



Analiza właściwości materiałów filtracyjnych z dodatkiem nanowłókien

TADEUSZ DZIUBAK, YURII YENDZHEIOVSKYI

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

Streszczenie. Przedstawiono właściwości nanowłókien, metody ich wytwarzania oraz obszary zastosowania. Zaprezentowano oraz przeanalizowano parametry charakteryzujące materiały filtracyjne z dodatkiem nanowłókien. Opracowano metodykę badań charakterystyki aerodynamicznej oraz charakterystyki: skuteczności, dokładności i oporu przepływu wkładów filtracyjnych z dodatkiem nanowłókien w zależności od współczynnika chłonności pyłu k_m . Przedstawiono charakterystyczne parametry filtracyjne materiałów z dodatkiem nanowłókien. Wykonano pięć wkładów różniących się materiałem filtracyjnym z dodatkiem nanowłókien oraz bez tej warstwy. Opracowano warunki badań oraz przygotowano stanowisko badawcze. Przeprowadzono badania charakterystyk aerodynamicznych wykonanych wkładów filtracyjnych oraz charakterystyk skuteczności i dokładności filtracji i oporów przepływu wkładu standardowego (celulozowego), a także z dodatkiem nanowłókien. Potwierdzono pozytywny wpływ warstwy nanowłókien na wzrost skuteczności i dokładności filtracji powietrza wlotowego do silnika. Dokonano oceny składu granulometrycznego pyłu w powietrzu za standardowym wkładem filtracyjnym i wkładem z dodatkiem nanowłókien.

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

DOI: 10.5604/01.3001.0013.1475

1. Wstęp

Powietrze atmosferyczne czerpane z otoczenia jest niezbędnym składnikiem procesu spalania paliwa w cylindrach silników pojazdów mechanicznych. Z uwagi na fakt, że zawarte w powietrzu zanieczyszczenia będące w stanie gazowym (organiczne i nieorganiczne) oraz zanieczyszczenia pyłowe, szczególnie te pochodzenia

mineralnego [2, 3, 5, 6-9], mają destrukcyjny wpływ na elementy silnika, zachodzi konieczność dokładnego jego oczyszczenia. Uważa się, że wszystkie ziarna pyłu o średnicach większych niż $d_z \geq 1 \mu\text{m}$ powodują przyspieszone zużycie elementów silników spalinowych [2, 3, 6, 7].

Obecnie dominującym materiałem filtracyjnym stosowanym do filtracji powietrza wlotowego silników samochodów są papiery filtracyjne, które charakteryzują się dokładnością zatrzymywania ziaren $d_z \geq 5 \mu\text{m}$, skutecznością filtracji $\varphi_w = 99,9\%$, niewielką grubością $g_m = (0,4 \div 0,8) \text{ mm}$, a tym samym małą ($k_m = 200 \div 250 \text{ g/m}^2$) chłonnością pyłu limitowaną dopuszczalnym oporem przepływu Δp_{fdop} filtru powietrza [4, 6, 7-9]. Zwiększenie skuteczności filtracji ziaren pyłu poniżej $d_z = 5 \mu\text{m}$ jest możliwe poprzez nałożenie dodatkowej warstwy z nanowłókien na standardowe podłoże filtracyjne. Taką technologię stosują znane firmy produkujące filtry i materiały filtracyjne, na przykład Donaldson i Mann + Hummel.

W dostępnej literaturze nieczęsto spotyka się dane charakteryzujące właściwości filtracyjne materiałów z dodatkiem nanowłókien, które stosowane są do filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych samochodów i pojazdów specjalnych. Stąd celowe jest przeprowadzenie rozpoznawczych badań eksperymentalnych materiałów filtracyjnych z dodatkiem nanowłókien w zakresie skuteczności i dokładności filtracji oraz oporów przepływu. Badania takie są kosztowne i pracochłonne, jednak jest to najbardziej wiarygodna metoda badawcza.

2. Właściwości materiałów filtracyjnych z dodatkiem nanowłókien

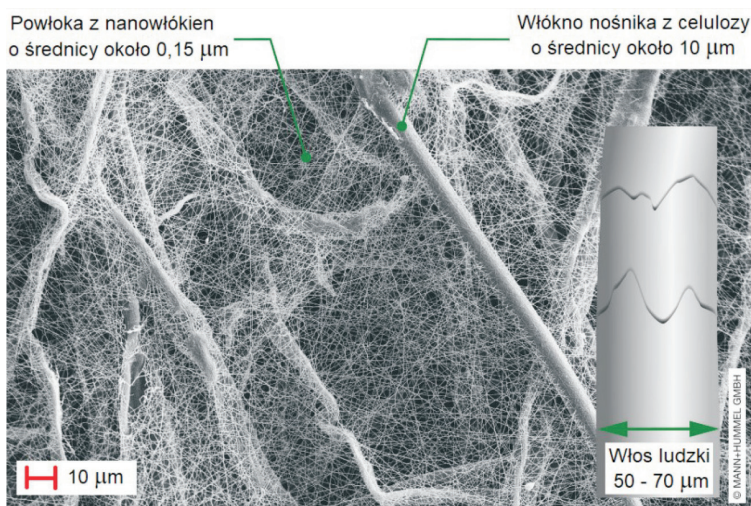
Rozwój technologii produkcji włókien spowodował, że coraz częściej do budowy przegród filtracyjnych stosowane są nanowłókna. Pojęcie to jest bardzo szerokie i odnosi się zazwyczaj do włókien o średnicy mniejszej niż $1 \mu\text{m}$. Średnica nanowłókien zależy od procesu wytwarzania i użytego polimeru. Pojęcie nanowłókna stosuje się w tej chwili do włókien, które produkowane są technologią electrospinningu (elektroprzędzenia) lub meltblown [12-14, 20, 22, 26].

Electrospinning jest procesem otrzymywania włókien ze stopionych polimerów lub ich roztworów z zastosowaniem wysokiego napięcia. Ta nowoczesna technologia, przy wykorzystaniu odpowiedniego polimeru i systemu rozpuszczania, umożliwia w obecnej chwili wytwarzanie włókien o średnicach w zakresie od 3 nm do 1000 nm . Praktycznie każdy polimer może być otrzymany w postaci włókien metodą electrospinningu. To, czy polimer po rozpyleniu elektrostatycznym przybierze postać kulistych cząstek, czy włókien, zależy od jego masy cząsteczkowej, oddziaływań pomiędzy łańcuchami polimeru, rodzaju zastosowanego rozpuszczalnika, użytego napięcia i parametrów geometrycznych układu oraz dodatków poprawiających parametry procesu electrospinningu.

W technice motoryzacyjnej wykorzystywane są nanowłókna o bardzo małych średnicach, wynoszących około $(50 \div 500)$ nm. Dla porównania [14, 31]:

- grubość włosa ludzkiego $(20 \div 80)$ μm (rys. 1),
- grubość włókna celulozowego — $(10 \div 20)$ μm (rys. 1),
- średnica krwinki czerwonej — około 7000 nm,
- szerokość wstążki DNA — około 2,5 nm,
- rząd 6 atomów węgla — 1 nm,
- średnica atomu krzemu — około 0,23 nm.

