznych źródłach i często są rozbieżne. Przykładowo w pracy [25] podano, że wartość współczynnika chłonności pyłu włókniny o grubości 3,2 mm poddanej kalandrowaniu, wyznaczonej przy oporze przepływu 0,3 kPa, wynosi  $k_m = (85,5 \div 112,3)$  g/m<sup>2</sup>. W [7] natomiast podano wartość współczynnika chłonności pyłu wielowarstwowej włókniny filtracyjnej  $k_m = (900 \div 1100)$  g/m<sup>2</sup>. Nie podano natomiast warunków badań. Według [29] współczynniki chłonności pyłu włókien filtracyjnych przekraczają wartość (400 ÷ 480) g/m<sup>2</sup>, brakuje natomiast informacji dotyczących warunków badań i zastosowanego pyłu testowego. Według [10] włókninowy wkład filtracyjny samochodu ciężarowego pracujący w warunkach filtracji jednostopniowej osiągnął przy oporze przepływu  $\Delta p_w = 5$  kPa wartość  $k_m = 700$  g/m<sup>2</sup> i skuteczność filtracji  $\varphi_w = 99,87\%$ .

Z badań przedstawionych w pracy [9, 28] wynika, że właściwości filtracyjne włókien zależą ściśle od prędkości filtracji  $v_F$ . Wzrost  $v_F$  powoduje spadek skuteczności i dokładności filtracji oraz intensywniejszy wzrost oporu przepływu, co skraca czas pracy wkładów włókninowych limitowany osiągnięciem dopuszczalnego oporu przepływu  $\Delta p_{dop} = 5$  kPa. Największą wartość współczynnika chłonności pyłu włókniny AC-301 ( $k_m = 345$  g/m<sup>2</sup> i najwyższą skuteczność  $\varphi = 99,81\%$ ) uzyskano dla wkładu badanego przy  $v_F = 0,08$  m/s.

Włókny filtracyjne charakteryzują się kilkukrotnie większą grubością niż papiery filtracyjne (tab. 1, tab. 2), stąd chłonność zanieczyszczeń jest znacznie wyższa przy porównywalnej skuteczności filtracji. Sprawia to, że wkłady filtracyjne wykonane

z włókniny zamiast papieru filtracyjnego mogą mieć znacznie mniejsze rozmiary. Włókniny mają zdecydowanie mniejszą sztywność niż papiery filtracyjne. Stosuje się więc formowanie plisowanej włókninowej taśmy w sztywne ramki z tworzywa sztucznego (rys. 5b). Inną formą wkładów filtracyjnych są elementy filtracyjne wykonywane w całości z włókniny w formie sztywnej „wypraski” (rys. 5c). Dla tych wkładów brakuje jakichkolwiek informacji o skuteczności i dokładności filtracji oraz chłonności pyłu.



Rys. 5. Wkłady filtracyjne panelowe włókninowe: a) plisowana włóknina; b) w sztywnej ramce z tworzywa sztucznego; c) wykonane w postaci „wypraski”

Wybrane parametry wybranych gatunków włóknin filtracyjnych podano w tabeli 1 i tabeli 2.

TABELA 1  
Parametry włóknin filtracyjnych produkowanych przez Korea Filtration Technologies Co. [22]

Lp.	Parametry	Jednostki	Oznaczenie włókniny			
			AC-180	AC-1800	AC-3800	AC-301
1	Gramatura	g/m <sup>2</sup>	300	290	240	210
2	Grubość	mm	2,61÷3,19	2,8÷3,6	3,15÷3,85	2,43÷2,86
3	Przepuszczalność powietrza	cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> /s	45÷60	50÷85	65÷90	80÷110

TABELA 2  
Parametry włóknin filtracyjnych oferowanych przez Retop Fibre [28]

Lp.	Parametry	Jednostki	Oznaczenie włókniny			
			AC-205	AC203S	GH250-OE	GP20T
1	Gramatura	g/m <sup>2</sup>	220±20	220±20	250±30	130±15
2	Grubość	mm	2,8 ± 0,3	2,8±0,3	5,0±0,5	0,7±0,10
3	Skuteczność filtracji	%	≥97	≥96	≥94	≥99,5
4	Przepuszczalność powietrza	dm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s	≥110	≥1100	≥1600	≥400
5	Wymiar porów	µm	120÷140	120÷140	180÷200	50÷70
6	Wytrzymałość na rozciąganie	N/50 mm	≥210	≥210	≥130	≥100
7	Współczynnik chłonności pyłu	g/m <sup>2</sup>	≥450	≥450	≥500	≥90

Podane w tabelach właściwości włókien dotyczą próbek materiałów, a nie gotowych panelowych wkładów filtracyjnych. Brakuje też danych dotyczących skuteczności i dokładności filtracji. Stąd wynika konieczność przeprowadzenia odpowiednich badań wkładów filtracyjnych.

## 5. Cel, zakres i warunki badań

Celem badań było określenie właściwości filtracyjnych (skuteczności i dokładności filtracji oraz oporu przepływu) wkładu włókninowego wykonanego w formie „wypraski”, stosowanego jako przegroda filtracyjna w jednostopniowym układzie filtracji powietrza wlotowego silnika samochodu osobowego.

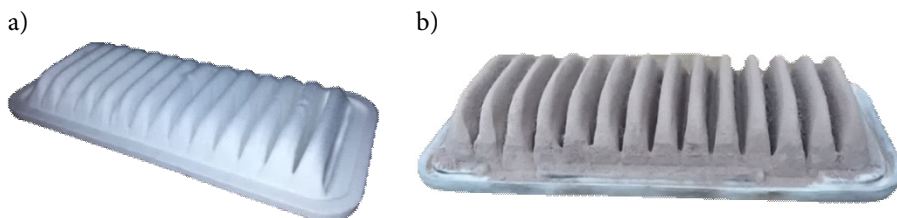
Zakres badań obejmował określenie, z wykorzystaniem pyłu testowego o standardowym składzie granulometrycznym, charakterystyk: skuteczności  $\varphi_w$ , dokładności filtracji  $d_{zmax}$  i oporów przepływu  $\Delta p_w$  trzech egzemplarzy wkładów filtracyjnych, w funkcji współczynnika chłonności pyłu  $k_m$ , w postaci:

- skuteczność filtracji  $\varphi_w = f(k_m)$ ,
- dokładność filtracji  $d_{zmax} = f(k_m)$ ,
- oporu przepływu  $\Delta p_w = f(k_m)$ .

