



Problemy filtracji powietrza zasysanego do spalinowych silników pojazdów mechanicznych

TADEUSZ DZIUBAK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Przedstawiono wpływ zanieczyszczeń płynów eksploatacyjnych na zużycie elementów silnika i jego trwałość. Scharakteryzowano systemy filtracji powietrza wlotowego pojazdów mechanicznych. Omówiono podstawowe mechanizmy filtracji w przegrodzie porowatej. Pokazano możliwość poprawy efektywności filtracji powietrza wlotowego do silnika przy wykorzystaniu materiałów z dodatkiem nanowłókien.

Słowa kluczowe: zużycie elementów silników, filtr powietrza, materiał filtracyjny, mechanizmy filtracji, nanowłókna

Symbole UKD: 621.43

1. Wprowadzenie

Dużą rolę w uzyskaniu dużej trwałości i niezawodności spalinowych silników, a tym samym długich przebiegów międzynaprawczych, odgrywa czystość płynów eksploatacyjnych, a szczególnie powietrza zasysanego do silników. Powietrze atmosferyczne zawiera wiele zanieczyszczeń, które są emitowane do atmosfery w wyniku działalności samej 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 przez wiatr. Eksploatatorów pojazdów mechanicznych interesują głównie pyły, które zasysane wraz z powietrzem zarówno przez tłokowe silniki spalinowe, jak i turbinowe powodują przyspieszone zużycie współpracujących elementów.

Zapewnienie odpowiedniej czystości powietrza wlotowego do silników spalinowych pojazdów mechanicznych oraz maszyn roboczych było zawsze i pozostaje nadal ważnym problemem eksploatacyjnym, a także konstrukcyjnym, szczególnie gdy pojazdy eksploatowane są w warunkach dużego (ponad 1000 mg/m^3) zapylenia powietrza. Dotyczy to głównie pojazdów specjalnych i wojskowych: czołgów, bwp, dział samobieżnych, samochodów specjalnych oraz maszyn roboczych drogowych i budowlanych.

W celu zapewnienia dużej trwałości i niezawodności silników wyposaża się je w filtry powietrza, od których wymaga się skuteczności odpylania powyżej 99% w całym zakresie prędkości obrotowych i obciążeń silnika oraz wymaganego przebiegu pojazdu. Stosowane obecnie do filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych papiery filtracyjne zapewniają dokładność filtracji powyżej $3\div 5 \mu\text{m}$ [3]. Największe zużycie elementów silnika (skojarzenie: tłok–pierścienie tłokowe–cylinder, czop–panewka, tłoczek–cylinderek pompy wtryskowej) powodują ziarna pyłu o rozmiarach $2\div 40 \mu\text{m}$, chociaż ziarna pyłu spoza tego zakresu (zarówno mniejsze, jak i większe) także są przyczyną znaczącego zużycia [1, 4, 9, 11]. Dominuje pogląd, że największe zużycie powodują ziarna pyłu, których średnica równa jest grubości filmu olejowego między współpracującymi powierzchniami. W zależności od skojarzenia współpracujących części, minimalna grubość filmu olejowego h_{min} przyjmuje różne wartości (tab. 1) i zmienia się w szerokim zakresie w zależności od warunków pracy.

TABELA 1

Grubość filmu olejowego w typowych skojarzeniach silnika spalinowego [7]

Skojarzenie	Grubość filmu olejowego $h_{\text{min}}, \mu\text{m}$
Pierścień – cylinder	0,3÷7
Czop – panewka (łożyska korbowodowe)	0,5÷20
Czop – panewka (łożyska główne wału korbowego)	0,8÷50
Łożyska turbosprężarki	0,5÷20
Tłok – sworzeń tłokowy	0,5÷15
Zespół zaworowy	0÷10
Przekładnia zębata	0÷1,5

W tych warunkach teoretycznie każda cząstka o dowolnie małych rozmiarach może być powodem zużycia. Na przykład największe zużycie skojarzenia tłoczek–cylinderek pompy wtryskowej powodowały ziarna pyłu o rozmiarach $9\div 14 \mu\text{m}$ [11].

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 [9, 16].

Typowe motoryzacyjne filtry powietrza są zauważalnie nieefektywne przy zatrzymywaniu ziaren pyłu poniżej $5\ \mu\text{m}$. Dlatego też ciągle prowadzone są prace mające na celu wytworzenie materiałów filtracyjnych o zwiększonej dokładności filtracji małych ziaren pyłu.

2. Wpływ zanieczyszczeń płynów eksploatacyjnych na zużycie elementów silnika

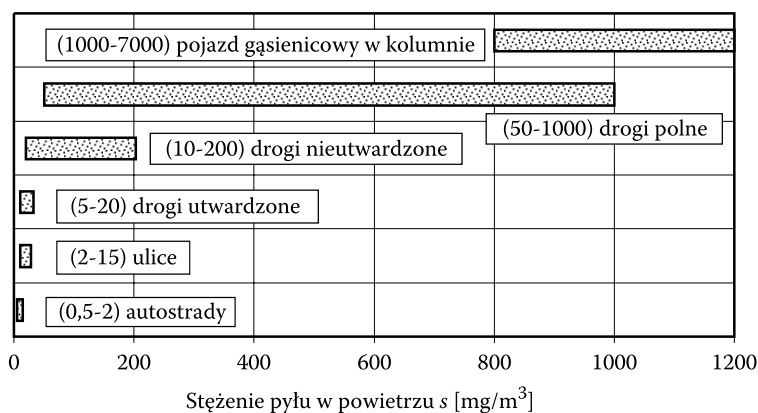
Wartość zużycia elementów silnika zależy od: właściwości pyłu zasysanego wraz z powietrzem do cylindrów silnika (stężenia zapylenia powietrza, składu granulometrycznego pyłu, parametrów fizyczno-chemicznych pyłu takich jak twardość i kształt), właściwości samego materiału, parametrów silnika (obciążenie, parametry regulacyjne, wartości luzów w skojarzeniu). Na przyspieszone zużycie spowodowane pyłem, który przedostał się do paliwa z otoczenia zarówno podczas użytkowania, jak i dystrybucji, narażone są także elementy precyzyjne pompy wtryskowej i wtryskiwaczy. Skojarzenia czop–panewka ulegają przyspieszonemu zużyciu z powodu znajdujących się w oleju zanieczyszczeń, których głównym składnikiem jest pył dostający się do układu smarowania z otoczenia oraz z obszaru skojarzenia tłok–pierścienie tłokowe–cylinder (T-P-C).

