

Tadeusz DZIUBAK¹

PROBLEMY FILTRACJI POWIETRZA WLOTOWEGO DO SILNIKÓW SPALINOWYCH POJAZDÓW MECHANICZNYCH

Scharakteryzowano zanieczyszczenia powietrza zasysanego do silników pojazdów mechanicznych. Przedstawiono niekorzystny wpływ parametrów pyłu drogowego na zużycie współpracujących tarciowo elementów silnika. Przedstawiono właściwości materiałów filtracyjnych stosowanych na przegrody porowate filtrów powietrza pojazdów. Przedstawiono właściwości filtracyjne monocyklonów i multicyklonów. Scharakteryzowano systemy filtracji powietrza wlotowego pojazdów mechanicznych. Przedstawiono wpływ zanieczyszczeń płynów eksploatacyjnych na zużycie elementów silnika i jego trwałość. Pokazano możliwość poprawy efektywności filtracji powietrza wlotowego do silnika przy wykorzystaniu materiałów z dodatkiem nanowłókien.

THE PROBLEMS OF INLET AIR FILTRATION OF VEHICLE COMBUSTION ENGINES

There were characterised pollutants of air sucked up into vehicle engines. Disadvantageous influence of road dust parameters on wear of tribologically associated engine elements is presented. There are presented properties of filtration materials used for porous partitions of vehicle air filters. There are presented filtration properties of monocyklones and multicyklones. The filtration systems of inlet air of vehicle combustion engines are characterized. The influence of exploitation fluids pollution on engine elements wear and their durability is presented. Possibilities of engine inlet air filtration effectiveness improvement is shown using materials with addition of nanofibers.

1. WSTĘP

Rozwój silników spalinowych cechuje się ciągłym wzrostem ich trwałości i niezawodności, mimo coraz większych obciążeń mechanicznych i cieplnych ich elementów. Jest to możliwe dzięki postępowi osiągniętemu w konstrukcji silników, technologii ich wytwarzania oraz inżynierii materiałowej. Dużą rolę w uzyskaniu dużej trwałości i niezawodności silników, a tym samym długich przebiegów międzynaprawczych, odgrywa

¹ Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, 00-908 Warszawa, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, tel./fax. (+48) 22-6837121, tdziubak@wat.edu.pl

czystość powietrza wlotowego do silników spalinowych. Powietrze atmosferyczne zawiera wiele zanieczyszczeń, które są emitowane do atmosfery w wyniku działalności przyrody oraz w wyniku działalności ludzkiej. Są to: pyły, para wodna, zarodniki roślin, bakterie, sole oraz gazy: CO, SO₂, SO₃, He, NH₃ i inne. Pył unoszony jest z powierzchni ziemi podczas ruchu pojazdów mechanicznych lub wiatr. Eksploatatorów pojazdów mechanicznych interesują głównie pyły mineralne, które zasysane wraz z powietrzem przez tłokowe silniki spalinowe jak i turbinowe powodują przyspieszone zużycie współpracujących elementów.

Dla zapewnienia dużej trwałości i niezawodności silnika wyposaża się je w filtry powietrza, od których wymaga się skuteczności odpylania powyżej 99% w całym zakresie prędkości obrotowych silnika i wymaganego przebiegu pojazdu. Stosowane obecnie do filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych papiery filtracyjne zapewniają dokładność filtracji powyżej 5 μm. Największe zużycie elementów silnika (skojarzenie: tłok – pierścienie tłokowe – cylinder, czop – panewka) powodują ziarna pyłu o rozmiarach 2 ÷ 40 μm [1 - 5]. Dominuje pogląd, że zużycie powodują te ziarna pyłu, których średnica w danej chwili równa jest grubości filmu olejowego między współpracującymi powierzchniami. Grubość filmu olejowego h_{min} w typowych skojarzeniach silnika spalinowego przyjmuje maksymalne wartości do 50 μm [8]. Na przykład dla skojarzenia „pierścień - cylinder” grubość filmu olejowego może mieć wartość $h_{min} = 0,3 \div 7 \mu\text{m}$ [2].

Typowe motoryzacyjne filtry powietrza są zauważalnie nieefektywne przy zatrzymaniu ziaren pyłu poniżej 5 μm. Dlatego też prowadzone są ciągłe prace mające na celu wytworzenie materiałów filtracyjnych o zwiększonej dokładności filtracji małych ziaren pyłu.

2. ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA ATMOSFERYCZNEGO

Powietrze zasysane z atmosfery przez silniki spalinowe zawiera liczne zanieczyszczenia będące są wynikiem:

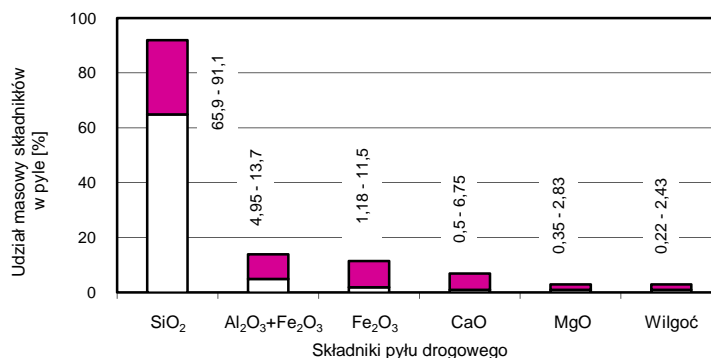
- działania przyrody - ponad 85% ogólnego strumienia zanieczyszczeń (pyły, zarodniki roślinne, bakterie, sole oraz gazy, np.: CO, SO₂, SO₃),
- unoszenia z podłoża przez ruch pojazdów mechanicznych lub przez wiatr pyłu mineralnego (pyłu drogowego),
- emisji przez silniki pojazdów mechanicznych spalin (pył, sadza, związki ołowiu, ciężkie węglowodory, cząstki stałe PM oraz gazy),
- emisji przez pojazdy mechaniczne pyłów pochodzących z zużycia materiałów ciernych okładzin hamulców oraz tarcz sprzęgłowych, opon i nawierzchni jezdni.