Badania wykonano dla trzech egzemplarzy wkładu filtracyjnego (nr 1, nr 2 i nr 3). Każdy z wkładów badano odpowiednio przy innej prędkości filtracji.

- $v_{F1} = 0,08$  m/s — prędkość filtracji typowa dla papierów filtracyjnych,
- $v_{F2} = 0,16$  m/s — prędkość filtracji dwukrotnie większa od prędkości filtracji dla papierów filtracyjnych,
- $v_{F3} = 0,24$  m/s — prędkość filtracji trzykrotnie większa od prędkości filtracji dla papierów filtracyjnych.

Przedmiotem badań był panelowy (w postaci wypraski) wkład filtracyjny o symbolu AP 142/1 (rys. 6) wykonany w całości z włókniny AC-301, stosowany do filtracji powietrza wlotowego silnika o mocy 50 kW samochodu osobowego Citroen C1 Hatchback 1.0.



Rys. 6. Wkład filtracyjny AP 142/1: a) przed wykonaniem badań; b) po wykonaniu badań skuteczności filtracji z wykorzystaniem pyłu testowego

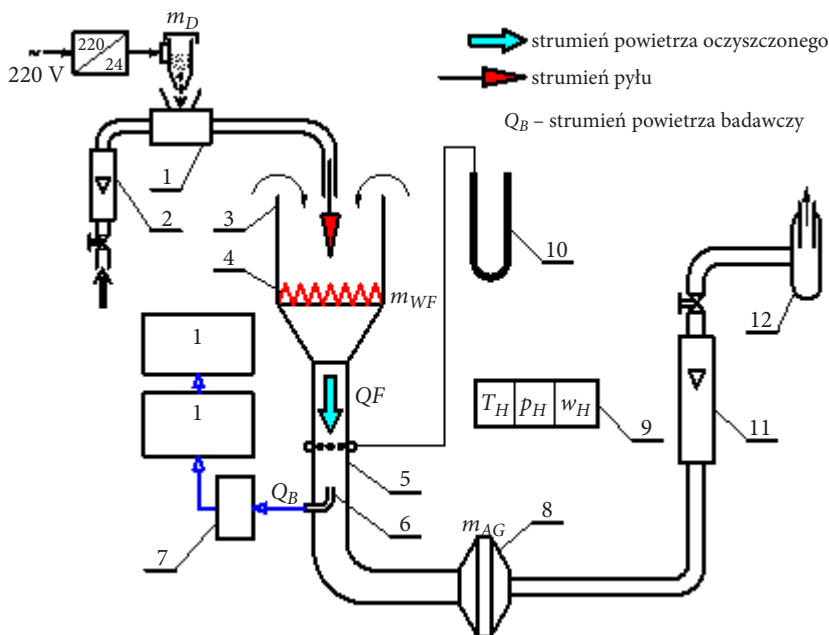
Wkład filtracyjny składa się z dwóch części: filtracyjnej i mocującej. Część filtracyjną stanowi 14 plis o wysokości 39 mm rozmieszczonych w równych odstępach co 16 mm. Powierzchnię filtracyjną obliczono na podstawie charakterystycznych wymiarów plis, a jej wartość wynosi  $A_c = 0,0888 \text{ m}^2$ . Grubość materiału filtracyjnego plis to 1,2 mm.

Wartość strumienia powietrza  $Q_{Fi}$  przepływającego przez wkład filtracyjny określono dla każdej prędkości filtracji  $v_i$  z zależności:

$$Q_{Fi} = v_{Fi} \cdot A_c \cdot 3600 [\text{m}^3/\text{h}]. \quad (11)$$

Dla przyjętych wartości prędkości filtracji,  $v_{F1} = 0,08 \text{ m/s}$ ,  $v_{F2} = 0,16 \text{ m/s}$ ,  $v_{F3} = 0,24 \text{ m/s}$ , wartość strumienia powietrza przepływającego przez kolejne wkłady filtracyjne, zgodnie z powyższą zależnością, wynosi odpowiednio:  $Q_{F1} = 25,56 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_{F2} = 51,13 \text{ m}^3/\text{h}$  i  $Q_{F3} = 76,69 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Badania prowadzono na specjalnie w tym celu zbudowanym stanowisku (rys. 7), które umożliwia wykonywanie podstawowych charakterystyk wkładów filtracyjnych w zakresie strumienia powietrza do  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{h}$  i przy stężeniu pyłu w powietrzu do  $1 \text{ g}/\text{m}^3$ .



Rys. 7. Schemat funkcjonalny stanowiska do badań wkładów filtracyjnych: 1 — dozownik pyłu, 2 — rotametr pomiaru sprężonego powietrza, 3 — komora pyłowa, 4 — badany wkład filtracyjny, 5 — przewód pomiarowy, 6 — sonda pyłowa, 7 — pompa próżniowa, 8 — filtr absolutny, 9 — przyrząd do pomiaru temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza, 10 — manometr ciecowy pomiaru oporu przepływu wkładu filtracyjnego, 11 — rotametr pomiaru strumienia powietrza, 12 — wentylator ssawny

Strumień powietrza czystego  $Q_F$  wypływającego z badanego wkładu filtracyjnego oraz strumień sprężonego powietrza  $Q_S$  dostarczanego do dozownika pyłu określone były na podstawie wskazań rotametrów pływakowych typu RIN i wykresów ich cechowania.

W odległości  $6d_w$  od płaszczyzny czołowej dolnej obudowy wkładu filtracyjnego w przewodzie pomiarowym (gdzie  $d_w$  — średnica wewnętrzna przewodu wylotowego z obudowy dolnej wkładu) podłączony jest manometr cieczowy typu U-rurka przeznaczony do pomiaru spadku ciśnienia statycznego  $\Delta h$  za badanym wkładem filtracyjnym, a tym samym określenia jego oporu przepływu  $\Delta p_w$ .