Skład granulometryczny i chemiczny oraz twardość ziaren pyłu zależne są od rodzaju podłoża. Na wartość stężenia zapylenia mają dodatkowo wpływ warunki atmosferyczne, układ jezdny pojazdu (kołowy lub gąsienicowy) czy też warunki ruchu pojazdów. Eksploatator nie ma wpływu na zmianę właściwości pyłu, może jedynie zminimalizować wartość stężenia zapylenia oraz rozmiar ziaren w zasysanym do silnika powietrzu, poprzez stosowanie odpowiednich filtrów powietrza i miejsca usytuowania wlotu powietrza w pojeździe.

W przeciętnych warunkach eksploatacji pojazdów i maszyn, stężenie zapylenia powietrza [mg/m^3] podawane jest głównie w zależności od rodzaju nawierzchni dróg i rodzaju poruszających się pojazdów (rys. 1) [1, 5].

Podczas poruszania się drogami asfaltowymi, silnik samochodu osobowego o pojemności $1000\ \text{cm}^3$ 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 $40 \div 400$ g pyłu, natomiast do silnika czołgu T-72 ($Q_{WS} = 3400\ \text{m}^3/\text{h}$), eksploatowanego po poligonowym

placu ćwiczeń, może dostać się wraz 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 ze średnią prędkością 60 km/h, dostaje się wraz powietrzem od 0,1 do 0,75 mg pyłu. Natomiast silnik czołgu T-72, który wykonał przebieg 1000 km ze średnią prędkością 20 km/h przy stężeniu zapylenia powietrza 1 g/m^3 zasysa wraz z powietrzem ponad 165 g pyłu. Część pyłu, która przedostała się do cylindrów silnika jest wydalana ze spalinami, pozostała część powoduje przyspieszone zużycie powierzchni elementów.



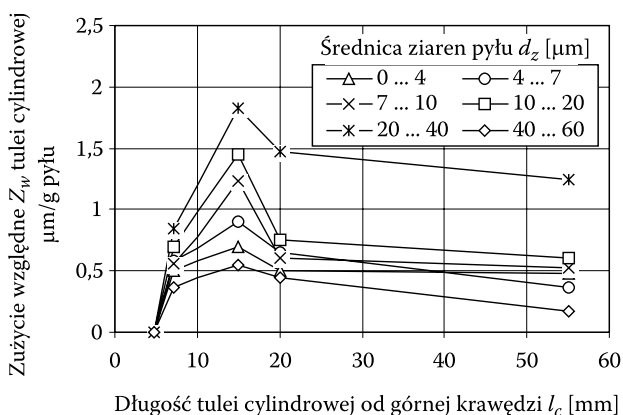
Rys. 1. Maksymalne spotykane wartości stężenia zapylenia powietrza w zależności od rodzaju podłoża [5]

Wartość zużycia elementów silnika zależy od ilości i właściwości pyłu zasysanego wraz z powietrzem do cylindrów silnika: stężenia zapylenia powietrza, składu granulometrycznego pyłu, parametrów fizyczno-chemicznych (twardość i kształt), właściwości samego materiału, a także od parametrów silnika (obciążenie, parametry regulacyjne, wartości luzów w skojarzeniu). Wpływ parametrów pyłu zasysanego wraz z powietrzem do silnika na wartość zużycia rozpatrywany jest w stosunku do zużycia górnej części cylindra lub pierwszego pierścienia jako elementów silnika, które są najbardziej narażone na działanie pyłu. Wartość zużycia określa się głównie podczas badań eksperymentalnych na rzeczywistych silnikach.

Autor pracy [2] przytacza wyniki badań, według których maksymalne zużycie tulei cylindrowej wywołane było przez ziarna pyłu o rozmiarach $d_z = 20 \div 40 \mu\text{m}$. Znacznie mniejsze (rys. 2) zużycie powodowały ziarna pyłu o rozmiarach $d_z = 0 \div 4 \mu\text{m}$ i $d_z = 40 \div 60 \mu\text{m}$.

Badania pojazdów KamAZ wyposażonych w filtr z wkładem papierowym wykazały, że intensywność zużycia tulei cylindrowych w GMP na poziomie pierw-

szego pierścienia tłokowego miała średnią wartość $0,27 \mu\text{m}/1000 \text{ km}$ przebiegu, gdy pojazdy były eksploatowane na drogach asfaltowych, natomiast podczas eksploatacji tych pojazdów na drogach gruntowych (przy transporcie rudy żelaza) intensywność zużycia wzrosła do $1,6 \mu\text{m}/1000 \text{ km}$, a więc sześciokrotnie [13].

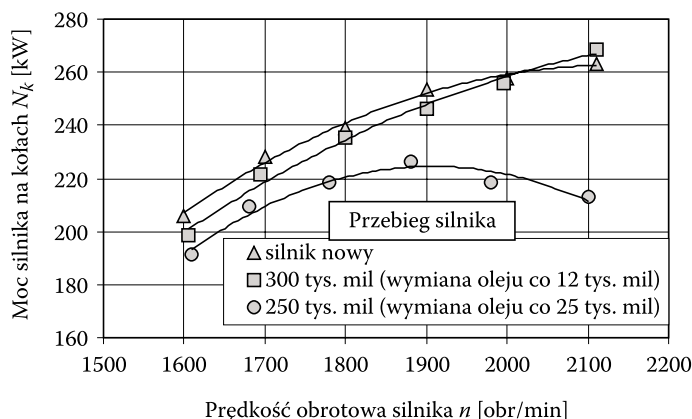


Rys. 2. Zużycie gładzi cylindrowej dla różnych frakcji w przeliczeniu na 1 g dozowanego pyłu [2]