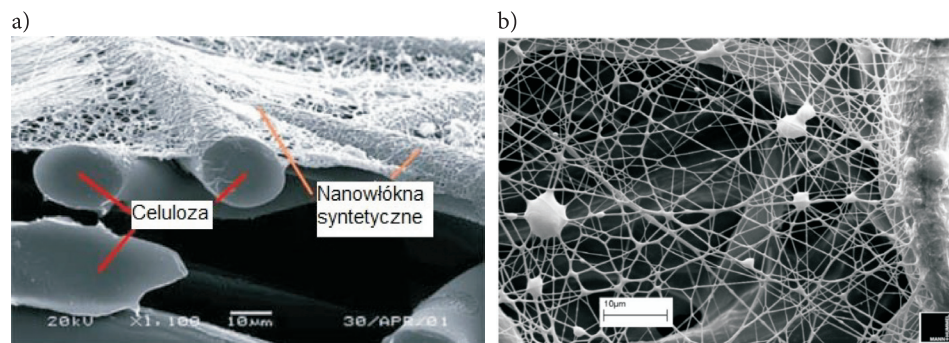
Nanowłókna charakteryzują się znaczną długością oraz niewielkim przekrojem poprzecznym, którego średnica jest około 100 razy mniejsza od długości. Mają właściwości znacznie różniące się od właściwości włókien standardowych — celulozowych. Ze względu na duży iloraz pola powierzchni do masy, nanowłókna mają duże pole powierzchni właściwej, co daje im dobre właściwości wytrzymałościowe. Inna jest też zwilżalność nanowłókien i reakcja na nie komórek biologicznych.



Rys. 1. Widok materiału z nanowłókien ($d_{wf} = 0,15 \mu\text{m}$) pod mikroskopem elektronowym rastrowym (powiększenie 1000) w porównaniu do włosa ludzkiego $d_w = 50 \div 70 \mu\text{m}$ i włókna nośnika celulozowego ($d_c = 10 \mu\text{m}$) [29]

Nanowłókna, oprócz filtracji powietrza, mają wiele możliwych zastosowań technicznych i komercyjnych w następujących dziedzinach: inżynierii tkankowej, dostawy (uwalniania) leków, diagnozy zmian rakotwórczych, bateriach litowo-powietrznych, czujnikach optycznych [18, 27].

Ze względu na ograniczone właściwości mechaniczne cienkiej warstwy nanosieci, nakłada się ją na podłoże (rys. 2) z konwencjonalnych materiałów filtracyjnych (celuloza, poliester), które mają większą wytrzymałość.

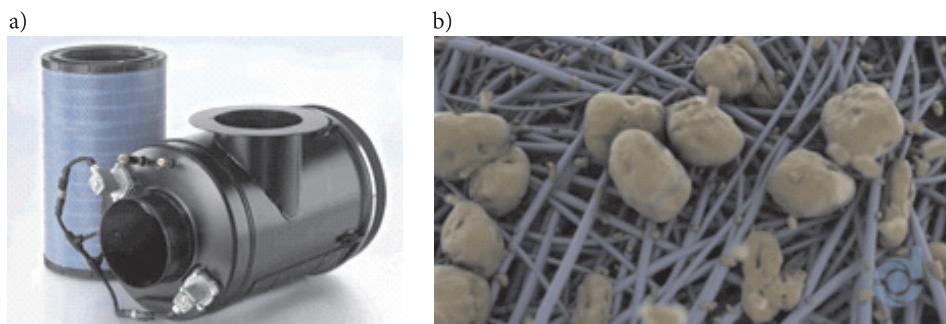


Rys. 2. Nanowłókna naniesione na podłoże z celulozy [15]: a) widok przekroju, b) widok z góry [25]

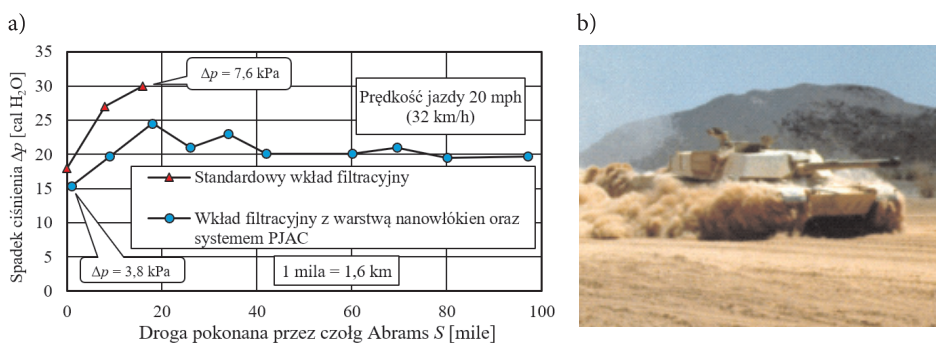
Nałożona na podłoże o dużych porach ($30 \div 50 \mu\text{m}$) nanosieć stanowi ogromne pole powierzchni włókien dla cząstek w przepływającym powietrzu. Dlatego bardzo małe cząstki ($d_z < 5 \mu\text{m}$), które dotychczas „przechodziły” przez duże pory złoża standardowego, będą przechwytywane przez nanowłókna w wyniku działania mechanizmów filtracji. Przejawiać się to będzie dużą początkową skutecznością i dokładnością filtracji, chociaż „placik filtracyjny” jeszcze się nie utworzył. Oznacza to doskonałą ochronę silnika od samego początku działania filtru.

W układzie zasilania powietrzem silnika turbinowego czołgu Abrams M1 (rys. 3a) zastosowano filtr powietrza z wkładem filtracyjnym z dodatkiem nanowłókien oraz system automatycznego impulsowego oczyszczenia wkładu filtracyjnego PJCA (Pulse Jet Air Cleaner) [1, 2, 19, 21, 27]. Taka konstrukcja filtru zapewnia kilkukrotne wydłużenie czasu jego użytkowania, a tym samym wydłuża czas eksploatacji pojazdu bez konieczności obsługiwanego filtru. Zasada działania systemu PJAC polega na tym, że w czasie gdy opór przepływu filtru nie przekroczy dopuszczalnej wartości, proces filtracji powietrza odbywa się tak jak w każdym filtrze pojazdu mechanicznego. Zanieczyszczenia zatrzymywane są na powierzchni warstwy nanowłókien (rys. 3b). Po osiągnięciu określonej wartości oporu przepływu, zostaje uruchomiony na czas ($0,1 \div 0,35$) s modulator ciśnienia, wytwarzający impuls w postaci sprężonego powietrza o ciśnieniu ($0,4 \div 0,6$) MPa. Sprężone powietrze, płynąc w stronę przeciwną do strony przepływu powietrza, podczas procesu filtracji wydmuchuje cząstki pyłu z powierzchni wkładu filtracyjnego, które następnie opadają do osadnika pyłu [21].

Filtr powietrza ze standardowym wkładem filtracyjnym zamontowany w czołgu Abrams, który porusza się w kolumnie w warunkach pustynnych, dopuszczalną wartość oporu przepływu $\Delta p_{dop} = 7,6 \text{ kPa}$ (30 cali H_2O) osiągnął po przejechaniu około 25 km (16 mil) – rys. 4. Z chwilą gdy wkład filtracyjny z warstwą nanowłókien wyposażony w system automatycznego impulsowego oczyszczenia osiągnie maksymalną wartość oporu przepływu około 6,3 kPa (25 cali H_2O), zostanie uruchomiony system PJAC. Po usunięciu pyłu z warstwy nanowłókien opór przepływu maleje do wartości około 5 kPa (20 cali H_2O), a następnie utrzymuje się na tym poziomie.