Stosowany do badań pył testowy wysypuje się przez otwór (mający regulowany zmienny przekrój) w dnie pojemnika pyłu wskutek drgań wymuszonych elektromagnesem zasilanym z autotransformatora. Intensywność drgań jest regulowana wartością prądu wyjściowego autotransformatora. Pył ten następnie wpada do przewodu, którym pneumatycznie (sprężonym powietrzem) podawany jest do lekkiej komory pyłowej, gdzie następuje jego zmieszanie z powietrzem wlotowym do wkładu filtracyjnego. Tak przygotowany aerozol zasasyany jest przez wkład filtracyjny.

W odpowiedniej odległości za badanym wkładem filtracyjnym, w centralnej osi przekroju przewodu, umieszczona jest końcówka sondy pyłowej, której otwór wlotowy jest skierowany w stronę napływu strumienia zanieczyszczonego powietrza  $Q_F$ . W trakcie badań część strumienia powietrza  $Q_F$  zostaje zassana za pomocą sondy pomiarowej i pompy próżniowej do sensora HCB-LD-2A-2000-1, w którym dokonuje się analiza rozmiarów oraz liczby ziaren pyłu. Sensor generuje sygnał napięciowy, którego wartość jest zależna od wymienionych parametrów, i przekazuje go do mikroprocesora licznika cząstek stałych Pamas-2132. Licznik rejestruje liczbę oraz rozmiar ziaren pyłu w strumieniu powietrza obejmujących ich średnice z zakresu  $0,7 \div 100 \mu\text{m}$  w  $i = 32$  przedziałach pomiarowych, będących zakresami ograniczonymi średnicami ( $d_{zimin} \div d_{zimax}$ ). Wyniki pomiarów przedstawiane są w postaci tabel (tyle tabel, ile zaprogramowano zliczeń) zawierających liczby  $N_i$  ziaren pyłu objętych przedziałami pomiarowymi średnic ( $d_{zimin} \div d_{zimax}$ ).

Skuteczność filtracji określano metodą grawimetryczną w cyklach pomiarowych poprzez określanie masy badanego wkładu filtracyjnego i dozownika pyłu przed każdym cyklem i po. Czas trwania cyklu pomiarowego, czas równomiernego dozowania pyłu na wkład filtracyjny, przyjęto w pierwszym okresie badań  $\tau_{p1} = 5 \text{ min}$  — gwałtowny wzrost skuteczności filtracji. Z chwilą ustalenia się skuteczności czas trwania cyklu pomiarowego ustalono na  $\tau_p = 15 \text{ minut}$ .

W trakcie trwania cyklu pomiarowego w chwili  $\tau_{pcz} = \frac{1}{2}\tau_p$  uruchamiano w liczniku cząstek procedurę pomiaru liczby i rozmiarów ziaren pyłu w powietrzu za filtrem. Wyniki pomiarów drukowane są w postaci tabel zawierających granice przedziału oraz liczbę cząstek  $N_i$  w danym przedziale, a także całkowitą liczbę ziaren poddanych analizie. Podczas badań wkładów filtracyjnych zaprogramowano trzy zliczenia ziaren pyłu w czasie trwania cyklu pomiarowego, z których określano

średnią. W ostatnim przedziale pomiarowym znajduje się najczęściej jedno ziarno pyłu mające największy rozmiar  $d_z = d_{z\max}$ . Z tych względów ziarno pyłu o największym rozmiarze  $d_z = d_{z\max}$  znajdujące się w powietrzu za wkładem filtracyjnym przyjęto jako kryterium oceny dokładności filtracji powietrza.

Podczas badań stosowano, zgodnie z normą PN-S-34040, pył testowy PTC-D, będący krajowym zamiennikiem pyłu AC Fine, którego skład chemiczny i granulometryczny przedstawiono w [27].

Po każdym cyklu pomiarowym „i” obliczano według poniższych zależności:

- 1) skuteczność filtracji wkładu włókninowego w czasie cyklu pomiarowego „i”:

$$\varphi_{fi} = \frac{m_{ZFi}}{m_{DFi}} 100\%, \quad (12)$$

gdzie:  $m_{ZFi}$  — masa pyłu zatrzymana na wkładzie filtracyjnym;

$m_{DFi}$  — ubytek masy z dozownika pyłu;

- 2) opór przepływu wkładu filtracyjnego:

$$\Delta p_{wi} = \frac{\Delta h_i}{1000} \cdot 9,80665 \text{ [kPa]}, \quad (13)$$

gdzie:  $\Delta h_i$  — spadek ciśnienia statycznego [mm H<sub>2</sub>O];

- 3) stężenie pyłu w czasie cyklu pomiarowego „i”:

$$s_i = \frac{m_{DFi=1} \cdot 60}{Q_F \cdot \tau_{pom}} = [\text{g/m}^3], \quad (14)$$

gdzie:  $Q_F$  — strumień powietrza;

$\tau_p$  — czas pomiaru (dozowania pyłu);

- 4) wartość współczynnika chłonności pyłu  $k_{mpi}$  w czasie pojedynczego cyklu pomiarowego „i” oraz wartość sumaryczna współczynnika chłonności pyłu wkładu za wszystkie pomiary:

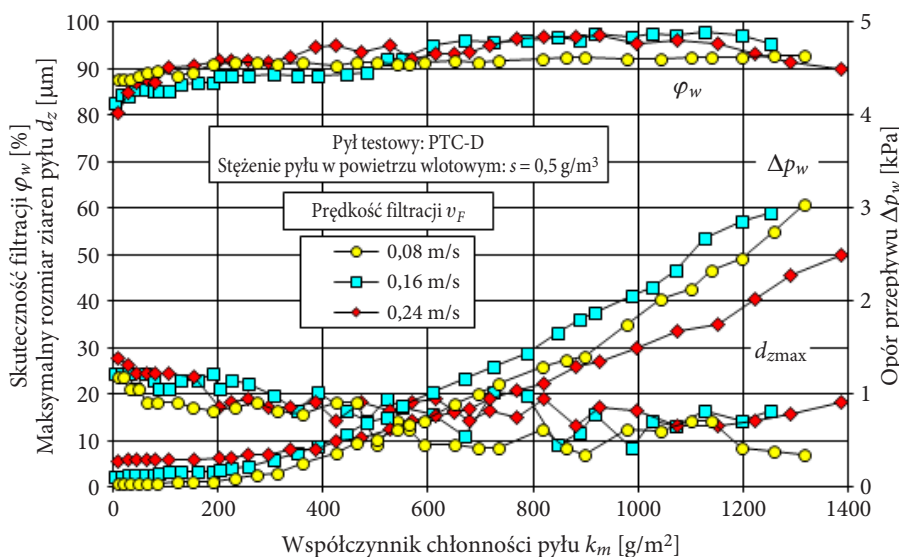
$$k_{mi} = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ZFi}}{A_c} [\text{g} / \text{m}^2], \quad (15)$$

gdzie:  $A_c$  — pole czynnej powierzchni badanego wkładu filtracyjnego [m<sup>2</sup>].