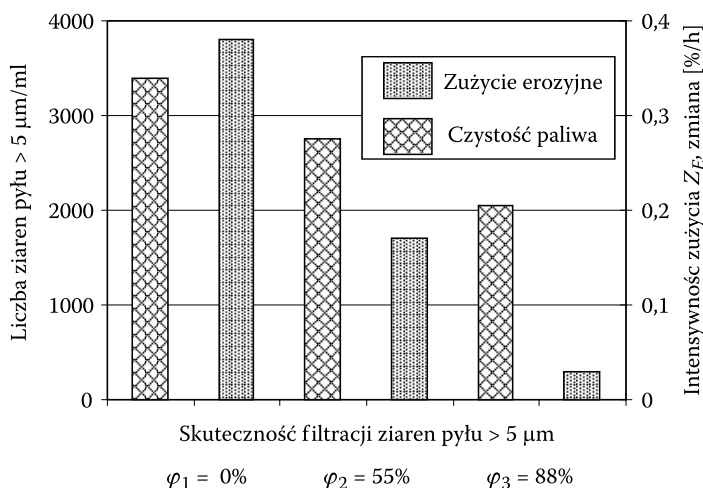
To największe zużycie skojarzenia T-P-C w GMP wynika z faktu, że w obszarze tym znajdują się ziarna pyłu świeżo zassane z powietrzem, jeszcze nierozdrobnione zderzeniami i miażdżeniem stykających się części silnika. W tej strefie temperatura elementów skojarzenia T-P-C dochodzi do 700 K , co obniża odporność metali na ścieranie. Ta wysoka temperatura powoduje spadek lepkości oleju smarowego, a tym samym zmniejszenie grubości filmu olejowego między współpracującymi powierzchniami, które coraz częściej stykają się z ziarnami pyłu o mniejszych średnicach. Zmiana kierunku ruchu tłoka w skrajnych położeniach tulei cylindrowej powoduje, że jego prędkość w tym obszarze jest najmniejsza, a w GMP i DMP równa zero, co prowadzi do ograniczania filmu olejowego lub jego całkowitego zaniku. W związku z tym mogą występować okresy nawet bezpośredniego metalicznego styku pomiędzy pierścieniem tłokowym a tuleją.

Z badań autora pracy [7] wynika, że zanieczyszczenia zawarte w oleju są przyczyną przyspieszonego zużycia elementów silnika, co w efekcie powoduje spadek mocy i wzrost jednostkowego zużycia paliwa. 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, w którym wymianę oleju wykonywano dwukrotnie częściej. Przy prędkości obrotowej $n = 2100 \text{ obr/min}$ spadek mocy miał wartość ponad 18 % (rys. 3).

Wpływ koncentracji ziaren pyłu $d_z > 5 \mu\text{m}$ zawartych w paliwie na zużycie erozyjne wtryskiwacza przedstawiono na rysunku 4. Badawczą koncentrację za-



Rys. 3. Zmiana mocy silnika Cummins N14 nowego i po różnych przebiegach pojazdu z wymianą oleju co 12 tys. i 25 tys. mil



Rys. 4. Wpływ zawartości zanieczyszczeń w paliwie na intensywność zużycia erozyjnego wtryskiwacza [16]

nieczyszczeń uzyskano poprzez dodanie do układu paliwowego pyłu testowego. Uzyskana w ten sposób wartość koncentracji zanieczyszczeń była o 1% większa od koncentracji, jaką uzyskuje się w paliwie podczas jazdy samochodu po autostradzie. Wyższa efektywność filtracji powoduje zmniejszenie zarówno stężenia zanieczyszczeń, jak i współczynnika erozji [16].

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,

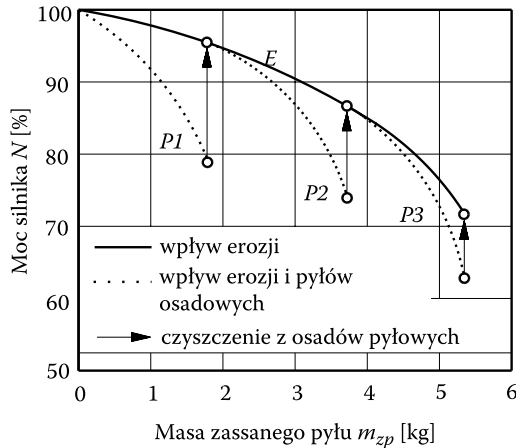
a tym samym spadek ciśnienia w końcu suwu sprężania, a w konsekwencji spadek mocy silnika. Zwiększony w skojarzeniu T-P-C luz zwiększa zjawisko pompującego działania pierścieni tłokowych, a tym samym wzrost zużycia oleju. Nadmierne zużycie ściernie skojarzeń czop–panewka powoduje zwiększenie luzów, a 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 przyspieszone zużycie, a nawet zatarcie łożysk.

Mechanizm destrukcyjnego oddziaływania ziaren pyłu na części i zespoły silników turbinowych jest nieco inny niż w silnikach tłokowych. W spalinowych silnikach turbinowych nie występują części w ruchu posuwisto-zwrotnym ani łożyska ślizgowe. Duże prędkości strumienia powietrza (150÷250 m/s) i spalin (ponad 300 m/s), duże prędkości obwodowe zespołów wirnikowych (200÷500 m/s) powodują, że ziarna pyłu, szczególnie o dużych rozmiarach, w chwili kontaktu z opływającymi powierzchniami części konstrukcyjnych silnika turbinowego dysponują znaczną energią kinetyczną, z której wynika duża siła uderzeń ziaren. Następuje wyrywanie mikrocząstek metalu z powierzchni części, naruszenie ich powierzchniowej struktury oraz kształtów geometrycznych. Według autorów prac [15, 17] najintensywniej zużywającym się zespołem silnika turbinowego jest sprężarka, mniej — zespół turbiny, co wynika ze znacznego już rozdrobnienia ziaren, które przedostały się przez sprężarkę i komorę spalania, a także ze znacznie większej odporności na erozję materiałów używanych na części turbiny, a zwłaszcza na kierownice i łopatki wirnikowe turbiny. Bardziej odporne na zużycie są sprężarki promieniowe, stosowane powszechnie w tłokowych silnikach doładowanych.