Powszechnie szkodliwym dla eksploatowanych pojazdów mechanicznych jest polidispersyjny pył drogowy, który charakteryzują następujące parametry: skład chemiczny i granulometryczny, twardość, kształt ziaren oraz stężenie w powietrzu.

Podstawowym składnikiem pyłu drogowego jest krzemionka (SiO₂), której udział w pyle dochodzi do 60÷95% (rys. 1). Pozostałość stanowią tlenki: Al₂O₃, F₂O₃, CaO, MgO oraz składniki organiczne [1, 4, 14]. Skład chemiczny pyłu zasysanego wraz z powietrzem do silnika uzależniony jest głównie od składu i rodzaju podłoża oraz od czynników klimatycznych (silne wiatry, deszcze, susze itp.) i wywołane działalnością człowieka opady pyłów przemysłowych. Skład chemiczny pyłu podawany jest zwykle dla określonych

rejonów. Pył z rejonów piaszczystych charakteryzuje się dwukrotnie większą zawartością SiO_2 w ogólnej masie niż pył z rejonów o podłożu lessowym [4, 14].

Według twardości ocenianej na podstawie dziesięciostopniowej skali Mohsa krzemionka (SiO_2) ma twardość 7 a korund (Al_2O_3) 9 [1, 4]. Minerale te twardością znacznie przewyższają materiały konstrukcyjne stosowane w budowie silników.



Rys. 1. Przeciętny skład chemiczny pyłu drogowego w Polsce [1, 5]

Ziarna pyłu posiadają najczęściej bardzo nieregularny kształt: iglasty, kanciasty (o ostrych krawędziach kształtem zbliżonym do wielościanów), dendrytyczny (zbiór kryształów), włóknisty, płytkowy, ziarnisty, krystaliczny (o regularnych kształtach geometrycznych), modułowy (o okrągłym, nieregularnym kształcie), kulisty (rys. 2) [8].

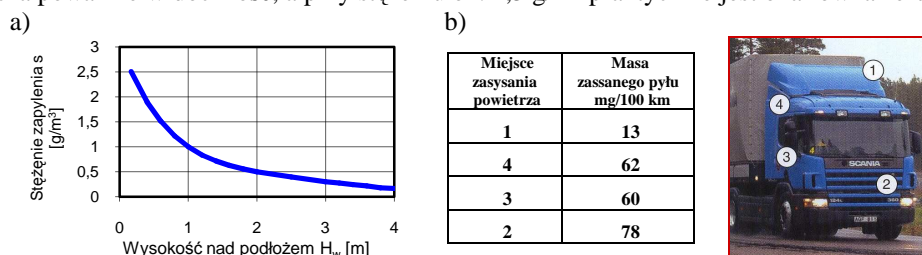


Rys. 2. Kanciasty (wielościan o ostrych krawędziach) kształt ziaren pyłu krzemionki [8]

Skład granulometryczny pyłu jest wskaźnikiem niejednorodności rozmiarów ziaren pyłu i określa względny udział poszczególnych grup wymiarowych w ogólnej masie pyłu. Skład granulometryczny pyłu zależy od składu i rodzaju podłoża, a także od miejsca i wysokości nad podłożem. Zależność ta pozostaje w ścisłym związku z zależnością prędkości opadania ziarna w spokojnym powietrzu. Prędkość opadania znacznie wzrasta ze wzrostem średnicy ziaren d_z . Ziarna o średnicy $d_z = 10 \mu\text{m}$ mają prędkość opadania około 0,08 m/s, ziarna o średnicy $d_z = 100 \mu\text{m}$ około 0,7 m/s [4]. Dlatego też ziarna pyłu o średnicy $d_z < 2 \mu\text{m}$ unoszą się w powietrzu bardzo długo. W powietrzu zasysanym przez silnik znajdują się ziarna pyłu o rozmiarach nie przekraczających $d_z = 50 \div 100 \mu\text{m}$.

Stężenie pyłu jest to masa pyłu (w gramach lub mg) zawarta w 1 m^3 powietrza atmosferycznego. Na wartość stężenia pyłu w powietrzu wokół poruszającego się pojazdu mają wpływ: rodzaj podłoża, ruch innych pojazdów, warunki poruszania się pojazdu, warunki meteorologiczne, rodzaj układu jezdni (kołowy, gąsienicowy), rodzaj otaczają-

cych gleb, wysokość nad powierzchnią ziemi (rys. 3). Najmniejsze stężenie zapylenia powietrza, około $0,001 \text{ g/m}^3$ występuje podczas poruszania się pojazdów po drogach utwardzonych i ulicach, poniżej $0,001 \text{ g/m}^3$ w dzielnicach mieszkaniowych [1, 4, 5, 13], a największe, dochodzące 7 g/m^3 [13], podczas jazdy pojazdów gąsienicowych po poligonowych placach ćwiczeń o suchym podłożu. Na placach budów, podczas prac polowych oraz w wyniku ruchu kolumn po drogach polnych stężenie zapylenia powietrza może mieć wartości $0,05 \div 2 \text{ g/m}^3$ [5]. Podczas startu i lądowania śmigłowca stężenia zapylenia przy wlocie powietrza może osiągać wartości do 3 g/m^3 . Stężenie zapylenia rzędu $0,7 \text{ g/m}^3$ ogranicza poważnie widoczność, a przy stężeniu ok. $1,5 \text{ g/m}^3$ praktycznie jest ona równa zero [4].