Badania prowadzono do chwili osiągnięcia przez badany wkład filtracyjny wartości oporu przepływu  $\Delta p_w = 3$  kPa. Jest to wartość dopuszczalnego oporu przepływu filtru przyjmowana przez konstruktorów silników spalinowych samochodów osobowych. Jako dodatkowe kryterium zakończenia badań przyjęto postępujący spadek skuteczności filtracji przed osiągnięciem dopuszczalnego oporu przepływu.

## 6. Analiza otrzymanych wyników badań wkładów filtracyjnych

Wyniki badań charakterystyk: skuteczności filtracji  $\varphi_w = f(k_m)$ , dokładności filtracji  $d_{zmax} = f(k_m)$  i oporu przepływu  $\Delta p_w = f(k_m)$  w funkcji współczynnika chłonności pyłu  $k_m$  wkładów filtracyjnych wykonanych z włókniny filtracyjnej, pracujących każdy przy innej prędkości filtracji  $v_F$ , przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8 Charakterystyki skuteczności filtracji  $\varphi_w$ , oporów przepływu  $\Delta p_w$  oraz dokładności filtracji (wartości maksymalnych ziaren pyłu  $d_{zmax}$ ) w funkcji współczynnika chłonności pyłu  $k_m$  wkładów włókninowych

Wraz ze wzrostem masy pyłu zatrzymanego na wkładzie filtracyjnym (współczynnika chłonności  $k_m$ ) skuteczność filtracji badanych wkładów systematycznie rośnie. Niezależnie od wartości prędkości filtracji najniższe wartości skuteczności filtracji zarejestrowano po pierwszym cyklu pomiarowym, przy czym im większa prędkość filtracji, tym skuteczność początkowa przybiera coraz niższe wartości i dla  $v_{F1} = 0,08$  m/s wynosi  $\varphi_{w1} = 87,8\%$ , dla  $v_{F2} = 0,16$  m/s,  $\varphi_{w2} = 82,5\%$ , a dla

$v_{F3} = 0,24$  m/s  $\varphi_{w3} = 80,7\%$ . W każdym następnym cyklu pomiarowym skuteczność filtracji badanych wkładów przyjmuje coraz większe wartości (rys. 8).

W końcowej fazie pracy wkładów skuteczność filtracji przyjmuje wyższe wartości dla wyższych prędkości filtracji. Jest to wynik osadzania się na elementach struktury porowatej cząstek zanieczyszczeń, które tworzą warstwę spełniającą funkcję struktury porowatej dla następnych cząstek. Obok osadzania ziaren pyłu na elementach struktury następuje również osadzanie zanieczyszczeń na wcześniej zatrzymanych ziarnach.

Po pierwszym cyklu pomiarowym w powietrzu oczyszczonym przez wkłady filtracyjne znajdował się pył zawierający ziarna o maksymalnym rozmiarze w zakresie  $d_{zmax} = 23,8 \div 27,8$   $\mu\text{m}$ , przy czym wyższe wartości dotyczą pracy wkładu przy wyższych prędkościach filtracji. Ziarno pyłu o największym rozmiarze  $d_{zmax}$  znajdujące się w strumieniu powietrza wylotowego z wkładu filtracyjnego wyraża dokładność filtracji w kolejnym cyklu pomiarowym. Wraz z upływem czasu pracy wkładów filtracyjnych (wzrostem masy pyłu na wkładzie filtracyjnym) rozmiary ziaren pyłu w powietrzu oczyszczonym są coraz mniejsze. W końcowym okresie pracy wkładów włókninowych w strumieniu powietrza oczyszczonego pojawiają się pojedyncze ziarna pyłu o rozmiarze  $d_{zmax} = 7,8 \div 18,2$   $\mu\text{m}$ .

Przy małych prędkościach filtracji ziarna pyłu nie przemieszczają się w głąb przegrody, lecz osadzają się równomiernie na powierzchni włókien znajdujących się bliżej strony wlotowej przegrody. Przy dużych prędkościach filtracji ziarna pyłu, mając większą energię kinetyczną, przemieszczają się w głąb przegrody. Część z nich osadza się na powierzchni włókien znajdujących się bliżej strony wylotowej przegrody, a część, mająca znaczą prędkość, duże rozmiary i masę, opuszcza przegrodę. Stąd w powietrzu oczyszczonym za wkładem pracującym przy dużych prędkościach filtracji znajdują się ziarna pyłu o dużych rozmiarach.

Wraz ze wzrostem masy pyłu zatrzymanego przez badane wkłady filtracyjne opór przepływu  $\Delta p_w$  cały czas systematycznie rośnie, przy czym intensywność narastania oporu przepływu zwiększa się po przekroczeniu wartości współczynnika chłonności pyłu  $k_m = 250$  g/m<sup>2</sup>. Największą intensywność wzrostu oporu przepływu zaobserwowano dla wkładu badanego przy prędkości filtracji  $v_{F2} = 0,16$  m/s, a najmniejszą przy prędkości filtracji  $v_{F3} = 0,24$  m/s. Tę wartość oporu przepływu przyjęto jako kryterium zakończenia badań.