Zasadniczym skutkiem oddziaływania, głównie dużych ziaren pyłu przedostającego się wraz ze strumieniem powietrza wlotowego do silników turbinowych jest przyspieszone zużycie (zmiana geometrii) poszczególnych części i całych zespołów konstrukcyjnych silników w obrębie kanału przepływowego oraz pogorszenie gładkości ich powierzchni, a w konsekwencji obniżenie sprawności i trwałości silnika.

Jednocześnie, jak podają autorzy prac [15, 17] ziarna małych rozmiarów, na ścianach kadłubów sprężarek, zwłaszcza w nieruchomych narożach ścian i kierownic tworzą osady pyłowe. Podobnie na ściankach komór spalania i w kanałach wieńców dyszowych turbin zachodzi zjawisko tworzenia osadów pyłowych wiązanych produktami spalania jako lepiszczem. Oba oddziaływania, w następstwie zmniejszenia sprawności procesów zachodzących w kanale przepływowym, powodują równolegle pogorszenie charakterystyk efektywnościowych silnika: spadek mocy i wzrost jednostkowego zużycia paliwa. Pokazane

na rysunku 5 zmiany mocy silnika turbinowego są wynikiem oddziaływania erozyjnego (linia *E*) i dodatkowo masy pyłu zasysanego w trzech kolejnych próbach (linie *P1*, *P2*, *P3*).



Rys. 5. Wpływ masy zasysanego pyłu na moc silnika turbinowego [15]

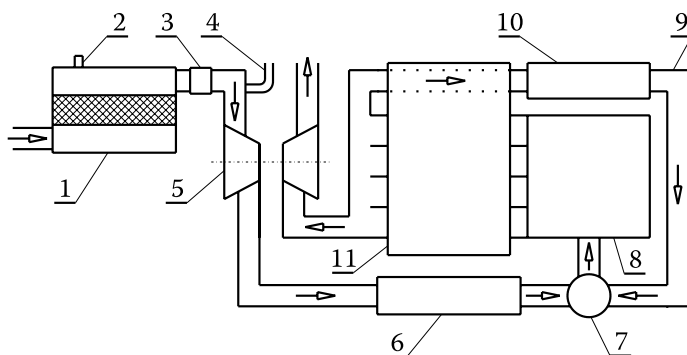
W wielu pasażerskich liniach lotniczych świata (między innymi w PLL LOT od końca 1987 roku) już od kilkadziesiąt lat stosuje się mycie silników specjalnie spreparowanymi cieczami z zawiesinami pyłów pochodzenia roślinnego. Mycie to polega na wtryskiwaniu tych cieczy do wlotów silników z obracającymi się wirnikami z prędkościami obrotowymi, takimi jak podczas tzw. „zimnego rozruchu” — bez dostarczania paliwa i jego zapłonu. Zabieg mycia przeprowadza się co kilkadziesiąt do kilkuset godzin lotu. Skutki w postaci kilkuprocentowego zmniejszenia zużycia paliwa w stosunku do rejestrowanej w końcowej fazie lotów przed myciem, czynią ten zabieg opłacalnym także z powodu wydłużenia okresu międzynaprawczego silników.

3. Systemy filtracji powietrza wlotowego do silników spalinowych pojazdów mechanicznych

Zadaniem układu zasilania powietrzem tłokowego silnika spalinowego jest dostarczenie do jego cylindrów powietrza w odpowiednich ilościach i o odpowiednich parametrach w taki sposób, aby zapewnić prawidłowy przebieg spalania paliwa we wszystkich zakresach. Głównymi elementami układu zasilania powietrzem tłokowego silnika spalinowego pojazdu mechanicznego są filtr powietrza wraz z pompką, przewody dolotowe (ewentualnie sprężarka doładowująca i chłodnica powietrza), kolektor i kanały dolotowe w głowicy.

Filtr powietrza lokalizuje się w pojeździe tak, aby zapewnić: pobór powietrza ze strefy mało zapyłonej, łatwy dostęp w czasie prac obsługowych, prosty i łatwy montaż wkładu filtracyjnego i innych elementów wymiennych, szczelność jego połączeń z kolektorem dolotowym, minimalną długość przewodów łączących o dużych przekrojach poprzecznych. Filtry powietrza silników pojazdów osobowych, ze względu na małe wymiary, montowane są w przedziale silnikowym. Kształt filtrów dopasowuje się do ograniczonej przestrzeni tego przedziału. W przypadku silników z wtryskiem paliwa, filtry powietrza mogą być montowane do nadwozia, a ich kształty zbliżone są do prostopadłościanu. Wkład filtracyjny wykonany jest wtedy w postaci panelu, natomiast powietrze do filtru zasysane jest najczęściej bezpośrednio z otoczenia czerpnią usytuowaną z przodu pojazdu w szczelinie między maską a nadwoziem.

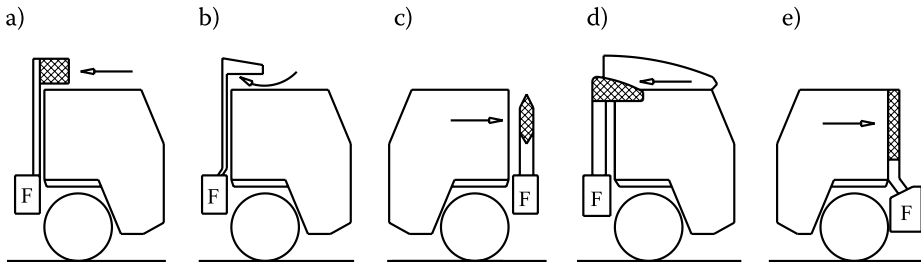
W nowoczesnych samochodach osobowych układ zasilania powietrzem wykonuje się jako jeden moduł o zwartej budowie, w którym zintegrowano wiele funkcji. Pokazany na rysunku 6 moduł układu zasilania powietrzem czterocylindrowego silnika OM611 z wtryskiem Common-Rail samochodu Daimler-Chrysler zawiera: elementy doprowadzenia powietrza do filtru, filtr powietrza wraz z czujnikiem dopuszczalnego oporu przepływu, przewody doprowadzające powietrze do cylindrów, elementy układu recyrkulacji spalin, układ przewietrzania skrzyni korbowej oraz masowy przepływomierz powietrza [6].