Rys. 3. System automatycznego oczyszczania wkładu filtracyjnego PJAC: a) filtr powietrza firmy Donaldson z wkładem filtracyjnym z dodatkiem nanowłóki, b) cząstki pyłu zatrzymane na powierzchni wkładu filtracyjnego, stosowanego w systemie filtracji powietrza PJAC [30]



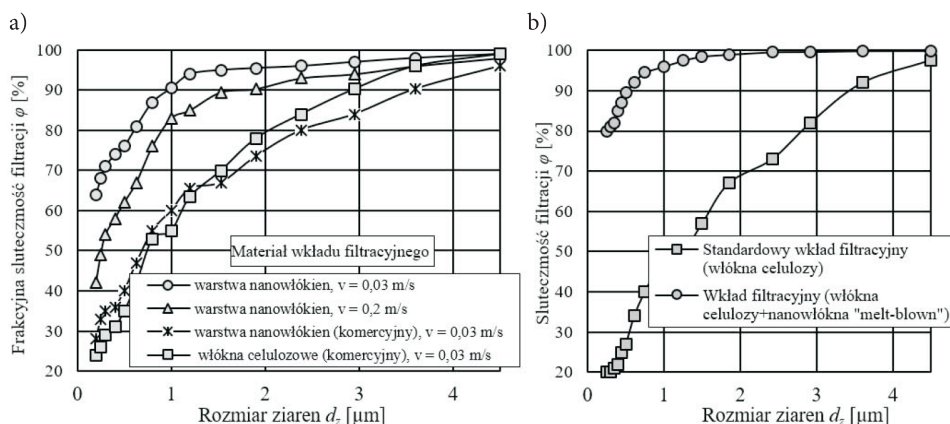
Rys. 4. a) spadek ciśnienia na filtrze powietrza ze standardowym wkładem filtracyjnym oraz wkładem filtracyjnym z warstwą nanowłóki i systemem automatycznego oczyszczania (PJAC) w zależności od drogi pokonanej przez czołg Abrams M1 poruszający się w kolumnie po pustyni z prędkością 32 km/h, b) czołg Abrams M1, w którym zamontowano PJAC [14]

3. Analiza parametrów charakteryzujących materiały filtracyjne z dodatkiem nanowłóki

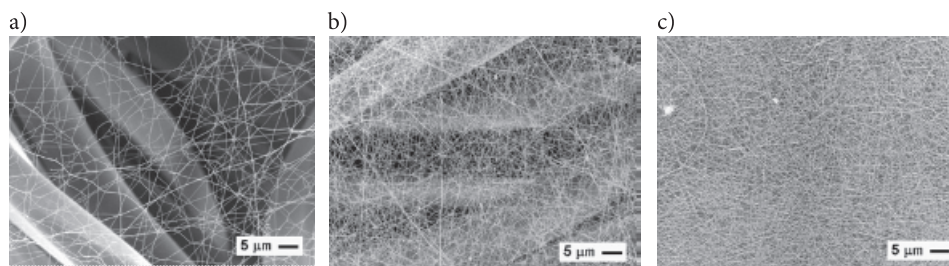
Nanowłókna są nakładane na podłoże, które zazwyczaj ma dużą wytrzymałość i jest wykonane z ekonomicznie korzystnego (taniego) materiału o stosunkowo niskiej skuteczności filtracji $\varphi_f \leq 60\%$ dla ziaren pyłu z zakresu średnic $1 \div 5 \mu\text{m}$ [9]. Warstwa nanowłóki nałożona na powierzchnię podłoża zdecydowanie podnosi skuteczność filtracji, szczególnie ziaren pyłu poniżej $5 \mu\text{m}$, co pokazano na rysunku 5.

Skuteczność i dokładność filtracji oraz opór przepływu materiałów filtracyjnych z dodatkową warstwą nanowłóki zależy od struktury podłoża (rodzaju materiału) oraz grubości warstwy nanowłóki. W pracy [16] przedstawiono badania

skuteczności filtracji czterech próbek wykonanych z różnych materiałów filtracyjnych: próbka 1 — włóknina nietkana, próbka 2 — dzianina, próbka 3 — włóknina tkana, próbka 4 — szarmeza (włóknina jedwabna), na które nałożono warstwę nanowłókien o gramaturze: $g_m = 0,02 \text{ g/m}^2$, $g_m = 0,1 \text{ g/m}^2$, $g_m = 0,5 \text{ g/m}^2$. Zdjęcia z mikroskopu SEM dla próbki nr 3 z warstwą nanowłókien o podanych gramaturach przedstawiono na rysunku 6. Zwiększanie grubości warstwy nanowłókien powoduje, że struktura podłoża staje się coraz mniej widoczna.



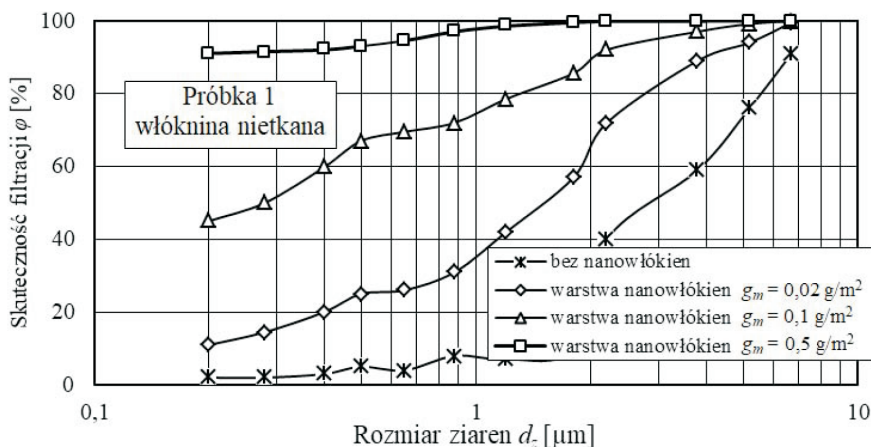
Rys. 5. Skuteczność filtracji wkładów filtracyjnych z włókna celulozowego oraz celulozy z dodatkiem nanowłókien [14, 17]



Rys. 6. Zdjęcia z mikroskopu SEM dla próbki nr 3 z warstwą nanowłókien o gramaturze: a) $0,02 \text{ g/m}^2$, b) $0,1 \text{ g/m}^2$, c) $0,5 \text{ g/m}^2$ [16]

Wyniki badań skuteczności filtracji z naniesionymi warstwami nanowłókien oraz bez tej warstwy dla próbki nr 1 przedstawiono na rysunku 7.

Skuteczność filtracji badanego materiału (próbka 1) bez warstwy nanowłókien jest bardzo niska i dla ziaren pyłu o rozmiarach poniżej $1 \mu\text{m}$ osiąga wartość poniżej 10%. Nieznaczna warstwa nanowłókien ($g_m = 0,02 \text{ g/m}^2$) nałożona na podłoże zwiększa skuteczność filtracji do 40%. Wraz ze wzrostem grubości warstwy nanowłókien (gramatury g_m) skuteczność filtracji wzrasta i dla $g_m = 0,5 \text{ g/m}^2$ ma wartość 98%.



Rys. 7. Skuteczność filtracji materiału próbki nr 1 bez warstwy nanowłókn oraz z warstwą nanowłókn o gramaturze jednostkowej $g_m = 0,02 \text{ g/m}^2$, $g_m = 0,1 \text{ g/m}^2$ oraz $g_m = 0,5 \text{ g/m}^2$ [16]

4. Cel i przedmiot badań

Celem badań była ocena oraz porównanie właściwości filtracyjnych — skuteczności i dokładności filtracji oraz oporów przepływu wkładów filtracyjnych wykonanych z różnych materiałów filtracyjnych — poprzez wyznaczenie ich następujących charakterystyk:

- aerodynamicznej $\Delta p_w = f(Q_w)$,
- dokładności filtracji $d_{zmax} = f(k_m)$,
- skuteczności filtracji $\varphi_w = f(k_m)$,
- oporu przepływu $\Delta p_w = f(k_m)$,

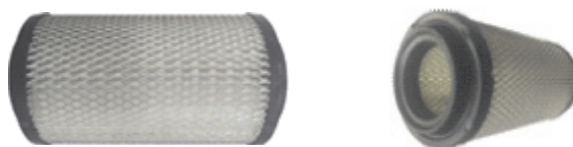
gdzie: k_m — współczynnik chłonności określający całkowitą masę pyłu zatrzymaną na powierzchni czynnej materiału filtracyjnego o polu $A_w = 1 \text{ m}^2$, wyrażony zależnością:

$$k_m = \frac{m_w}{A_w} [\text{g/m}^2]. \quad (1)$$

Przedmiotem badań podczas wykonywania charakterystyk aerodynamicznych $\Delta p_w = f(Q_w)$ było pięć cylindrycznych wkładów filtracyjnych tego samego typu (rys. 8) o jednakowych wymiarach oraz tym samym polu powierzchni filtracyjnej $A_w = 0,153 \text{ m}^2$, lecz różniących się materiałem filtracyjnym.