Wkład filtracyjny badany przy prędkości filtracji  $v_{F1} = 0,08$  m/s charakteryzuje się systematycznym i łagodnym narastaniem skuteczności filtracji. Maksymalną wartość skuteczności filtracji  $\varphi_{w1} = 92,7\%$  uzyskano po ostatnim cyklu pomiarowym przy współczynniku chłonności pyłu  $k_m = 1316$  g/m<sup>2</sup> i wartości oporu przepływu  $\Delta p_w = 3,05$  kPa, która była kryterium zakończenia badań.

Wkłady filtracyjne badane przy wyższych prędkościach filtracji wykazują większą intensywność narastania skuteczności, tym samym maksymalną wartość osiągają na wyższym poziomie ( $\varphi_{w2} = 97,8\%$ ,  $\varphi_{w3} = 97,2\%$ ), ale przy mniejszym współczynniku

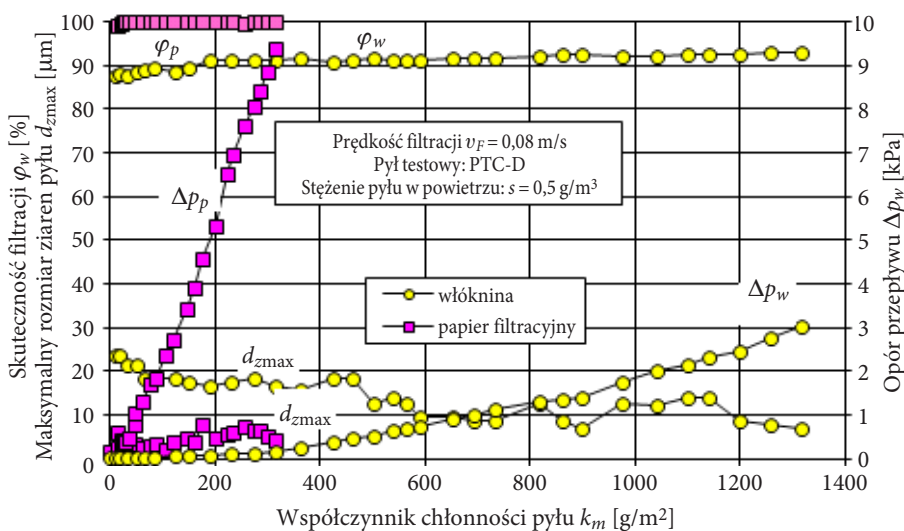


chłonności pyłu  $k_m$  niż wkład badany przy  $v_{F1} = 0,08$  m/s (rys. 8). Po osiągnięciu maksymalnej wartości następuje spadek skuteczności filtracji badanych wkładów, a w powietrzu oczyszczonym występują coraz większe rozmiary ziaren  $d_{zmax}$  będące oznaką utraty właściwości filtracyjnych przegrody. Zjawiska takiego nie zaobserwowano dla wkładu badanego przy  $v_{F1} = 0,08$  m/s.

Ze względu na spadek skuteczności filtracji w końcowym etapie pracy wkładów filtracyjnych nr 2 i nr 3 nie uzyskano ustalonego oporu przepływu  $\Delta p_w = 3$  kPa. Tym samym współczynnik chłonności pyłu  $k_m$  obu wkładów przyjmuje mniejsze wartości, odpowiednio:  $k_m = 1126$  g/m<sup>2</sup> dla wkładu badanego przy prędkości filtracji  $v_{F2} = 0,16$  m/s i  $k_m = 1000$  g/m<sup>2</sup> przy  $v_{F3} = 0,24$  m/s.

Taki przebieg charakterystyk skuteczności i dokładności filtracji oraz oporów przepływu należy tłumaczyć tym, że zatrzymane w przegrodzie ziarna pyłu są źródłem powstawania wtórnych elementów struktury materiału filtracyjnego [16]. Kolejne ziarna pyłu osiadają nie tylko na włóknach, lecz także na wcześniej zatrzymanych ziarnach. Powstają rozrastające się często do znacznych rozmiarów aglomeraty, które wypełniają wolne przestrzenie między włóknami, co powoduje, że zatrzymywane są coraz mniejsze ziarna, ale jednocześnie następuje utrudniony przepływ aerozolu, czym należy tłumaczyć wzrost oporów przepływu wraz ze wzrostem masy zatrzymanego przez wkłady pyłu.

Na rysunku 9 pokazano (w celu porównania) wyniki analogicznych badań przeprowadzonych z wykorzystaniem papieru filtracyjnego i przedstawionych w [11, 12]. Wkład filtracyjny wykonany z papieru cechuje korzystniejszy przebieg charakterystyki



Rys. 9. Charakterystyki skuteczności filtracji  $\varphi_w = f(k_m)$ , oporów przepływu  $\Delta p_w = f(k_m)$  oraz wartości maksymalnych ziaren pyłu  $d_{zmax} = f(k_m)$  w funkcji współczynnika chłonności pyłu  $k_m$  włókninowego oraz papierowego wkładu filtracyjnego

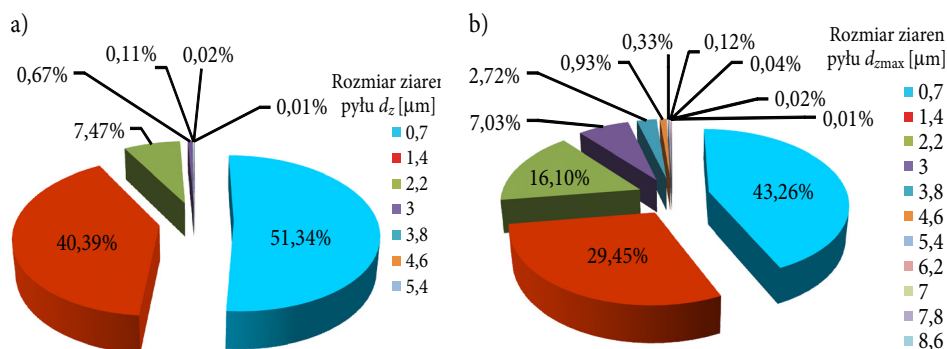
dokładności i skuteczności filtracji. Skuteczność filtracji papierowego wkładu filtracyjnego już na początku jego pracy przekracza 99%, po czym wzrasta do 99,9% i utrzymuje się na tym poziomie w dalszym okresie jego pracy. W początkowym okresie pracy wkładu rozmiar maksymalnych ziaren pyłu nie przekracza wartości  $d_{zmax} = 5,9 \mu\text{m}$ , po czym szybko stabilizuje się na poziomie  $d_{zmax} = 2,3 \div 3,9 \mu\text{m}$ . W końcowym okresie pracy wkładu z papieru filtracyjnego w strumieniu powietrza oczyszczonego pojawiają się pojedyncze ziarna pyłu o rozmiarze  $d_{zmax} = 7,5 \mu\text{m}$ .