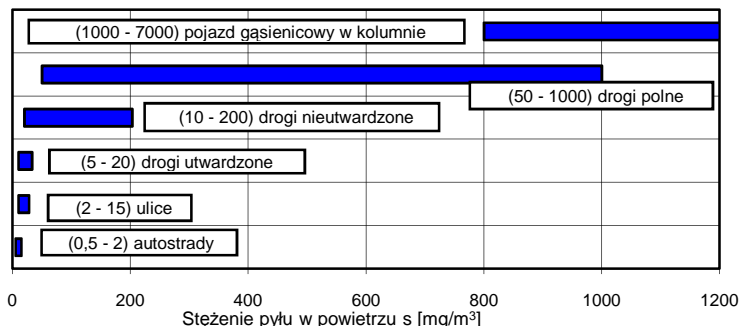


Rys. 3. Wpływ wysokości nad podłożem na: a) zmianę stężenia zapylenia powietrza, b) masę zassanego pyłu [3]



Rys. 4. Zapylenie powietrza: a) jazda czołgu po poligonie [11], b) na placu budowy

W przeciętnych warunkach eksploatacji pojazdów stężenie zapylenia powietrza podawane jest głównie w zależności od rodzaju nawierzchni dróg i rodzaju poruszających się pojazdów lub pracujących maszyn – rysunek 5 [1, 5].



Rys. 5. Maksymalne wartości stężenia zapylenia powietrza w zależności od rodzaju podłoża

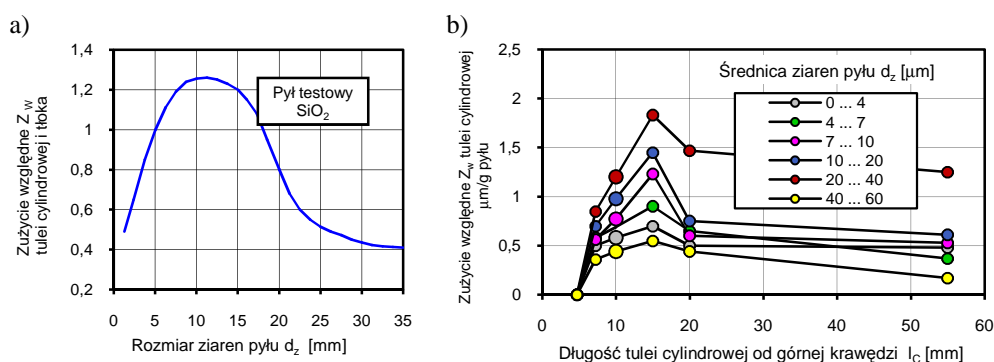
3. WPLYW ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA NA ZUŻYCIE SILNIKA

Wartość zużycia elementów silnika zależy od: właściwości pyłu zasysanego wraz z powietrzem do cylindrów silnika, właściwości materiału, parametrów silnika (obciążenie, wartości luzów w skojarzeniu) i rozpatrywana jest w stosunku do zużycia górnej części cylindra lub pierwszego pierścienia tłokowego. Skojarzenia czop-panewka ulegają przyspieszonemu zużyciu w wyniku znajdujących się w oleju zanieczyszczeń, których głównym składnikiem jest pył dostający się do układu smarowania z otoczenia oraz z obszaru T-P-C.

Na wartość stężenia zapylenia powietrza ma wpływ nie tylko rodzaj podłoża, ale dodatkowo: warunki atmosferyczne, układ jezdny pojazdu (kołowy lub gąsienicowy) czy też warunki ruchu innych pojazdów. Eksploatator nie ma wpływu na zmianę właściwości pyłu, może jedynie zminimalizować wartość stężenia zapylenia oraz rozmiar ziaren w zasysanym do silnika powietrzu, stosując odpowiednie filtry powietrza.

Podczas poruszania się drogami asfaltowymi, silnik samochodu osobowego o pojemności 1 dm³ i nominalnym zapotrzebowaniu powietrza $Q_{WS} = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ zasysa wraz z powietrzem w ciągu 8 godzin, w zależności od warunków jazdy, od 2,4 do 18 g pyłu.

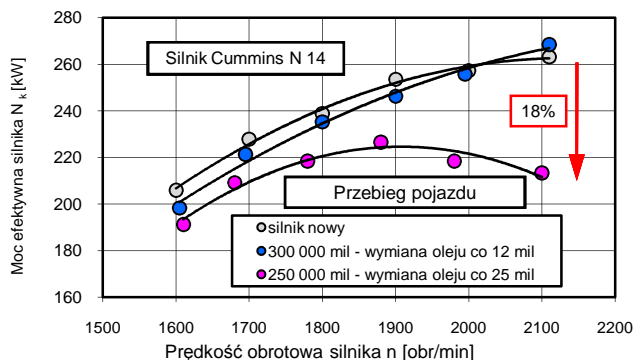
Silnik samochodu ciężarowego o zapotrzebowaniu powietrza $Q_{WS} = 500 \text{ m}^3/\text{h}$ podczas eksploatacji po drogach nieutwardzonych może zassać wraz z powietrzem w tym samym czasie około 40 ÷ 400 g pyłu, natomiast do silnika czołgu T-72 ($Q_{WS} = 3350 \text{ m}^3/\text{h}$) eksploatowanego po poligonowym placu ćwiczeń może dostać się wraz z powietrzem w ciągu 8 godzin od 26 do 180 kg pyłu. Jeżeli w układzie zasilania powietrzem znajduje się filtr zapewniający skuteczność 99,9 %, to do silnika samochodu osobowego, który przejechał 20 tys. km z średnią prędkością 60 km/h, dostaje się wraz z powietrzem od 0,1 do 0,75 mg pyłu, który powoduje przyspieszone zużycie powierzchni elementów silnika. Wszystkie ziarna pyłu powyżej 1 µm powodują zwiększone zużycie, jednak największy efekt ścierny występuje przy określonej wielkości ziaren: na przykład dla tulei cylindrowej i tłoka są to ziarna 5÷17 µm – rys. 6a [1], w innym przypadku 20÷40 µm – rys. 6b [5].