Dla ułatwienia badań i analizy wyników wkłady, w zależności od materiału filtracyjnego, oznaczono umownie: A (celuloza), B (celuloza i poliester), C (celuloza i poliester oraz nanowłókna), D (poliester), E (poliester i nanowłókna). Parametry

badanych materiałów filtracyjnych podano w tabeli 1. Zwraca uwagę trzykrotnie większa przepuszczalność powietrza oraz dwukrotnie większy rozmiar porów materiału filtracyjnego A (celuloza) od pozostałych materiałów.



Rys. 8. Badany wkład filtracyjny

Przedmiotem badań podczas wykonywania charakterystyk skuteczności $\varphi_w = f(k_m)$ i dokładności filtracji $d_{zmax} = f(k_m)$ oraz oporów przepływu $\Delta p_w = f(k_m)$ były dwa wkłady filtracyjne: A (celuloza), C (celuloza i poliester z warstwą nanowłókna).

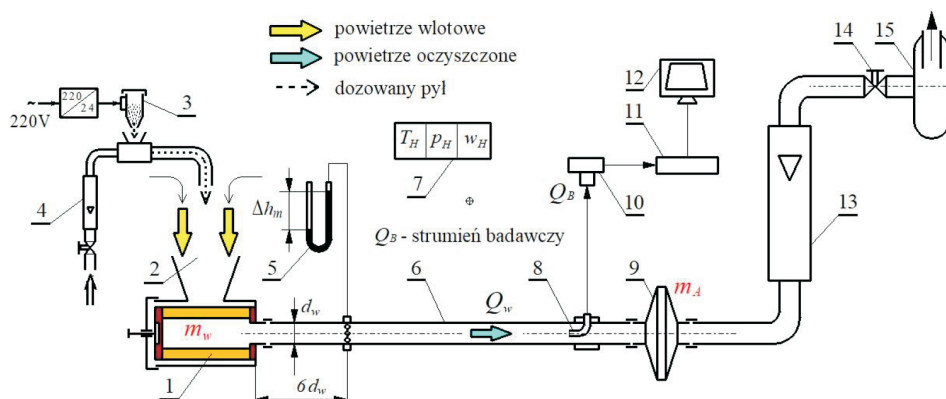
TABELA 1

Parametry badanych materiałów filtracyjnych [27]

Oznaczenie	Materiał filtracyjny	Przepuszczalność q_p [m ³ /m ² /h] przy 200 [Pa]	Gramatura g_m [g/m ²]	Grubość g_z [μm]	Rozmiar porów d_p [μm]
A	Celuloza	3017	121	610	79
B	Celuloza i poliester	540	130	350	58
C	Celuloza i poliester oraz nanowłókna	660	120	300	48
D	Poliester	650	180	500	–
E	Poliester i nanowłókna	525	180	500	–

5. Metodyka i warunki badań

Badania przeprowadzono na specjalnie zbudowanym w tym celu stanowisku (rys. 9), które umożliwia wykonywanie podstawowych charakterystyk wkładów filtracyjnych w zakresie strumienia powietrza do $Q_w = 100$ m³/h i stężeniu pyłu w powietrzu do 2 g/m³.



Rys. 9. Schemat funkcjonalny stanowiska do badań wkładów filtracyjnych: 1 – wkład filtracyjny, 2 – komora pyłowa, 3 – dozownik pyłu, 4 – rotametr, 5 – manometr typu U-rurka, 6 – przewód pomiarowy, 7 – zestaw do pomiaru wilgotności, temperatury oraz ciśnienia powietrza otoczenia, 8 – sonda pomiarowa, 9 – filtr absolutny, 10 – sensor licznika cząstek, 11 – mikroprocesor licznika cząstek, 12 – komputer pomiarowy, 13 – rotametr, 14 – zawór regulacji wartości strumienia przepływającego powietrza, 15 – wentylator ssawny

Zasadniczym elementem stanowiska jest papierowy cylindryczny wkład filtracyjny, ustawiony poziomo w komorze pyłowej, która zamocowana jest sztywno do podstawy stanowiska. W odległości $6d_w$ w przewodzie pomiarowym za badanym wkładem filtracyjnym (gdzie d_w – średnica wewnętrzna przewodu wylotowego z wkładu filtracyjnego) podłączony jest manometr cieczowy typu U-rurka przeznaczony do pomiaru spadku ciśnienia statycznego Δh_m za badanym wkładem filtracyjnym, a tym samym określania oporu przepływu wkładu filtracyjnego Δp_w .

Stanowisko zostało wyposażone w licznik cząstek stałych Pamas-2132 z sensorem HCB-LD-2A-2000-1. Licznik rejestruje liczbę i rozmiary ziaren pyłu w strumieniu powietrza za badanym wkładem filtracyjnym w zakresie $0,7 \div 100 \mu\text{m}$ w $i = 32$ przedziałach pomiarowych, ograniczonych średnicami ($d_{zimin} \div d_{zimax}$).

W odpowiedniej odległości za badanym filtrem umieszczona jest centralnie w osi przewodu końcówka sondy pomiarowej, którą następuje zasysanie powietrza do sensora licznika cząstek. Przewód pomiarowy zakończony jest filtrem absolutnym, który zabezpiecza przed przedostawaniem się pyłu do rotametru, a jednocześnie jest filtrem mierniczym. Opór przepływu Δp_w wkładu określano jako spadek ciśnienia statycznego w przewodzie wylotowym w odległości $6d_w$ od krawędzi otworu wylotowego wkładu na podstawie wskazań Δh_{mj} [mm H₂O] manometru cieczowego typu U-rurka, zgodnie z zależnością:

$$\Delta p_{wj} = \frac{\Delta h_{mj}}{1000} \cdot 9,807 \text{ [kPa]}. \quad (2)$$

Charakterystyki dokładności $d_{zmax} = f(k_m)$, skuteczności filtracji $\varphi_w = f(k_m)$ oraz oporu przepływu $\Delta p_w = f(k_m)$ określono dla prędkości filtracji $v_{Fw} = 0,1$ m/s. Dla filtrów samochodów osobowych wartość maksymalnej prędkości filtracji papierów zawiera się w zakresie $0,07 \div 0,12$ m/s [4, 5, 8, 10, 24]. Dla przyjętej prędkości $v_{Fw} = 0,1$ m/s obliczona według poniższej zależności maksymalna wartość strumienia badawczego ma wartość $Q_{wmax} = 56$ m³/h.

$$Q_{wmax} = A_w \cdot v_{Fw} \cdot 3600 \text{ [m}^3/\text{h]}. \quad (3)$$

Stężenie pyłu w powietrzu ustalono zgodnie z normą PN-ISO 5011 na poziomie $s = 0,5$ g/m³. Stosowano pył testowy PTC-D o maksymalnym rozmiarze ziaren $d_z = 80$ μm, będący krajowym zamiennikiem pyłu testowego AC fine, którego skład chemiczny i granulometryczny podano w [23].

Czas trwania cyklu pomiarowego τ_p , czas równomiernego dozowania pyłu do obudowy, w której znajduje się badany cylindryczny wkład filtracyjny, ustalono na $\tau_p = 3$ minuty w początkowym okresie filtracji. Wraz ze wzrostem skuteczności filtracji należy wydłużyć czas cyklu pomiarowego do $\tau_p = 6$ minut, a następnie do 12 minut.