Wraz ze wzrostem masy pyłu zatrzymanego przez papier filtracyjny opór przepływu  $\Delta p_w$  badanego wkładu cały czas systematycznie rośnie, a intensywność wzrostu jest większa niż analizowanych wcześniej wkładów włókninowych. Opór przepływu  $\Delta p_w = 3 \text{ kPa}$  wkład z papieru filtracyjnego osiąga przy współczynniku chłonności pyłu  $k_m = 125 \text{ g/m}^2$ . Tę samą wartość oporu  $\Delta p_w = 3 \text{ kPa}$  wkład włókninowy uzyskuje dopiero przy  $k_m = 1136 \text{ g/m}^2$ . Mniejsza intensywność wzrostu oporu przepływu wkładu włókninowego wynika ze znacznie większej niż papier grubości włókniny oraz mniejszej skuteczności.

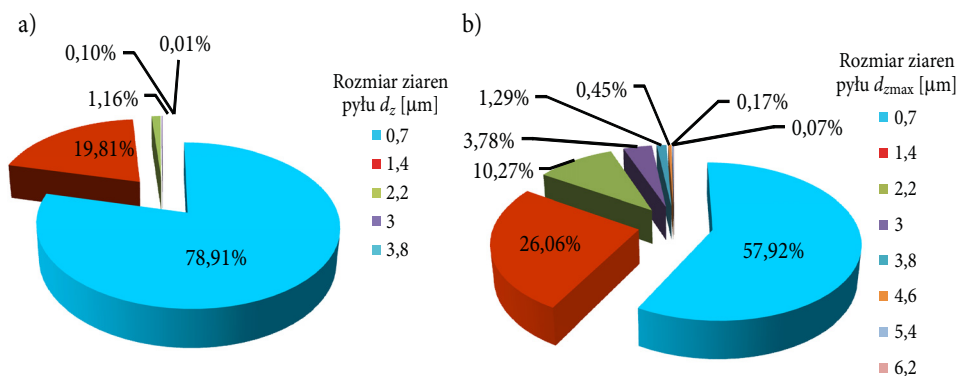
Na rysunkach 10-12 przedstawiono dla wybranych cykli badawczych procentowe udziały  $U_p$  ziaren pyłu z poszczególnych grup wymiarowych w całkowitej liczbie ziaren pyłu w strumieniu powietrza za wkładem filtracyjnym, wykonanym odpowiednio z papieru filtracyjnego oraz z włókniny. Prezentowane wyniki uzyskano przy prędkościach filtracji  $v_F = 0,08 \text{ m/s}$ . Udział procentowy  $U_{p_i}$  określono z zależności:

$$U_{p_i} = \frac{N_i}{N} = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^{32} N_i}, \quad (16)$$

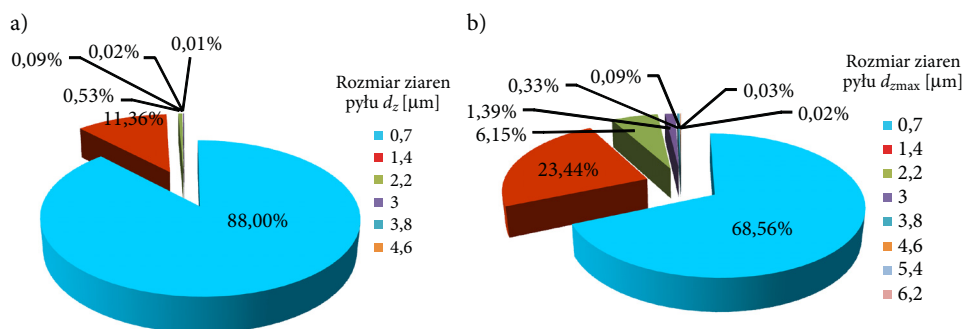
gdzie:  $N_i$  — liczba ziaren pyłu z  $i$ -tego przedziału wymiarowego;  
 $N$  — całkowita liczba ziaren pyłu za wkładem filtracyjnym.



Rys. 10. Skład granulometryczny pyłu podczas cyklu pomiarowego nr 1 za wkładem filtracyjnym: a) papierowym ( $k_m = 13,57 \text{ g/m}^2$ ); b) włókninowym ( $k_m = 9,767 \text{ g/m}^2$ )



Rys. 11. Skład granulometryczny pyłu podczas cyklu pomiarowego nr 8 za wkładem filtracyjnym: a) papierowym ( $k_m = 106,04 \text{ g/m}^2$ ); b) włókninowym ( $k_m = 123,42 \text{ g/m}^2$ )



Rys. 12. Skład granulometryczny pyłu podczas cyklu pomiarowego nr 15 za wkładem filtracyjnym: a) papierowym ( $k_m = 236,98 \text{ g/m}^2$ ); b) włókninowym ( $k_m = 426,60 \text{ g/m}^2$ )

Wraz ze wzrostem masy pyłu zatrzymywanego na wkładzie filtracyjnym w strumieniu powietrza za badanymi wkładami następował wzrost udziału cząstek pyłu o najmniejszych rozmiarach (poniżej  $1,4 \mu\text{m}$ ), a spadek udziałów ziaren pyłu o rozmiarach powyżej  $1,4 \mu\text{m}$ , co zgodne jest z teorią działania mechanizmów filtracji w przegrodzie porowatej. Podczas pierwszego cyklu pomiarowego udział cząstek pyłu poniżej  $1,4 \mu\text{m}$  w powietrzu za włókninowym wkładem filtracyjnym ma wartość  $Up_1 = 43,26\%$ . Podczas cyklu nr 8 nastąpił wzrost do  $Up_5 = 57,92\%$ , a podczas cyklu nr 15 do  $Up_5 = 68,56\%$  (rys. 10-12). Skład granulometryczny pyłu za papierowym wkładem filtracyjnym zmienia się w sposób analogiczny, z tym że udziały cząstek poniżej  $1,4 \mu\text{m}$  przyjmują odpowiednio większe wartości (rys. 10-12). Wynika z tego, że papier filtracyjny ma większą skuteczność i dokładność filtracji ziaren pyłu powyżej  $1,4 \mu\text{m}$  niż struktura włókninowa. Dlatego udział ziaren pyłu o tych rozmiarach w strumieniu powietrza za wkładem papierowym ma mniejsze wartości.