Rys. 6. Wpływ rozmiarów ziaren pyłu SiO₂ na zużycie: a) względne tulei cylindrowej i tłoka, b) tulei cylindrowej w przeliczeniu na 1 g dozowanego pyłu [5]

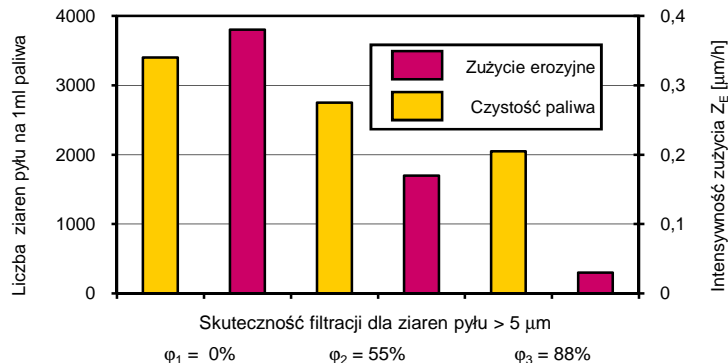
W silniku Cummins N 14, w którym wymianę oleju wykonywano cyklicznie co 25 tys. mil, zarejestrowano spadek mocy w stosunku do silnika nowego i silnika, gdzie wymianę

oleju wykonywano dwukrotnie częściej. Przy prędkości obrotowej $n = 2100$ obr/min spadek mocy miał wartość ponad 18 % (rys. 7)



Rys. 7. Zmiana mocy silnika Cummins N14 nowego i po różnych przebiegach pojazdu z wymianą oleju co 12 i 25 mil [8]

Wpływ koncentracji (zblizonej do koncentracji, jaką uzyskuje się w paliwie podczas jazdy samochodem po autostradzie) ziaren pyłu $d_z > 5 \mu\text{m}$ zawartych w paliwie na zużycie erozyjne wtryskiwacza przedstawiono na rysunku 8. Wyższa efektywność filtracji powoduje zmniejszenie zarówno stężenia zanieczyszczeń jak i współczynnika erozji [12].



Rys. 8. Wpływ zawartości zanieczyszczeń w paliwie na intensywność zużycia erozyjnego wtryskiwacza [12]

W wyniku zachodzących w skojarzeniach współpracujących tarciowo procesów zużyciowych intensyfikowanych obecnością ziaren pyłu następuje powiększanie luzów, co negatywnie wpływa na osiągi silnika. Zużycie tulei cylindrowej i współpracujących pierścieni tłokowych powoduje ubytek sprężanego czynnika, a tym samym spadek ciśnienia w końcu suwu sprężania, a w konsekwencji spadek mocy silnika. Zwiększony w skojarzeniu T-P-C luz zwiększa zjawisko pompującego działania pierścieni tłokowych, a tym samym wzrost zużycia oleju i wzrost emisji toksycznych składników spalin. Nadmierne

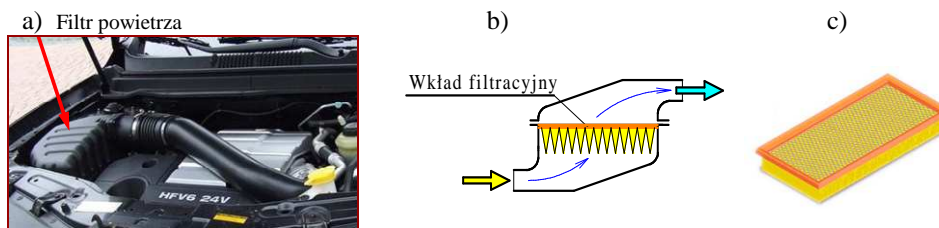
zużycie ściernie skojarzeń czop - panewka powoduje zwiększenie luzów, a w efekcie obniżenie ciśnienia smarowania będącego jednym z czynników decydujących o tworzeniu się klina smarnego w łożysku ślizgowym. Przy małych prędkościach obrotowych silnika (małych względnych wartości prędkości liniowych) i dużych obciążeniach może nastąpić zanik klina smarnego i wystąpienie tarcia suchego, a w konsekwencji zatarcie łożysk.

4. SYSTEMY FILTRACJI POWIETRZA WLOTOWEGO DO SILNIKÓW SPALINOWYCH POJAZDÓW MECHANICZNYCH

Zadaniem układu zasilania powietrzem silnika spalinowego jest dostarczenie do cylindrów silnika powietrza w odpowiednich ilościach i o odpowiednich parametrach (czystości) w taki sposób, aby zapewnić prawidłowy przebieg spalania paliwa i zminimalizować zużycie elementów silnika. Elementami układu zasilania powietrzem tłokowego silnika spalinowego pojazdu mechanicznego są: filtr powietrza wraz z czerpnią, masowy przepływomierz powietrza, (sprężarka doładowująca i chłodnica powietrza w silnikach o ZS), kolektor i kanały dolotowe w głowicy, elementy układu recyrkulacji spalin, układ przewietrzania skrzyni korbowej oraz elementy układu, którego zadaniem jest tłumienie hałasu.

W samochodach osobowych (eksploatacja przy małym stężeniu zapylenia powietrza) stosowane są filtry jednostopniowe z porowatą przegrodą papierową. Wkład filtracyjny wykonany jest wtedy w postaci panelu, natomiast powietrze do filtru zasysane jest najczęściej bezpośrednio z otoczenia czerpnią usytuowaną z przodu pojazdu.

Filtr powietrza lokalizuje się w pojeździe tak, aby zapewnić: łatwy dostęp w czasie prac obsługowych, prosty i łatwy montaż wkładu filtracyjnego i innych elementów wymiennych, szczelność jego połączeń z kolektorem dolotowym. Filtry powietrza silników pojazdów osobowych, ze względu na małe wymiary, montowane są w przedziale silnikowym – rys. 9. Kształt filtrów dopasowuje się do ograniczonej przestrzeni tego przedziału. We współczesnych samochodach z silnikami z wtryskiem paliwa filtry powietrza mogą być montowane do nadwozia, a ich kształty zbliżone są do prostopadłościanu.