Przed rozpoczęciem badań określono masę badanego wkładu filtracyjnego m_w oraz masę wkładu filtra absolutnego m_A . W trakcie badań dozowano równomiernie pył w określonym czasie do komory pyłowej, w której był zamontowany badany wkład filtracyjny. Około 60 s przed przewidywanym zakończeniem pomiaru (czas równomiernego dozowania pyłu) uruchamiano w liczniku cząstek Pamas procedurę pomiaru liczby cząstek pyłu i ich rozmiarów. Z chwilą zakończenia cyklu pomiarowego odczytywano wartość spadku ciśnienia — Δh_{mj} za wkładem filtracyjnym. Po każdym cyklu pomiarowym określano masę badanego wkładu filtracyjnego — m_{wj} oraz masę wkładu filtra absolutnego — m_{Aj} . Skuteczność filtracji określono metodą wagową według zależności:

$$\varphi_{wj=1} = \frac{m_{wj=1}}{m_{wj=1} + m_{Aj=1}} 100\%. \quad (4)$$

Charakterystyki aerodynamiczne $\Delta p_w = f(Q_w)$ pięciu wkładów filtracyjnych wykonano w zakresie strumienia powietrza $Q_w = (8 \div 56)$ m³/h dla ośmiu punktów pomiarowych, zaczynając od $Q_{w1} = 8$ m³/h do $Q_{w8} = 56$ m³/h, powtarzając procedurę pomiaru spadku ciśnienia dla każdego wkładu pięciokrotnie.

Dokładność filtracji wkładu określano jako największy rozmiar ziarna pyłu $d_z = d_{zmax}$ znajdującego się w danym cyklu badawczym w strumieniu powietrza za wkładem filtracyjnym.

Wartość współczynnika chłonności pyłu k_{mj} wyznaczano z zależności:

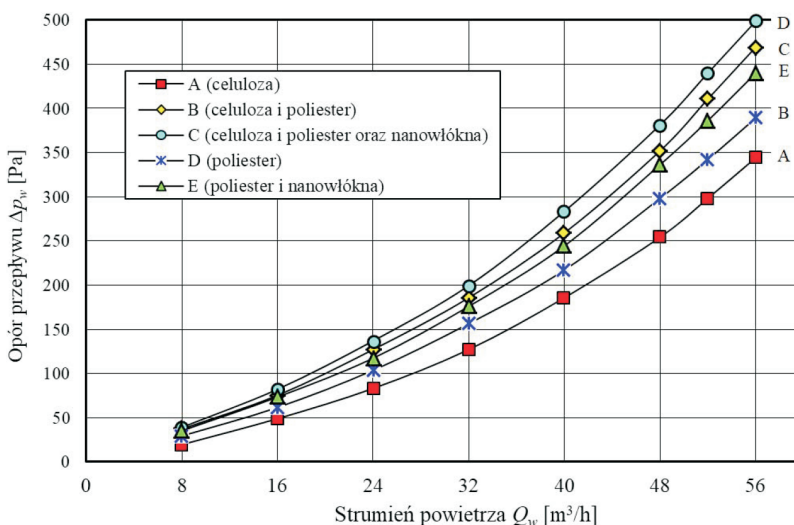
$$k_{mj} = \frac{\sum m_{zj}}{A_c} \text{ [g/m}^2\text{]} \quad (5)$$

Udział U_{pj} liczby N_j ziaren pyłu z każdego przedziału pomiarowego ($d_{zjmin} \div d_{zjmax}$) w całkowitej liczbie ziaren pyłu N w powietrzu za wkładem filtracyjnym (liczba ziaren pyłu ze wszystkich przedziałów pomiarowych j) wyznaczano, wykorzystując zależność:

$$U_{pj=1} = \frac{N_j}{N} = \frac{N_{j=1}}{\sum_{j=1}^{32} N_{j=1}}. \quad (6)$$

6. Analiza wyników badań

Wyniki badań charakterystyk aerodynamicznych $\Delta p_w = f(Q_w)$ badanych wkładów filtracyjnych przedstawiono na rysunku 10. Wraz ze wzrostem strumienia powietrza następuje paraboliczny wzrost oporu przepływu $\Delta p_w = f(k_m)$, co jest zgodne z informacjami literaturowymi [7, 8, 10, 11].



Rys. 10. Charakterystyki aerodynamiczne $\Delta p_w = f(Q_w)$ badanych wkładów filtracyjnych [8]

Największe wartości oporu przepływu w całym zakresie badawczego strumienia powietrza zostały zarejestrowane dla wkładu filtracyjnego C wykonanego z materiału będącego kompozytem warstw: celulozy, poliestru oraz nanowłóki. Dla $Q_{wmax} = 56$ m³/h opór przepływu wkładu C ma wartość $\Delta p_w = 498,5$ Pa (rys. 10). Nieznacznie mniejszą (o 6%) wartością oporu przepływu charakteryzuje się wkład filtracyjny

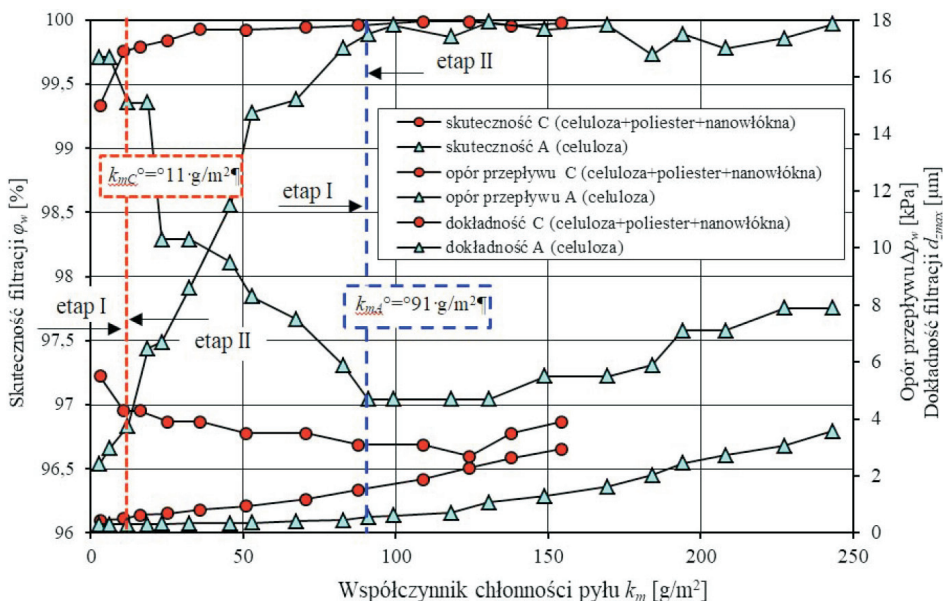
B, którego materiałem filtracyjnym jest kompozyt warstw celulozy i poliestru (bez warstwy nanowłókien). Wkład A, którego materiałem filtracyjnym jest wyłącznie papier celulozowy, osiąga opór przepływu $\Delta p_w = 344,1$ Pa. Jest to wartość o 30% niższa od oporu przepływu wkładu C, gdzie na standardowe złożo filtracyjne (celuloza i poliestr) nałożona jest warstwa nanowłókien. Wynika to ze znacznie większej (trzykrotnie) przepuszczalności celulozy $q_p = 3017$ m³/m²/h niż kompozytu warstw: celuloza i poliestr oraz nanowłókna.

Wkład E wykonany z materiału filtracyjnego (poliester oraz warstwa nanowłókien) osiąga opór przepływu $\Delta p_w = 439,9$ Pa, natomiast wkład D wykonany tylko z poliestru uzyskuje opór $\Delta p_w = 389,1$ Pa, a więc o 11,5% mniejszy. Powyższe wyniki wskazują, że złożo filtracyjne będące kompozytem kilku warstw różnych materiałów osiąga większe wartości oporu przepływu niż materiał celulozowy o dwukrotnie większej grubości.