## 7. Podsumowanie

Przyczyną przyspieszonego zużycia dwóch współpracujących tarciowo powierzchni elementów silnika są twarde ziarna pyłu krzemionki  $\text{SiO}_2$  i korundu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o rozmiarach równych w danej chwili grubości filmu olejowego. Wszystkie ziarna pyłu powyżej  $1 \mu\text{m}$  powodują przyspieszone zużycie, jednak największą intensywność zużycia powodują ziarna pyłu o rozmiarach  $2\div 40 \mu\text{m}$ .

Do oczyszczania powietrza wlotowego silników spalinowych samochodów osobowych stosuje się filtry jednostopniowe z wkładem panelowym z plisowanego papieru filtracyjnego, a w samochodach produkcji japońskiej wkłady panelowe z plisowanej włókniny filtracyjnej lub wkłady filtracyjne włókninowe wykonane w postaci sztywnych wyprasek.

Wraz ze wzrostem masy pyłu  $m_{ZF}$  zatrzymanego na włókninowych wkładach filtracyjnych (wzrostem współczynnika chłonności  $k_m$ ) następuje powolny i systematyczny wzrost skuteczności i dokładności filtracji, a w końcowym etapie pracy wkładu gwałtowny wzrost oporu przepływu. Maksymalną skuteczność filtracji w zakresie  $\varphi_{w\text{max}} = 92,6\div 97,8\%$  i dokładność filtracji na poziomie  $d_{z\text{max}} = 7,8\div 18,2 \mu\text{m}$  badane wkłady włókninowe uzyskują dopiero przy współczynniku chłonności  $k_m = 1150 \text{ g/m}^2$ . Wkłady badane przy wyższych prędkościach filtracji ( $v_{F2} = 0,16 \text{ m/s}$ ,  $v_{F3} = 0,24 \text{ m/s}$ ) uzyskują wyższe wartości skuteczności filtracji niż wkład badany przy  $v_{F1} = 0,08 \text{ m/s}$ , jednak w końcowym etapie pracy następuje jej spadek oraz wzrost rozmiarów ziaren  $d_{z\text{max}}$ , co jest oznaką utraty właściwości filtracyjnych przegrody. Zjawiska takiego nie zaobserwowano dla wkładu badanego przy prędkości filtracji  $v_{F1} = 0,08 \text{ m/s}$ .

Wkłady wykonane z papieru filtracyjnego maksymalną skuteczność filtracji  $\varphi_{w\text{max}} = 99,5\%$  uzyskują już przy współczynniku chłonności  $k_m = 10\div 15 \text{ g/m}^2$ .

Wkłady filtracyjne włókninowe wykonane w postaci wyprasek uzyskują znacznie większe wartości współczynnika chłonności ( $k_m = 1150 \text{ g/m}^2$ ) niż wkłady filtracyjne wykonane z papieru ( $k_m = 190\div 240 \text{ g/m}^2$ ), ale przy znacznie mniejszej skuteczności ( $\varphi_{w\text{max}} = 92,6\div 97,8\%$ ) i dokładności filtracji ( $d_{z\text{max}} = 18,2 \mu\text{m}$ ). Wkłady filtracyjne wykonane z papieru filtracyjnego, badane w tych samych warunkach co włókniny, osiągają skuteczność filtracji  $\varphi_{w\text{max}} = 99,5\div 99,9\%$  i dokładność  $d_{z\text{max}} = 2,3\div 3,9 \mu\text{m}$ . Decyduje o tym luźna struktura włókien filtracyjnych oraz jej trzykrotnie większa grubość.

Początkowy okres filtracji badanych wkładów włókninowych charakteryzuje się mniejszą skutecznością i obecnością w powietrzu oczyszczonym ziaren pyłu o dużych ( $d_{z\text{max}} = 23,8\div 27,8 \mu\text{m}$ ) rozmiarach. Zjawisko to może mieć miejsce w czasie eksploatacji pojazdu (po wymianie wkładu filtracyjnego na nowy) i może być przyczyną przyspieszonego zużycia elementów silnika, a tym samym obniżenia jego trwałości.

Źródło finansowania: Praca Badawcza Statutowa PBS 935/WAT/2016.

Artykuł wpłynął do redakcji 25.04.2017 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 30.05.2017 r.