Rys. 6. Schemat układu zasilania powietrzem silnika z wtryskiem Common-Rail samochodu osobowego: 1 – filtr powietrza; 2 – czujnik oporu dopuszczalnego; 3 – masowy przepływomierz powietrza; 4 – przewód odpowietrzenia skrzyni korbowej; 5 – turbosprężarka; 6 – chłodnica powietrza wlotowego do silnika; 7 – zawór zwrotny; 8 – kolektor dolotowy powietrza; 9 – przewód układu recyrkulacji spalin; 10 – chłodnica spalin; 11 – silnik

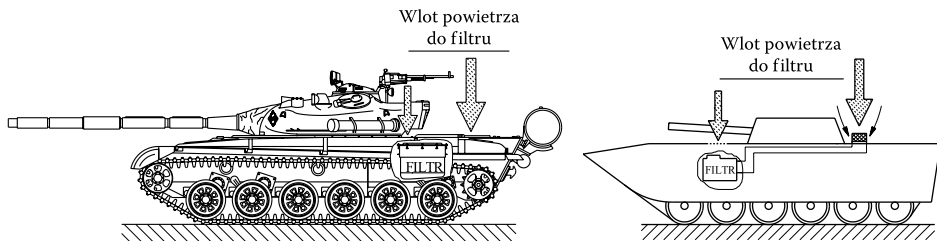
We współczesnych samochodach ciężarowych filtry powietrza, ze względu na duże gabaryty, umieszcza się najczęściej z tyłu kabiny kierowcy (blisko silnika), nisko nad jezdnią, mocując je do ramy lub kabiny (rys. 7). Zapewnia to łatwy do-

stęp podczas prac obsługowych. Przy takim zamocowaniu filtr nie jest narażony na oddziaływanie drgań silnika, lecz tylko na drgania nadwozia. Czerpnię filtru powietrza lokalizuje się najczęściej nad kabiną lub z jej boku, jak najwyżej i jak najbardziej z przodu pojazdu, w miejscu zapewniającym tym samym zasysanie powietrza o jak najmniejszym stężeniu zapylenia. Czerpnię i filtr łączy się przewodem mającym duży przekrój poprzeczny i zakola wykonane dużymi promieniami.



Rys. 7. Schematy typowego usytuowania czerpni powietrza w wybranych pojazdach ciężarowych: a) Scania D12A; b) Jelcz C-424; c) Volvo FL8; d) Volvo FH16/520; e) Iveco Euro Cargo 8060

W wojskowych pojazdach gaśnicowych (czołgi, transportery, bojowe wozy piechoty) filtry powietrza umieszcza się wewnątrz szczelnego pancerza (rys. 8).



Rys. 8. Miejsce poboru oraz schemat lokalizacji filtru powietrza: a) w czołgu T-72; b) w bojowym wozie piechoty BWP-1

Pobór powietrza do filtra następuje wtedy z przestrzeni przedziału napędowego, dokąd powietrze napływa przez specjalny otwór w pancerzu oraz przez chłodnicę układu chłodzenia (czołg T-72) lub może być doprowadzone bezpośrednio specjalnym kanałem znad powierzchni pancerza (BWP-1), gdzie znajduje się czerpnia (rys. 8b). W okresie zimowym do filtra powietrza BWP-1 napływa dodatkowo powietrze ogrzane w wyniku przepływu przez chłodnicę układu chłodzenia.

W pojazdach osobowych, które eksploatowane są przy małym stężeniu zapylenia powietrza stosowane są filtry jednostopniowe z porowatą przegradą papierową.

Samochody ciężarowe, maszyny robocze, pojazdy specjalne i pojazdy wojskowe, a w tym głównie czołgi, bojowe wozy piechoty oraz pojazdy specjalne zbudowane na tych podwoziach, ponieważ eksploatowane są najczęściej w warunkach dużego zapylenia, wyposażone są w filtry dwustopniowe. Pierwszym stopniem filtracji jest wtedy multicyklon — bateria cyklonów o małych średnicach ($D = 40$ mm), a drugim — ustawiona za nim szeregowo przegroda porowata.

Obecnie najszersze zastosowanie w układach zasilania powietrzem silników współczesnych pojazdów eksploatowanych w warunkach dużych stężeń zapylenia powietrza (zarówno w kraju, jak i za granicą) ma system filtracji „multicyklon — wkład papierowy”. System ten znajduje się między innymi w układzie zasilania powietrzem silników: działa samobieżnego 2S-1, w czołgach Leopard i Abrams oraz samochodach ciężarowych, na przykład Volvo, Scania, DAF, autobusu Autosan czy kombajnu Bizon. Do obecnej chwili w wielu pojazdach wojskowych: samochodach ciężarowo-terenowych STAR 266, czołgach T-72 oraz PT-91, eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia, powszechnie stosowany jest system filtracji starszego typu „multicyklon – nawilżone złożo siatkowe”.

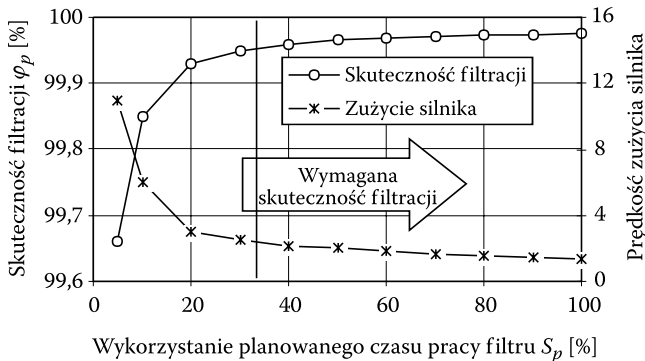
Dominującym materiałem filtracyjnym, stosowanym do filtracji powietrza wlotowego współczesnych silników pojazdów mechanicznych, są papiery filtracyjne, które produkowane są w wielu różnorodnych gatunkach przez wyspecjalizowane firmy.