Wyniki badań charakterystyk dokładności $d_{zmax} = f(k_m)$, skuteczności filtracji $\varphi_w = f(k_m)$ oraz oporu przepływu $\Delta p_w = f(k_m)$ wkładów filtracyjnych A i C przedstawiono na rysunku 11. Pracę badanych wkładów filtracyjnych można umownie podzielić na dwa etapy. Przyjęto, że pierwszy (I), początkowy etap pracy wkładów filtracyjnych trwa do chwili ustabilizowania się skuteczności filtracji na poziomie $\varphi_w = 99,5\%$. Etap ten charakteryzuje się niską początkową skutecznością i dokładnością filtracji oraz małymi oporami przepływu. Dla wkładu filtracyjnego wykonanego z materiału filtracyjnego A (celuloza) początkowa skuteczność filtracji ma wartość $\varphi_{wA} = 96,5\%$, a rozmiar maksymalnego ziarna osiąga wartość $d_{zmaxA} = 16,7$ μm. Ustaloną wartość skuteczności filtracji ($\varphi_w = 99,5\%$) wkład A osiąga przy współczynniku chłonności pyłu $k_{mA} = 91$ g/m². Przyrost oporu przepływu w tym czasie jest nieznaczny. Dla wkładu C wykonanego z kompozytu warstw: celuloza i poliester oraz nanowłókna początkowa skuteczność filtracji ma wartość $\varphi_{wC} = 99,3\%$, a rozmiary maksymalnych ziaren nie przekraczają wartości $d_{zmaxC} = 5,5$ μm. Tym samym pierwszy etap trwa znacznie krócej i kończy się przy współczynniku chłonności pyłu $k_{mC} = 11$ g/m².

Z chwilą zakończenia I etapu filtracji rozmiary maksymalnych ziaren pyłu dla wkładów A i C stabilizują się odpowiednio na poziomie: $d_{zmaxA} = 4,7$ μm i $d_{zmaxC} = 3,1$ μm. Etap początkowy pracy wkładu A wykonanego z celulozy jest kilkakrotnie dłuższy niż wkładu C (celuloza i poliester oraz nanowłókna). Tym samym wymaganą dużą skuteczność filtracji wkład z warstwą nanowłókien osiąga znacznie wcześniej niż wkład wykonany ze standardowego materiału filtracyjnego. Powyższe wyniki potwierdzają informacje literaturowe o dodatnim wpływie nanowłókien na skuteczność i dokładność filtracji materiałów filtracyjnych stosowanych w technice motoryzacyjnej.

Mała skuteczność i dokładność filtracji w początkowym okresie pracy wkładów filtracyjnych (taka sytuacja ma miejsce po wymianie zanieczyszczonego wkładu filtracyjnego na nowy) powoduje, że znajdujące się w powietrzu wlotowym do silnika ziarna pyłu o rozmiarach większych niż 1 μm mogą mieć znaczny wpływ na przyspieszone zużycie elementów silnika, głównie skojarzenia T-P-C.



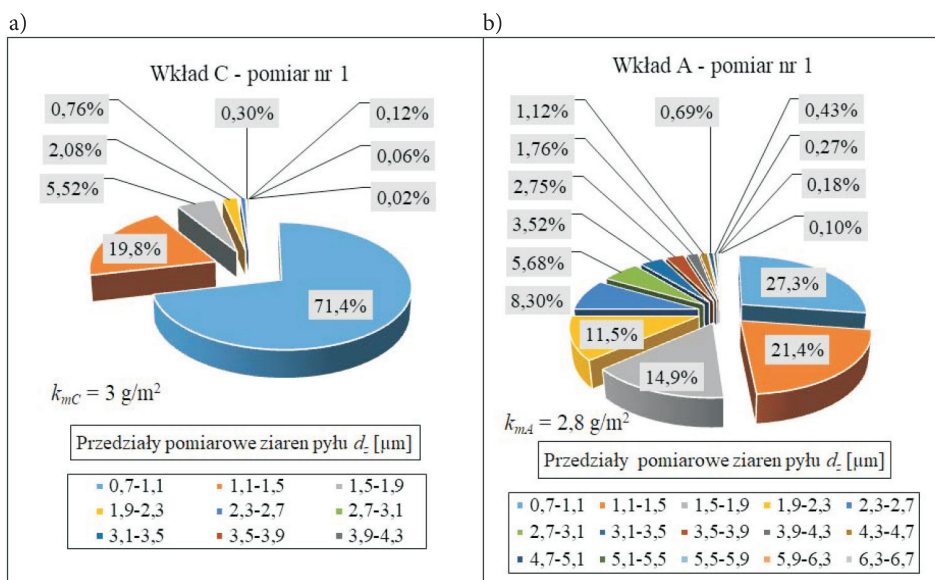
Rys. 11. Charakterystyka skuteczności φ_w i dokładności filtracji d_{zmax} oraz oporu przepływu Δp_w w zależności od współczynnika chłonności pyłu k_m badanych wkładów filtracyjnych wykonanych z materiału A (celuloza) oraz C (celuloza + poliester + nanowłókna)

W drugim (II) etapie pracy wkładów filtracyjnych ich skuteczność filtracji utrzymuje się na niezmiennym, ustabilizowanym poziomie $\varphi_w = 99,9\%$. Natomiast opór przepływu osiąga coraz większe wartości, z tym że intensywność wzrostu jest większa dla wkładu wykonanego z materiałów z dodatkiem nanowłókien. Wkład filtracyjny C (z warstwą nanowłókien) osiąga opór przepływu $\Delta p_{maxC} = 3 \text{ kPa}$ przy współczynniku chłonności $k_{mC} = 154 \text{ g/m}^2$. Dla zbliżonej wartości oporu wkład filtracyjny A (celuloza bez warstwy nanowłókien) uzyskuje współczynnik chłonności pyłu w granicach $k_m = 243 \text{ g/m}^2$, a więc o 50% większą wartość. Wynika to z mniejszej intensywności wzrostu oporu przepływu wkładów filtracyjnych bez warstwy nanowłókien. Po uzyskaniu przez wkład filtracyjny z warstwą nanowłókien oporu przepływu rzędu 3 kPa obserwuje się zjawisko odpadania aglomeratów pyłu ze złoża filtracyjnego, tym samym dalsza jego praca jest niewskazana. Jest to dowód na to, że w złożach filtracyjnych z warstwą nanowłókien zachodzi głównie zjawisko filtracji powierzchniowej, w wyniku której ziarna pyłu nie są dopuszczane w głąb złoża, tylko zatrzymywane w większości na warstwie nanowłókien. Obrazują to wyniki pomiarów (rys. 11) rozmiarów maksymalnych ziaren pyłu w powietrzu za badanymi wkładami. W powietrzu za wkładem A (celuloza) znajdują się ziarna o rozmiarach $d_{zmaxA} = (4,3 \div 16,7) \text{ μm}$, a za wkładem C, gdzie znajduje się warstwa nanowłókien, ziarna o znacznie mniejszych rozmiarach $d_{zmaxC} = (2,7 \div 3,1) \text{ μm}$.