#### LITERATURA

- [1] BACZEWSKI K., HEBDA M., *Filtracja płynów eksploatacyjnych*, MCNEM, Radom, 1991/1992.
- [2] BORCHET M., *Projekt wstępny stanowiska do badania włókninowych wkładów filtracyjnych powietrza wlotowego silników samochodów osobowych*, praca inżynierska, Warszawa, 2017.
- [3] CHŁOPEK Z., JAKUBOWSKI A., *The examination of the reduction of particulate matter emission from motor vehicle braking system*, *Eksploatacja i Niezawodność — Maintenance and Reliability*, 4, 2010, 29-36.
- [4] CHŁOPEK Z., *Testing of hazards to the environment caused by particulate matter during use of vehicles*, *Eksploatacja i Niezawodność — Maintenance and Reliability*, 2, 2012, 160-170.
- [5] CHŁOPEK Z., JAKUBOWSKI A., *Badania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego pojazdu samochodowego*, *Eksploatacja i Niezawodność — Maintenance and Reliability*, vol. 4, 2009, 45-52.
- [6] Diesel Engine Air Filtration: *Materiały informacyjne firmy PALL Corporation*, USA, 2004.
- [7] DURST M., KLEIN G., MOSER N., *Filtration in Fahrzeugen. Materiały informacyjne firmy Mann + Hummel GMBH*, Ludwigsburg, Niemcy, 2005.
- [8] DZIUBAK T., *Zanieczyszczenia płynów eksploatacyjnych i ich wpływ na zużycie elementów silnika spalinowego pojazdu mechanicznego*, *Archiwum Motoryzacji*, t. 72, nr 2, 2016, s. 43-72.
- [9] DZIUBAK T., SZWEDKOWICZ S., *Właściwości eksploatacyjne włókninowych przegród filtracyjnych powietrza wlotowego silników spalinowych pracujących w układach jedno- i dwustopniowych*, *Eksploatacja i Niezawodność*, vol. 17, no. 4, 2015, s. 519-527.
- [10] DZIUBAK T., SZWEDKOWICZ S., *Operating properties of non-woven fabric panel filters for internal combustion engine inlet air in single and two-stage filtration systems*, *Eksploatacja i Niezawodność — Maintenance and Reliability*, 4, 2015, 519-527.
- [11] DZIUBAK T., *Analiza procesu filtracji powietrza wlotowego do silników pojazdów specjalnych*, rozprawa habilitacyjna, WAT, Warszawa, 2008.
- [12] DZIUBAK T., SZWEDKOWICZ S., *Badania eksperymentalne papieru filtracyjnego pracującego w systemie „cyklon-przegroda porowata”*, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, vol. 62, 1, 2013, 271-286.
- [13] DZIUBAK T., *Filtracja powietrza wlotowego do silników spalinowych pojazdów mechanicznych*, WAT, Warszawa, 2012.
- [14] DZIUBAK T., *The research of air filtration process on paper partition in the Cyclone-porous partition system*, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2(14), 2007, 115-124.
- [15] DZIUBAK T., *Problemy filtracji powietrza zasysanego do spalinowych silników pojazdów mechanicznych*, *Biuletyn WAT*, vol. 60, nr 3, 2006, s. 77-95.
- [16] DZIUBAK T., *Metodyka badań charakterystyk papierów filtracyjnych do filtru powietrza pojazdu eksploatowanego w warunkach dużego zapylenia powietrza*, *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN*, z. 4(136), 2003, s. 101-117.
- [17] FITCH J., *Clean Oil Reduces Engine Fuel Consumption*, *Practicing Oil Analysis Magazine*, 2002, 11-12.
- [18] GRAFE T., GOGINS M., BARRIS M., SCHAEFER J., CANEPA R., *Nanofibers in Filtration Applications in Transportation*, *Filtration 2001 International Conference and Exposition*, Chicago, Illinois, December 3-5, 2001.

- [19] JAROSZCZYK T., FALLON S.L., DORGAN J.E., MOY J.J., SONSALLA T.P., HENKE B., *Development of High Dust Capacity Multi-Media Engine Air Filters*, 16<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exposition 2003 Technical Sessions Papers Reno–Nevada, June 17-20, 2003.
- [20] JAROSZCZYK T., *Air Filtration in Heavy-Duty Motor Vehicle Applications*, Proc. Dust Symposium III Vicksburg MS, 15-17 September 1987.
- [21] JAROSZCZYK T., *Problemy filtracji powietrza w silnikach spalinowych eksploatowanych w ciężkich warunkach*, Silniki Spalinowe, nr 2, 1978.
- [22] Korea Filtration Technologies Co., *Performance mill sheet, materiały udostępnione przez WIX Filtron*, Gostyń, 2012.
- [23] KOSZAŁKA G., SUCHECKI A., *Changes in performance and wear of small diesel engine during durability test*, Combustion Engines, 3(162), 2015, 34-40.
- [24] MYSŁOWSKI J., *Zanieczyszczenie powietrza przez pojazdy samochodowe*, WKŁ, Warszawa, 2011.
- [25] SAKTHIVEL S., EHZIL ANBAN J.J., RAMACHANDRAN T., *Development of Needle-Punched Nonwoven Fabrics from Reclaimed Fibers for Air Filtration Applications*, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 9, 2014, 149-154.
- [26] SCHAEFFER J.W., OLSON L.M., *Air Filtration Media for Transportation Applications*, Filtration & Separation, vol. 35, no 2, 1998.
- [27] PN-ISO 5011, *Filtry powietrza do silników spalinowych i sprzęzarek. Badanie działania*, PKN, 1994.
- [28] SZWEDKOWICZ S., *Badania charakterystyk włóknin filtracyjnych jako drugi stopień filtracji powietrza wlotowego silnika spalinowego*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2015.
- [29] [www.retopfibre.en.alibaba.com](http://www.retopfibre.en.alibaba.com), 25.05.2017; data ostatniego dostępu 25.05.2017.

T. DZIUBAK, M. BORCHET

### Study of properties of nonwoven filter cartridges for the intake air of a car engine

**Abstract.** The sources of atmospheric air pollution are presented. It has been shown that dust is a major component of the intake air of internal combustion engines. The impact of dust on the accelerated wear of the engine components and the influence of T-P-C system wear on engine operation were analysed. The parameters of the air filters are described and defined. The properties of nonwovens and papers, of which filters used in the filtration intake air internal combustion engines of motor vehicles are made, were analysed. Conditions and methodology for testing nonwoven air filter cartridge for passenger cars were developed. A research desk with a particle counter was presented. The results of the study on efficiency characteristics, filtration accuracy and flow resistance for three different filtration rates (three nonwoven cartridges) were presented. There were much smaller levels of efficiency ( $\varphi_w = 92\div 98\%$ ) and accuracy for nonwoven filter contribution in comparison with paper ones ( $\varphi_w = 95.5\div 99.9\%$ ). There were observed higher values of the absorbency factor  $k_m$  for nonwoven cartridge ( $k_m = 1000\div 1300 \text{ g/m}^2$ ) in relation to the paper cartridge ( $k_m = 190\div 220 \text{ g/m}^2$ ).

**Keywords:** engine, air filter, nonwoven contribution, efficiency and accuracy of filtration, flow resistance, coefficient of dust absorbency, grain size

**DOI:** 10.5604/01.3001.0010.1895