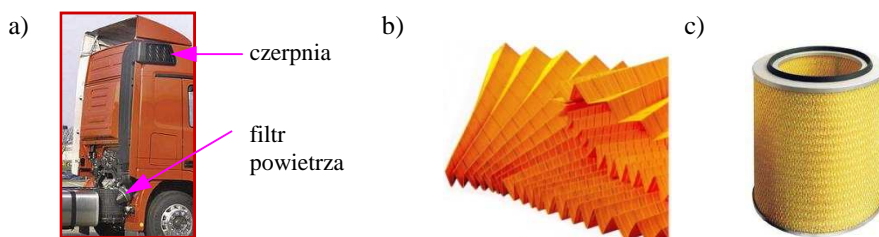


Rys. 9. System filtracji powietrza samochodu osobowego: a) umiejscowienie filtru powietrza w przedziale silnikowym, b) schemat funkcjonalny filtru, c) wkład filtracyjny

Samochody ciężarowe, pojazdy członowe, maszyny robocze, pojazdy specjalne i pojazdy wojskowe, a w tym głównie czołgi, bojowe wozy piechoty ponieważ eksploatowane są najczęściej w warunkach dużego zapylenia wyposażone są w filtry dwustopniowe.

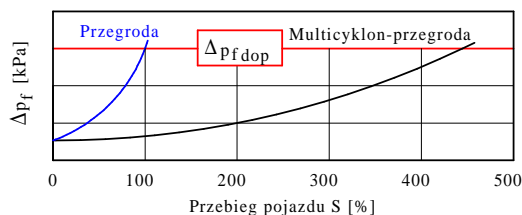
Pierwszym stopniem filtracji jest wtedy multicyklon lub monocyklon, a drugim ustawiona za nim szeregowo przegroda porowata. Filtry powietrza, ze względu na duże gabaryty wynikające z umieszczenia w nim dużej (około 15 - 20 m²) powierzchni papieru filtracyjnego, umieszcza się najczęściej z tyłu kabiny kierowcy (blisko silnika), nisko nad jezdnią, mocując je do ramy lub kabiny – rysunek 10. Zapewnia to łatwy dostęp podczas prac obsługowych.

Dwustopniowy system filtracji „multicyklon - wkład papierowy” znajduje się między innymi: w układzie zasilania powietrzem silników samochodów ciężarowych Volvo, Scania, DAF, w czołgach Leopard i Abrams. W układzie zasilania powietrzem silników autobusu Autosan, Jelcz, a także w kombajnie Bizon stosowany jest dwustopniowy system filtracji „monocyklon - wkład papierowy”.



Rys. 10. Układ zasilania powietrzem samochodu ciężarowego: lokalizacja filtru powietrza i czepni, b) papier po plisowaniu, c) wkład cylindryczny

Sensowność stosowania filtrów dwustopniowych polega na wstępnym odseparowaniu w odpylaczu bezwładnościowym ziaren pyłu o większej masie i „pozostawieniu” w strumieniu powietrza ziaren pyłu o mniejszych rozmiarach i masie oraz odfiltrowaniu w przegrodowym (najczęściej z wkładem papierowym) filtrze powietrza mniejszych ziaren, co wydłuża czas użytkowania systemu filtracji powietrza w silniku do osiągnięcia dopuszczalnej wartości oporu przepływu filtru powietrza Δp_{fdop} – rys. 11.

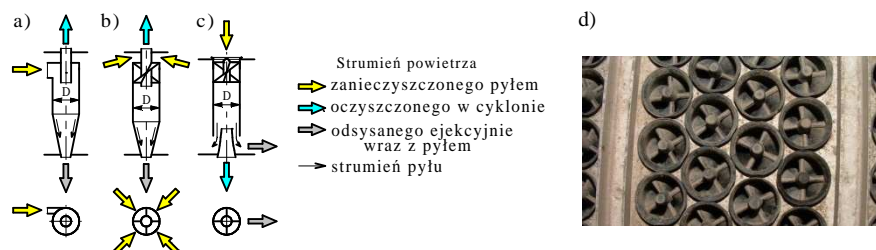


Rys. 11. Zmiana oporu przepływu jednostopniowego (przegrodowego) i dwustopniowego (multicyklon-przegroda) filtru powietrza w zależności od przebiegu pojazdu S

Multicyklon to zespół kilku lub kilkudziesięciu, a nawet kilkuset cyklonów o średnicach wewnętrznych nie przekraczających $D = 40$ mm (rys. 12), nazywanych też minicyklonami rozmieszczonych równolegle obok siebie, końcami umocowanymi we wspólnych płytach sitowych – dolnej i górnej. Cyklony charakteryzują się:

- zdolnością odseparowania z dużych strumieni powietrza znacznej masy pyłu,

- stałym w eksploatacji oraz małym (2-3 kPa) oporem przepływu,
- skutecznością do 96%,
- dokładnością zatrzymywania ziaren powyżej $15\div 35 \mu\text{m}$,
- bezobsługowością – samoczynne usuwanie pyłu z osadnika.



Rys. 12. Rodzaje cyklonów: a) zwrotny z wlotem stycznym, b) zwrotny z wlotem osiowym, c) przelotowy [5], d) fragment multicyklonu z cyklonów przelotowych

W cyklonie wyniku zawirowania ziarna pyłu (cząstki aerozolowe) pod wpływem siły bezwładności (zachowując swój ruch zbliżony do prostoliniowego, przy czym ich gęstość jest blisko 2500 razy większa od gęstości powietrza) zostają odrzucone na ścianki, po których zsuwają się do umieszczonego niżej zbiornika zanieczyszczeń. Strumień gazu można wprowadzić w ruch obrotowy wskutek stycznego doprowadzenia go do części cylindrycznej (rys. 12a) lub wskutek przepływu przez nieruchomy element zawirowujący (zawirowywacz), którego łopatki mają zarys linii śrubowej – rys.12b,c.