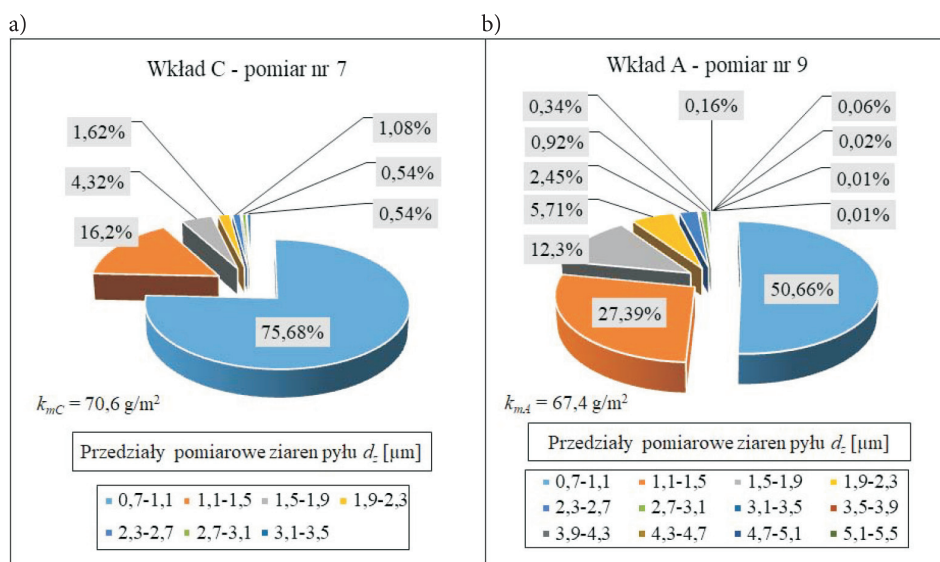
W drugim etapie dokładność filtracji d_{zmax} wkładu C (celuloza i poliester oraz nanowłókna) utrzymuje się cały czas na poziomie $d_{zmaxC} = (2 \div 4) \mu\text{m}$. Dokładność filtracji wkładu A (celuloza) jest niższa i utrzymuje się na poziomie $d_{zmaxA} = (4 \div 5) \mu\text{m}$, a pod koniec etapu w oczyszczonym powietrzu znajdują się ziarna pyłu o $d_{zmaxA} = 7,9 \mu\text{m}$. Zjawisko pojawiania się dużych ziaren pyłu w powietrzu za wkładem filtracyjnym A (celuloza) związane jest z zauważalnym spadkiem jego skuteczności filtracji do $\varphi_{wA} = 99,73\%$. Świadczy to o przechodzeniu ziaren na stronę wylotową materiału filtracyjnego. W końcowym etapie pracy wkładu na włóknach materiału filtracyjnego zgromadzona jest znaczna liczba ziaren pyłu w postaci rozrośniętych dendrytów przypominających drzewa. Ziarna pyłu znajdujące się na samym szczycie dendrytów są porywane i przenoszone na stronę wylotową materiału filtracyjnego. W wyniku tego zjawiska wraz z powietrzem wlotowym pył napływa do cylindrów silnika.

Wyniki badań składu granulometrycznego pyłu znajdującego się w powietrzu za badanymi wkładami filtracyjnymi (przepuszczonego przez materiał filtracyjny) przedstawiono na rysunkach 12-14. Po pierwszym pomiarze dla osiągniętego współczynnika chłonności pyłu około 3 g/m^2 (rys. 12) udział ziaren pyłu o rozmiarach $(0,7 \div 1,1) \mu\text{m}$ dla wkładu C (z warstwą nanowłókien) ma wartość więcej niż 70%, natomiast dla wkładu filtracyjnego A (bez warstwy nanowłókien) udział ziaren pyłu o takich rozmiarach ma wartość trzykrotnie (około 27%) mniejszą. W kolejnych cyklach badawczych w powietrzu za wkładem filtracyjnym C udział ziaren pyłu o rozmiarach $(0,7 \div 1,1) \mu\text{m}$ utrzymuje się nadal na stałym poziomie (około 70%) (rys. 13). Dla kolejnych cykli badawczych (wzrost współczynnika chłonności pyłu k_m) w powietrzu za wkładem filtracyjnym A udział ziaren pyłu o rozmiarach $(0,7 \div 1,1) \mu\text{m}$ przyjmuje coraz większe wartości i po osiągnięciu współczynnika chłonności $k_m = 130,6 \text{ g/m}^2$ wynosi około 75,5% (rys. 14).

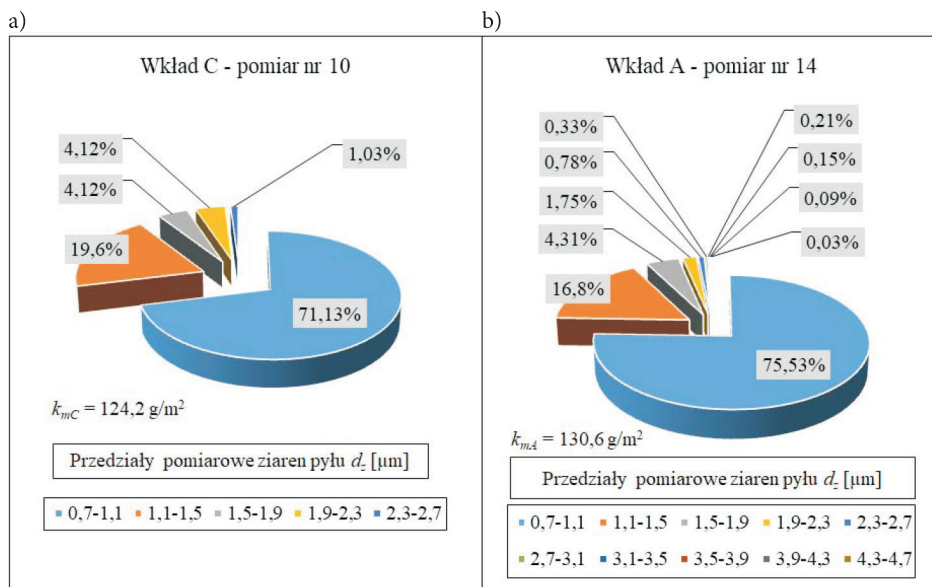
Po osiągnięciu przez wkład celulozowy współczynnika chłonności pyłu $k_{mA} = 130,6 \text{ g/m}^2$ udział ziaren pyłu o rozmiarach $(0,7 \div 1,1) \mu\text{m}$ przyjmuje wartość powyżej 75%, tak jak dla wkładu filtracyjnego z warstwą nanowłókien. W tym czasie w powietrzu za wkładem filtracyjnym z dodatkiem nanowłókien znajdują się ziarna pyłu o średnicy $d_{zmaxC} = 3,5 \mu\text{m}$, natomiast za wkładem filtracyjnym bez warstwy nanowłókien są ziarna pyłu powyżej $d_{zmaxA} = 5,5 \mu\text{m}$.



Rys. 12. Skład granulometryczny ziaren pyłu w powietrzu za wkładem filtracyjnym: a) C (z warstwą nanowłókienn) po osiągnięciu współczynnika chłonności pyłu $k_{mC} = 3 \text{ g/m}^2$ (pomiar nr 1), b) A (bez warstwy nanowłókienn) po osiągnięciu współczynnika chłonności pyłu $k_{mA} = 2,8 \text{ g/m}^2$ (pomiar nr 1)



Rys. 13. Skład granulometryczny ziaren pyłu w powietrzu za wkładem filtracyjnym: a) C (z warstwą nanowłókienn) po osiągnięciu współczynnika chłonności pyłu $k_{mC} = 70,6 \text{ g/m}^2$ (pomiar nr 7), b) A (bez warstwy nanowłókienn) po osiągnięciu współczynnika chłonności pyłu $k_{mA} = 67,4 \text{ g/m}^2$ (pomiar nr 9)



Rys. 14. Skład granulometryczny ziaren pyłu w powietrzu za wkładem filtracyjnym: a) C (z warstwą nanowłókien) po osiągnięciu współczynnika chłonności pyłu $k_{mC} = 124,2 \text{ g/m}^2$ (pomiar nr 10), b) A (bez nanowłókien) po osiągnięciu współczynnika chłonności pyłu $k_{mA} = 130,6 \text{ g/m}^2$ (pomiar nr 14)

7. Podsumowanie

Pojęcie nanowłókien jest bardzo szerokie i odnosi się zazwyczaj do włókien o średnicy poniżej $1 \mu\text{m}$ wytwarzanych metodą electrospinningu. Nanowłókna, oprócz wielu zastosowań technicznych (inżynieria tkankowa, uwalnianie leków, diagnoza zmian rakotwórczych, baterie litowo-powietrzne, czujniki optyczne), stosowane są coraz częściej do filtracji powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych.

Warstwa nanowłókien o grubości około kilku mikrometrów nałożona na podłoże z konwencjonalnych materiałów filtracyjnych filtrów powietrza pojazdów mechanicznych zwiększa zdecydowanie skuteczność i dokładność filtracji, szczególnie ziaren pyłu o średnicach poniżej $5 \mu\text{m}$, bez istotnego spadku ciśnienia.

W dostępnych danych literaturowych jest ograniczona ilość informacji na temat podstawowych właściwości wkładów filtracyjnych z warstwą nanowłókien, a przede wszystkim wartości skuteczności oraz dokładności filtracji, stąd celowe jest prowadzenie badań eksperymentalnych.