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 $0,04 \div 0,08$ m/s [1, 5]. Kształtowanie papieru wykonuje się w formie plisowanej taśmy, z której następnie może być w różny sposób zmontowany wkład filtracyjny. Najczęściej wkłady filtracyjne ukształtowane są w cylindry o podstawie koła lub owalu oraz cylindry panelowe.

Charakterystycznym zjawiskiem występującym w filtrze powietrza z wkładem papierowym jest powolny wzrost skuteczności filtracji w początkowym okresie czasu jego pracy. Na elementach struktury porowatej osadzają się cząstki zanieczyszczeń. Tworzą one warstwę, która spełnia funkcję struktury porowatej dla następnych cząstek. Obok osadzania ziaren pyłu na elementach struktury, następuje również osadzanie zanieczyszczeń na wcześniej zatrzymanych ziarnach. Powstają rozrastające się często do znacznych rozmiarów aglomeraty, które zapełniają przestrzeń między włóknami. Zmniejszają się odległości między powierzchniami elementów obłożonych pyłem, a stąd w konsekwencji rosną zdolności filtracyjne warstwy, ale też i opory przepływu. Autorzy prac [9, 14] podają, że w tym czasie zużycie silnika jest znaczne.

Z rysunku 9 wynika, że filtr powietrza dopiero po przekroczeniu 35% przewidywanego czasu pracy zapewnia wymaganą skuteczność filtracji powietrza. Jej wartość systematycznie rośnie, aż do chwili wykonania obsługiwanego. Najwięk-

szą dokładność i skuteczność filtracji, ale także i największy opór przepływu, filtr osiąga więc w końcowym okresie pracy, czyli w chwili wymiany wkładu filtracyjnego. Poważnym błędem popełnianym przez użytkowników pojazdów i na stacjach serwisowych jest więc wymiana wkładu filtracyjnego wcześniej niż zaleca to producent silnika.



Rys. 9. Skuteczność filtracji oraz prędkość zużycia silnika w zależności od stopnia planowanego czasu jego pracy [10]

4. Filtracja powietrza przez przegrodę porowatą

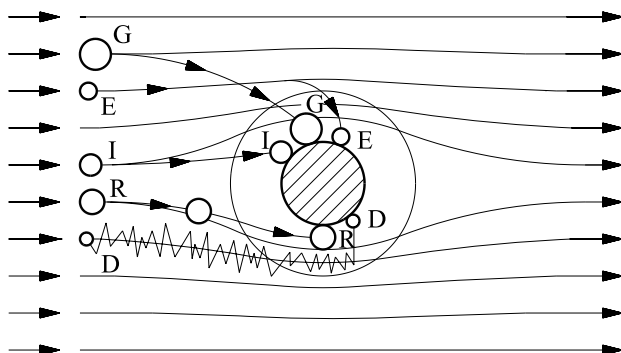
Proces filtracji aerozolu w przegrodzie porowatej jest procesem bardzo skomplikowanym, zmiennym w czasie, zależnym od wielu sił i zjawisk, charakteryzującym się wzajemnym oddziaływaniem cząstek fazy zdyspergowanej (pyłu) i fazy dyspersyjnej (powietrza) z elementami przegrody porowatej. Jego istotą jest zatrzymywanie ziaren pyłu wewnątrz warstwy filtracyjnej i na jej powierzchni wskutek działania różnych mechanizmów filtracji: zderzenia bezwładnościowego (inercyjnego), bezpośredniego zaczepiania, dyfuzyjnego, grawitacyjnego opadania, interferencyjnego czy elektrostatycznego (rys. 10).

Największe ziarna niemieszczące się pomiędzy sąsiednimi elementami mogą być zatrzymywane w wyniku mechanizmu sitowego, którego oddziaływanie w początkowej fazie procesu filtracji jest relatywnie małe.

W teorii filtracji aerozolu przyjmuje się, że procesy zatrzymywania ziaren pyłu następują na izolowanych cylindrach (kulach) lub idealnych strukturach porowatych przy udziale jednego, rzadziej 2 lub 3 z podstawowych mechanizmów. W rzeczywistej przegrodzie porowatej osadzanie się ziaren pyłu na włóknach następuje wskutek jednoczesnego oddziaływania kilku mechanizmów filtracji: bezpośredniego zaczepiania, zderzenia bezwładnościowego, dyfuzyjnego i sitowego.

Mechanizm sitowy odgrywa znaczenie tylko w przypadku zastosowań do filtracji dużych ziaren pyłu. Dostępne w handlu włókna są elektrycznie obojętne,

a więc mechanizm elektrostatyczny można pominąć. Mechanizmy: bezpośredniego zaczepiania, bezwładnościowy i dyfuzyjny są więc decydujące przy filtracji aerozolu.



Rys. 10. Zjawisko zatrzymywania ziaren pyłu na elemencie włókna wskutek mechanizmów: D — dyfuzji; I — zderzenia bezwładnościowego (inercyjnego); E — oddziaływania elektrostatycznego; G — grawitacji; R — bezpośredniego zaczepiania

Skuteczność filtracji pojedynczego włókna na skutek mechanizmu bezpośredniego zaczepiania (dla płynu lepkiego) można opisać zależnością [1]:

$$E_B = \frac{1}{2(2 - \ln \text{Re})} \left[2(1 + B) \ln(1 + B) - \frac{B(2 + B)}{1 + B} \right], \quad (1)$$

gdzie: $B = \frac{d_z}{d_w}$ — (d_z — średnica ziarna, d_w — średnica włókna);

Re — liczba Reynoldsa

Efektywność filtracji tego mechanizmu, jak wynika z powyższej zależności, jest funkcją parametru B , który wyraża wzajemną relację między średnicą ziarna pyłu d_z oraz włókna d_w i systematycznie rośnie dla coraz większych ziaren pyłu i coraz mniejszych średnic włókien.

Efektywność filtracji pojedynczego włókna na skutek wystąpienia mechanizmu bezwładnościowego można wyrazić zależnością [9]:

$$E_I = \frac{St}{2Ku^2}, \quad (2)$$

gdzie: $St = \frac{S_D}{d_w}$ — liczba Stokesa;

S_D — droga zatrzymania.