Monocyklon to zespół łopatek zamocowanych obwodowo wewnątrz obudowy filtra (rys. 13a) lub na zewnętrznej ścianie wkładu filtracyjnego (rys. 13b) mający na celu zawirowanie strumienia powietrza wlotowego i nadanie siły bezwładności ziarnom pyłu w wyniku czego następuje zmiana ich kierunku ruchu i wytrącenie z powietrza. Monocyklony charakteryzują się:

- skutecznością odpylania $\phi = 50 \div 70\%$
- dokładnością zatrzymywania ziaren powyżej $d_z = 40 \div 50 \mu\text{m}$.



Rys. 13. Monocyklon: a) zamocowany do obudowy filtra powietrza, b) stanowiący całość z wkładem filtracyjnym

Zatrzymany przez cyklony pył jest gromadzony w wspólnym dla wszystkich cyklonów osadniku pyłu, skąd należy go systematycznie usuwać. W starszych rozwiązaniach filtrów powietrza czynność tę wykonuje kierowca podczas obsługiwan. We współczesnych rozwiązaniach konstrukcyjnych filtrów powietrza usuwanie pyłu z osadnika następuje

samoczynnie poprzez rozszczelniające się gumowe stożki, a w warunkach dużego zapylenia wykorzystuje się zjawisko eiekcyjnego odsysania pyłu z osadnika strumieniem powietrza Q_s . W efekcie, przy ograniczonej chłonności przegrody porowatej, powoduje wydłużenie czasu pracy filtru powietrza do limitowanego ustaloną wartością oporu dopuszczalnego Δp_{dop} , a wynikającą z istniejącego konstrukcyjnego ograniczenie strat mocy na pokonanie oporów przepływu na dolocie. Wartość Δp_{dop} dobiera się indywidualnie dla każdego silnika w zależności od zapotrzebowania powietrza i przewidywanych warunków pracy. Osiągnięcie przez filtr ustalonej wartości Δp_{fdop} jest sygnałem do wykonania obsługi polegającego najczęściej na wymianie papierowego wkładu filtracyjnego. We współczesnych samochodach ciężarowych wartość oporu dopuszczalnego kształtuje się na poziomie 6-7 kPa.

5. MATERIAŁY FILTRACYJNE POWIETRZA WLOTOWEGO SILNIKÓW SPALINOWYCH POJAZDÓW MECHANICZNYCH

Do filtracji powietrza wlotowego współczesnych silników pojazdów mechanicznych stosowane są papiery filtracyjne oraz włókniny.

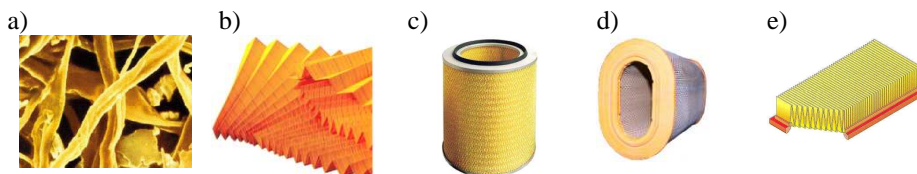
Podstawowe parametry i właściwości filtracyjne papierów są następujące:

- gramatura – $115 \div 240 \text{ g/m}^2$,
- grubość – $0,3 \div 0,9 \text{ mm}$,
- wymiar porów (przeciętny) – $12 \div 95 \text{ }\mu\text{m}$,
- opór przepływu - przepuszczalność powietrza,
- wytrzymałość na rozerwanie.

Papiery filtracyjne charakteryzują się

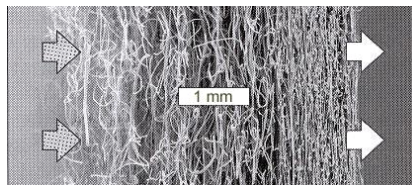
- skutecznością filtracji $\varphi = 99,96 \div 99,99\%$,
- dokładnością filtracji $d_z = 2 \div 5 \text{ }\mu\text{m}$.

Papier filtracyjny kształtuje się tak, aby uzyskać największą powierzchnię w jednostce objętości przy jednoczesnym zachowaniu warunku maksymalnej prędkości przepływu powietrza przez papier (prędkości filtracji) nie większej niż $0,03 \div 0,06 \text{ m/s}$ dla samochodów ciężarowych i $0,07 \div 0,12 \text{ m/s}$ dla samochodów osobowych [1, 5]. Papier kształtuje się w formie plisowanej taśmy, z której następnie zmontowany jest wkład filtracyjny, najczęściej w cylindry o podstawie koła lub owalu oraz panele – rys. 14.



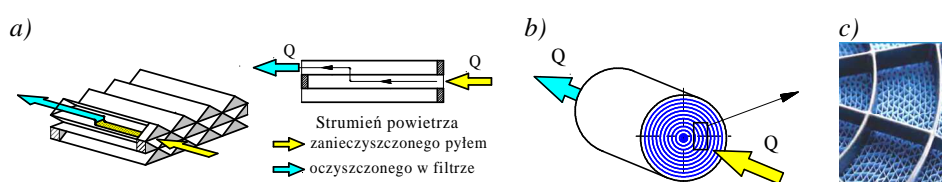
Rys. 14. Kształtowanie papieru filtracyjnego: a) struktura papieru filtracyjnego, b) papier filtracyjny po plisowaniu, c) wkład cylindryczny o podstawie koła, d) wkład cylindryczny o podstawie owalu, e) wkład panelowy

Nowoczesne włókniny filtracyjne charakteryzują się strukturą z narastającym upakowaniem włókien w kierunku napływu powietrza (rys. 15) i skutecznością filtracji powyżej $\varphi = 99,9\%$, oraz chłonnością pyłu $\Delta m = 0,9 \div 1,1 \text{ kg/m}^2$.