Wkład filtracyjny z warstwą nanowłókien osiąga początkową skuteczność filtracji $\varphi_{wC} = 99,3\%$. Taką wartość skuteczności filtracji wkład celulozowy osiąga dopiero przy współczynniku chłonności $k_{mA} = 53 \text{ g/m}^2$. Początkowa skuteczność filtracji tego wkładu ma wartość $\varphi_{wA} = 96,5\%$. Jest to niewątpliwy wpływ warstwy nanowłókien. Wkład filtracyjny z dodatkiem nanowłókien w całym zakresie pracy osiąga dokładność filtracji (rozmiar maksymalnych ziaren pyłu) w zakresie $d_{zmaxC} = (2,7 \div 5,5) \text{ }\mu\text{m}$. Dokładność filtracji wkładu celulozowego w okresie początkowym osiąga wartość $d_{zmaxA} = 16,7 \text{ }\mu\text{m}$, a po uzyskaniu prawie 50% całego czasu pracy wkładu dokładność kształtuje się na poziomie $d_{zmaxA} = 4,7 \text{ }\mu\text{m}$. Dostarczenie do cylindrów silnika powietrza z pyłem mineralnym o tak dużych rozmiarach może powodować przyspieszone zużycie jego elementów.

Źródło finansowania: Praca badawcza statutowa PBS 935/WAT/2016.

Artykuł wpłynął do redakcji 30.07.2018 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 3.12.2018 r.

Tadeusz Dziubak <https://orcid.org/0000-0002-1609-3518>

LITERATURA

- [1] ANDERSEN B.O., NIELSEN N.F., WALTHER J.H., *Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters*, Powder Technology, 291, 2016, 284-298.
- [2] BARRIS M.A., Total FiltrationTM: The Influence of Filter Selection on Engine Wear, Emissions, and Performance, SAE 952557, Meeting & Exposition Toronto, Ontario October 16-19, 1995.
- [3] BUGLI N., *Automotive Engine Air Cleaners – Performance Trends*, SAE Technical Paper, 2001-01-1356.
- [4] CIRQUEIRA S.S.R., TANABE E.H., AGUIAR M.L., *Evaluation of operating conditions during the pulse jet cleaning filtration using different surface treated fibrous filters*, Process Safety and Environmental Protection, 105, 2017, 69-78.
- [5] CHLOPEK Z., JAKUBOWSKI A., *A study of the particulate matter emission from the braking systems of motor vehicles*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 4, 2009.
- [6] Diesel Engine Air Filtration, Materiały informacyjne firmy PALL Corporation, USA, 2004.
- [7] DURST M., KLEIN G., MOSER N., *Filtration in Fahrzeugen*, Mann + Hummel GMBH, Ludwigsburg, Germany 2005.
- [8] DZIUBAK T., *Problems of dust removal from multi-cyclones of engine air cleaners in cross-country motor vehicles*, The Archives of Automotive Engineering, 76, 2, 2017.
- [9] 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, 17, 4, 2015.
- [10] DZIUBAK T., *Filtracja powietrza wlotowego do silników spalinowych pojazdów mechanicznych*, WAT, Warszawa, 2012.
- [11] ERDMANNSDÖRFER H., *Lesttingmöglichkeiten von Papierfiltern zur Reinigung der Ansaugluft von Dieselmotoren*, MTZ, 32, 1971.
- [12] FITCH J., *Clean Oil Reduces Engine Fuel Consumption*, Practicing Oil Analysis, 11-12, 2002.

- [13] GEORGE J., FORNA R., CRAVERO T., Air Filtration with Fine Polymeric Fibers, 16th Annual Technical Conference and Exposition 2003 Technical Sessions Papers, Reno-Nevada, June 17-20, 2003.
- [14] 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.
- [15] GRAHAM K. et al., Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications, 5th Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society, Galveston, Texas, April 9-12, 2002.
- [16] HEIKKILÄ P., SIPILÄ A., PELTOLA M., HARLIN A., *Electrospun PA-66 Coating on Textile Surfaces*, Textile Research Journal, 77, 11, 2007.
- [17] JAROSZCZYK T., FALLON S.L., SCHWARTZ S.W., *Development Of High Dust Capacity*, High Efficiency Engine Air Filter With Nanofibers, Journal of KONES Powertrain and Transport, 15, 3, 2008.
- [18] KHAJAVI R., ABBASIPOUR M., BAHADOR A., *Electrospun biodegradable nanofibers scaffolds for bone tissue engineering*, Journal of Applied Polymer Science, 133, 3, 2016.
- [19] KIM J.-K., HWANG J., CHOI H.-J., LEE M.-H., *Effective filtration area of a pleated filter bag in a pulse-jet bag house*, Powder Technology, 311, 2017.
- [20] LI D., XIA Y., *Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel?*, Adv. Mater., 16, 14, 2004.
- [21] LO L.-M., CHEN D.-R., PUI D.Y.H., *Experimental study of pleated fabric cartridges in a pulse-jet cleaned dust collector*, Powder Technology, 197, 2010.
- [22] MOHAPATRA H.S., CHATTERJEE A., MAITY S., *Nanotechnology in Fibres and Textiles*, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), 2, 5, 2013.
- [23] PN-ISO 5011., *Filtry powietrza do silników spalinowych i sprężarek*, PKNM, 1994.
- [24] TAUFKIRCH G., MAYR G., *Papierluftfilter für Motoren in Nutzfahrzeugen*, MTZ, 45, 3, 1984.
- [25] TRAUTMANN P., DURST M., PELZ A., MOSER N., *High Performance Nanofibre Coated Filter Media for Engine Intake Air Filtration*, AFS 2005 Conference and Expo, April 10-13, 2005.
- [26] WANG N. et al., *Multilevel structured polyacrylonitrile/silica nanofibrous membranes for high-performance air filtration*, Separation and Purification Technology, 126, 2014.
- [27] YENDZHEIOVSKIY Y., *Analiza właściwości materiałów filtracyjnych z dodatkiem nanowłókien*, praca magisterska, WAT, Warszawa 2018.
- [28] <http://www.cottonbangladesh.com/January2009/ElectroSpinning.htm> [dostęp 14.05.2018].
- [29] <https://truckfocus.pl/novosci/7520/mann-filter-wprowadza-wysokowydajne-filtry-z-nanowlokien> [dostęp 15.07.2018].
- [30] <https://www.army-technology.com/products/donaldson-pjac-ultra-self-cleaning-air-cleaner/> [dostęp 15.06.2018].
- [31] http://wiedzainfo.ue.wroc.pl/wyklady/703/nanotechnologia_zagadnienia_podstawowe.html [dostęp 30.11.2018].

T. DZIUBAK, Y. YENDZHEIOVSKYI

Properties analysis of filtration materials with nanofibers addition

Abstract. Nanofiber properties, methods of their production, and areas of their application have been presented. Parameters describing filtration materials with nanofibers addition were presented, and analyzed. Methodology for testing aerodynamic characteristics as well as characteristics of: efficiency, accuracy, and filter cartridges resistance with nanofibers addition, depending on the dust mass loading k_m were developed. Characteristic filtration parameters of the materials with nanofibers addition are presented. Five filtration inserts, differing in the filtration material with nanofibers addition, and without this layer were made. Test conditions were developed as well as a test stand was prepared. Aerodynamic characteristics tests of filter cartridges as well as filtration efficiency, accuracy, and flow resistance of standard (cellulose) cartridge, and the ones with nanofibers addition were performed. The positive effect of nanofiber layer on efficiency, and accuracy increase in the inlet engine air filtration was confirmed. Granulometric composition of air dust was assessed on a standard filter cartridge, and on a cartridge with nanofibers addition.

Keywords: engine, air filter, nanofibers, filtration efficiency and accuracy, flow resistance, dust mass loading, grain size

DOI: 10.5604/01.3001.0013.1475