Efektywność filtracji dla mechanizmu bezwładnościowego jest odwrotnie proporcjonalna do średnicy włókna d_w .

Efektywność filtracji pojedynczego włókna na skutek wystąpienia mechanizmu dyfuzyjnego opisuje zależność [9]:

$$E_D = \frac{2,7}{Pe^{2/3}}, \quad (3)$$

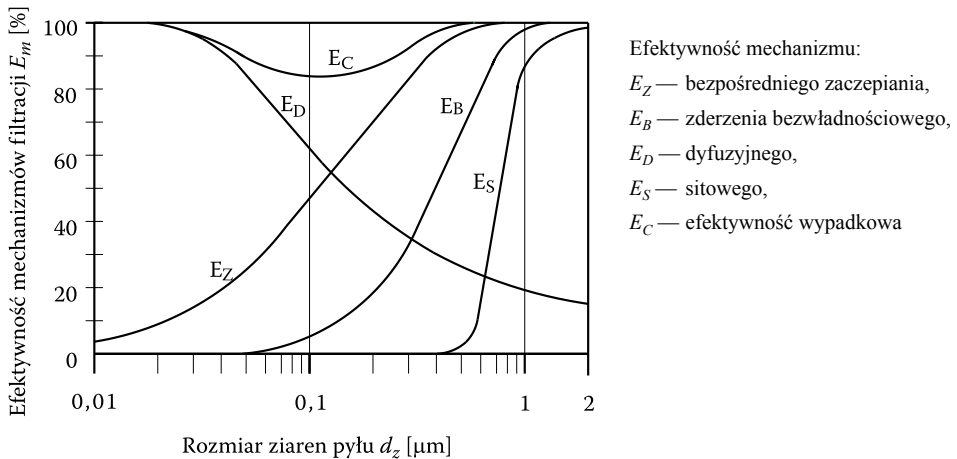
gdzie: $Pe = \frac{d_w \cdot v}{k_D}$ — liczba Pecleta;

k_D — współczynnik dyfuzji;

v — prędkość przepływu aerozolu.

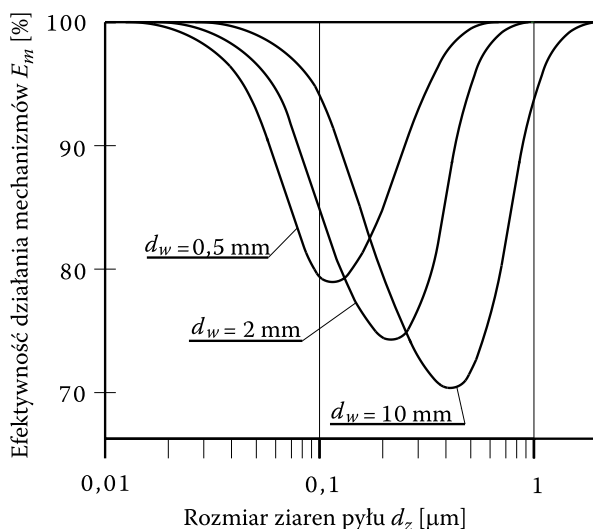
Podobnie jak przy poprzednich mechanizmach filtracji, zmniejszenie średnicy włókna d_w zwiększa efektywność filtracji odpowiadającą mechanizmowi dyfuzji.

Wraz ze wzrostem rozmiarów ziaren pyłu, efektywność działania mechanizmu bezpośredniego zaczepiania, zderzenia bezwładnościowego i sitowego rośnie, a mechanizmu dyfuzyjnego — maleje. Dla danej prędkości przepływu aerozolu i pewnego rozmiaru ziarna pyłu wypadkowa efektywność działania wymienionych mechanizmów filtracji przyjmuje minimum (rys. 11).



Rys. 11. Efektywność osadzania cząstek wskutek działania podstawowych mechanizmów filtracji pyłu dla zwykle stosowanych w technice średnic włókien [14]

Obniżenie wymiarów włókna w przegrodzie filtracyjnej (przeznaczonego dla tego samego spadku ciśnienia) powoduje przesunięcie minimum skuteczności w stronę mniejszych wymiarów włókien i ziaren pyłu przy jednoczesnym wzroście efektywności filtracji dla wszystkich wymiarów ziaren pyłu (rys. 12).



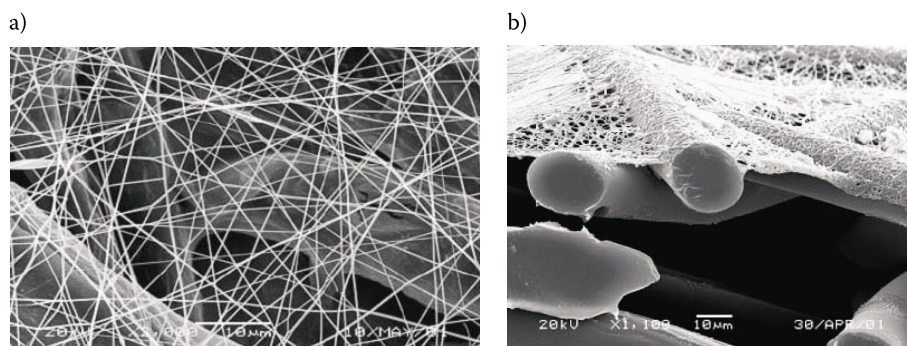
Rys. 12. Wypadkowa efektywność osadzania cząstek wskutek działania podstawowych mechanizmów filtracji dla różnych średnic włókien [9, 10]

5. Nanowłókna w budowie materiałów filtracyjnych

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 $1 \mu\text{m}$ [9]. Chociaż włókna szklane o średnicach poniżej $1 \mu\text{m}$ (1000 nm) wytwarzane są już od pewnego czasu, to pojęcie nanowłókien odnosi się w tej chwili do włókien, które produkowane są technologią electrospinningu, czyli elektroprzędzenia. Metoda electrospinningu, od jej opatentowania w 1934 roku w USA, doczekała się szybkiego rozwoju w ostatnich latach i stała się jednym z szybko rozwijających się działów nanotechnologii. Ta unikatowa i nowoczesna technologia umożliwia obecnie wytwarzanie włókien o średnicach w zakresie od 3 do 1000 nm [9, 10, 12].