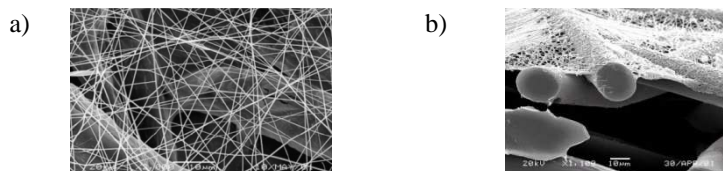
Rys. 15. Włóknina filtracyjna z narastającym upakowaniem [5]

Firma Donaldson stosuje od wielu lat odmienną konstrukcję i technologię wykonania wkładu filtracyjnego znanego pod nazwą „PowerCore” [12]. Wkład filtracyjny zbudowany jest w formie rdzenia z kilkunastu nałożonych na siebie i odizolowanych warstw plisowanego papieru. Plisy tworzą kanały, które są na przemian uszczelnione, co wymusza przepływ powietrza przez materiał filtracyjny do przyległego kanału – rys. 16a. Przy tym samym strumieniu przepływającego powietrza, filtry wykonane technologią „Power Core”, są gabarytowo 2-3 razy mniejsze niż filtry z wkładami z plisowanego papieru filtracyjnego wykonanego tradycyjną metodą i bardziej efektywne ($\phi_f = 99,99\%$) niż przeciętny konwencjonalny filtr - $\phi_f = 99,85\%$ [12].



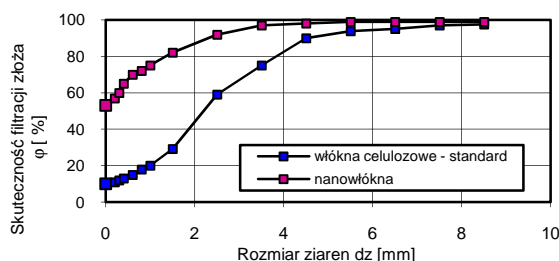
Rys. 16. Wkład filtracyjny „Power Core”: a) zasada działania wkładu filtracyjnego, b) kierunek przepływu powietrza, c) widok od czoła [12]

Coraz częściej do budowy przegród filtracyjnych stosowane są nanowłókna. Pojęcie to odnosi się zazwyczaj do włókien o średnicy mniejszej niż $1 \mu\text{m}$ [11], które produkowane są technologią „electrospinningu”-elektroprzędzenia. Ta nowoczesna technologia umożliwia w obecnej chwili wytwarzanie włókien o średnicach w zakresie od 3 nm do 1000 nm [9 - 12]. Metoda „electrospinningu” polega na formowaniu włókien polimerowych w silnym polu elektrycznym [9]. Wytwarzane w ten sposób włókna polimerowe formowane są w tak zwaną nanosieć, która może mieć grubość $1 \div 5 \mu\text{m}$ [11], przez co charakteryzuje się małymi oporami przepływu. Ze względu na ograniczone właściwości mechaniczne cienkiej warstwy nanosieci, nakłada się ją na podłoże (rys. 17) z konwencjonalnych materiałów filtracyjnych, które mają większą wytrzymałość i które umożliwiają użycie urządzeń do ich obróbki. Nanowłókna mogą być układane na jednej lub na dwu stronach podłoża, którym może być: poliester, nylon lub celuloza. Nanowłókna do filtracji powietrza wlotowego silników pojazdów stosują tylko czołowe firmy światowe zajmujące się problemami filtracji powietrza. Nanowłókninowe medium filtracyjne wraz z systemem automatycznego impulsowego oczyszczania wkładu zostało zastosowane do filtracji powietrza dla turbiny gazowej będącej jednostką napędową czołgu Abrams [11].



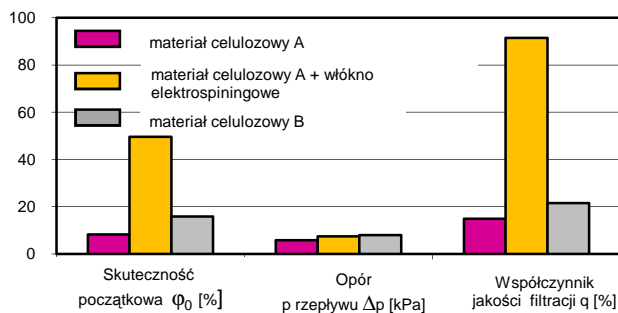
Rys. 17. Nanosieć o średnicach włókien około 250 nm ($0,25 \mu\text{m}$) naniesiona na złoże z włókien celulozowych o średnicach około $10 \mu\text{m}$: a) widok z góry, b) przekrój [11]

Zastosowanie nanowłókien zdecydowanie podnosi skuteczność filtracji, szczególnie ziaren pyłu poniżej $5 \mu\text{m}$ (rys. 18), bez istotnego wzrostu spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej [3,10,11].



Rys. 18. Skuteczność filtracji złoża wykonanego z włókien celulozowych o standardowej grubości oraz z nanowłókien [13]

Wpływ zastosowania warstwy włókien elektrospiningowych na efektywność filtracji materiałów stosowanych w filtrach silnikowych przedstawiono na rysunku 19.



Współczynnik jakości filtracji:

$$q = \frac{-\ln(1 - \varphi_0)}{\Delta p}$$

Rys. 19. Efektywność filtracji standardowych materiałów filtracyjnych oraz standardowego materiału filtracyjnego z cienką warstwą włókien elektrospiningowych [9]

Skuteczność początkowa φ_0 materiału z dodatkiem nanowłókien wzrosła do 50%, przy nieznacznym wzroście oporów przepływu Δp , współczynnik jakości filtracji q uzyskał wartość sześciokrotnie większą niż dla standardowego materiału celulozowego.

6. PODSUMOWANIE

Zasysane do silników spalinowych powietrze atmosferyczne może zawierać znaczne ilości pyłu, składającego się z nieregularnych, o ostrych krawędziach, ziaren twardych minerałów (SiO_2 , Al_2O_3), które po dostaniu się do cylindrów silnika powodują przyspieszone zużycie elementów współpracujących tarciowo, ograniczając ich trwałość. Przyjmuje się, że wszystkie ziarna pyłu powyżej $1 \mu\text{m}$ powodują przyspieszone zużycie współpracujących powierzchni, jednak największą intensywność zużycia powodują ziarna pyłu o rozmiarach równych minimalnej grubości filmu olejowego w danym skojarzeniu. W przypadku zaniku filmu olejowego każda cząstka o dowolnie małych rozmiarach może być powodem zużycia, z tym że agresywność ścierna pyłu maleje w przypadku, gdy rozmiary ziaren pyłu są mniejsze niż $5 \mu\text{m}$.

Wymaganą skuteczność i dokładność filtracji powietrza wlotowego współczesnych silników pojazdów mechanicznych zapewniają papiery filtracyjne będące dominującym materiałem filtracyjnym, włókniny oraz papiery filtracyjne z dodatkiem nanowłókien.

Wykonany z papieru filtracyjnego wkład powinien zapewniać maksymalną skuteczność filtracji, minimalny opór przepływu oraz maksymalną trwałość. Cel ten osiąga się poprzez odpowiednie kształtowanie wkładu (panel lub cylinder o podstawie koła lub owalu) tak, aby uzyskać największą powierzchnię w jednostce objętości przy jednoczesnym zachowaniu warunku maksymalnej prędkości przepływu powietrza przez papier - prędkości filtracji v_F , która nie powinna zasadniczo przekraczać wartości $0,06 \text{ m/s}$ w samochodach ciężarowych i $0,12 \text{ m/s}$ w samochodach osobowych.

Do filtracji powietrza w samochodach osobowych stosuje się jednostopniowe systemy filtracji w postaci panelu z papieru filtracyjnego lub włókniny. Obsługiwanie systemu filtracji polega na wymianie wkładu po określonym przez producenta przebiegu pojazdu oraz sprawdzeniu szczelności układu zasilania powietrzem.

Dwustopniowe systemy filtracji powietrza: multicyklon z usuwaniem na bieżąco pyłu z osadnika i ustawiona za nim szeregowo przegroda porowata wykonana w postaci wkładu z plisowanego papieru filtracyjnego zapewniają odpowiednią jakość (dokładność powyżej $5 \mu\text{m}$ i skuteczność $99,9\%$) powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza. Obsługiwanie systemu filtracji wykonuje się z chwilą osiągnięcia przez filtr określonej dla danego pojazdu wartości oporu dopuszczalnego Δp_{dop} i polega na wymianie wkładu filtracyjnego oraz czyszczeniu multicyklonu (monocyklonu). Przebiegi międzyobsługowe pojazdu ograniczone są dopuszczalnym oporem przepływu nie przekraczającym wartości $6-7 \text{ kPa}$, a czas jego osiągnięcia zależy od warunków eksploatacji, głównie stężenie zapylenia powietrza.

W układach zasilania powietrzem stosuje się coraz częściej materiały filtracyjne w postaci papieru z dodatkiem nanowłókien oraz inne technologie (PowerCore) kształtowania wkładów filtracyjnych, które przy mniejszej zajmowanej objętości niż wkład cylindryczny zapewniają wyższą skuteczność filtracji i chłonność pyłu. Jednak koszty wytwarzania nanowłókien powodują, że nie są one powszechnie stosowane w filtracji powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych.

7. LITERATURA

- [1] Baczewski K., Hebda M.: *Filtracja płynów eksploatacyjnych*, MCNEMT, Radom 1991/92.
- [2] *Diesel Engine Air Filtration*, materiały informacyjne firmy PALL Corporation, USA, 2004.
- [3] Durst M., Klein G., Moser N.: *Filtration in Fahrzeugen*, materiały informacyjne firmy Mann+Hummel GmbH. Ludwigsburg, Niemcy 2005.
- [4] Dzierżanowski P. i inni.: *Turbinowe silniki śmigłowe i śmigłowcowe*, WKŁ, Warszawa 1985.
- [5] Dziubak T.: *Analiza procesu filtracji powietrza wlotowego do silnikach pojazdów specjalnych*, Rozprawa habilitacyjna, WAT Warszawa 2008.
- [6] Dziubak T.: *Problemy filtracji powietrza w silnikach spalinowych pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, Z. 4 (124), 2000.
- [7] Elsässer A., Braun R., Jensen H.: *Luftversorgungsmodule für die neuen Common-Rail Dieselmotoren OM611 und OM612 von Daimler Chrysler*, MTZ, 61 (2000), No 3.
- [8] Fitch J.: *Clean Oil Reduces Engine Fuel Consumption*, Practicing Oil Analysis, 11-12, 2002.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Jaroszczyk T., Fallon S. L., Schwartz S. W.: *Development of high dust capacity, high efficiency engine air filter with nanofibers*, International Congress on Powertrain and Transport KONES 2008, Stare Jabłonki,
- [12] *PowerCore a Donaldson Filtration Technology*, materiały informacyjne firmy Donaldson.
- [13] Schaeffer J. W., Olson L. M.: *Air Filtration Media for Transportation Applications*, Filtration & Separation, Vol. 35, No 2, 1998.
- [14] Szczeciński S.: *Odpylanie powietrza wlotowego*, Wojskowy Przegląd Techniczny, Nr 6, 1983.
- [15] Truhan J.: *Filter Performance as the Engine Sees It*, Filtration & Separation, Vol. 34, No 12, 1997.