Metoda electrospinningu polega na formowaniu włókien polimerowych w silnym polu elektrycznym [10, 12]. Jest to stosunkowo prosta metoda ich produkcji w fazie laboratoryjnej. Na kroplę polimeru (np. znajdującą się na końcu pipety), umieszczoną w polu elektrycznym oprócz siły grawitacji (w tym przypadku pomijalnie małej w stosunku do pozostałych sił) działa siła elektrostatyczna. Kiedy siła elektrostatyczna działająca na powierzchnię polimeru przekroczy siłę napięcia powierzchniowego, następuje „wyciąganie” bardzo małej średnicy strumienia naładowanego elektrycznie polimeru. W pierwszym etapie ruchu strumień porusza się wzdłuż linii prostej, a następnie jego tor zostaje zakrzywiony i ruch odbywa się po linii śrubowej. Na tym odcinku siły elektrostatyczne powodują bardzo sil-

ne „wyciąganie” powstałego włókna, przez co jego średnica ulega zmniejszeniu o tysiące, a nawet miliony razy, osiągając wymiary kilkudziesięciu czy kilkuset nanometrów. Poprzez wybór odpowiedniego polimeru i systemu rozpuszczania mogą być wytwarzane włókna o średnicach $40 \div 2000$ nm [9, 12, 14]. Wytwarzane w ten sposób włókna polimerowe zbierane są i formowane w tak zwaną nanosieć, która może mieć grubość $1 \div 5$ μm [9], przez co charakteryzuje się małymi oporami przepływu. Ze względu na ograniczone właściwości mechaniczne cienkiej warstwy nanosieci, nakłada się ją na podłoże (rys. 13), z konwencjonalnych materiałów filtracyjnych, które mają większą wytrzymałość i które umożliwiają użycie urządzeń do ich obróbki. Nanowłókna mogą być układane na jednej lub dwóch stronach podłoża, którym może być: poliester, nylon lub celuloza [10].



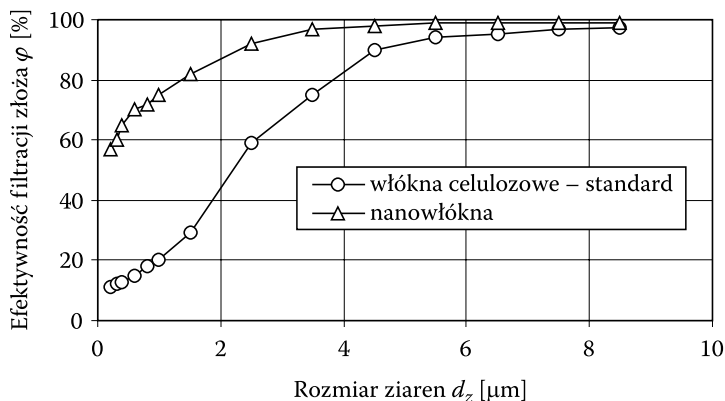
Rys. 13. Nanosieć o średnicach włókien około 250 nm ($0,25$ μm) naniesiona na złożo z włókien celulozy o średnicach około 10 μm : a) widok z góry; b) przekrój [10]

Nanowłókna w porównaniu do włókien standardowych mają zupełnie inne, nowe właściwości. Przede wszystkim w stosunku do masy mają olbrzymią powierzchnię i znacznie wyższą wytrzymałość, a ponadto charakteryzują się wyższą aktywnością chemiczną oraz wyższą sorpcją wilgoci. Można je stosować do budowy filtrów w celu oddzielania od osocza krwi pewnych zanieczyszczeń chemicznych lub biologicznych, można je stosować jako filtry gazów i zanieczyszczeń o bardzo małej średnicy, czyli filtry o separacji molekularnej.

Czołowe firmy światowe zajmujące się problemami filtracji powietrza od ponad 20 lat stosują nanowłókna do filtracji powietrza wlotowego silników lekko i silnie obciążonych pojazdów, w samooczyszczających systemach wlotowych silników turbinowych napędu czołgów oraz do filtracji powietrza kabin pojazdów górniczych [9]. Nanowłókninowe medium filtracyjne wraz z systemem automatycznego impulsowego oczyszczania wkładu zostało zastosowane do filtracji powietrza silnika turbinowego będącego jednostką napędową czołgu Abrams [9, 14].

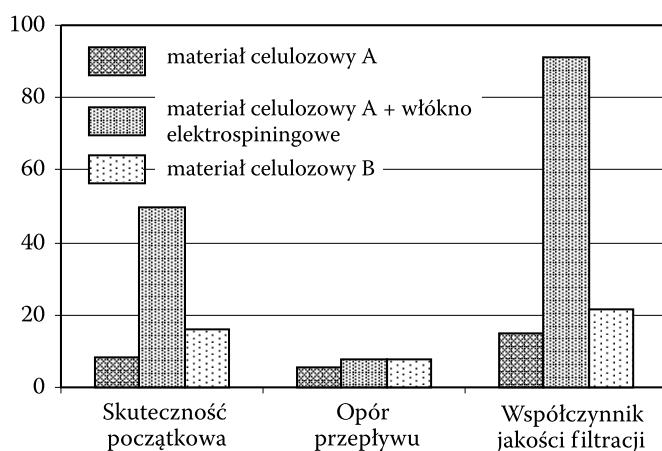
Przedstawione w pracach [9, 10, 14] wyniki badań wykazują, że zastosowanie nanowłókien zdecydowanie podnosi skuteczność filtracji, szczególnie ziaren pyłu

poniżej $5 \mu\text{m}$ (rys. 14), bez istotnego wzrostu spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej.



Rys. 14. Skuteczność filtracji złoży wykonanego z włókien celulozowych o standardowej grubości oraz z nanowłókien [9]

Wpływ zastosowania warstwy włókien elektrospininowych na efektywność filtracji materiałów stosowanych w filtrach silnikowych przedstawiono na rysunku 15. Mimo, że dodana warstwa z nanowłókien ma masę jednostkową nieprzekraczającą $0,1 \text{ g/m}^2$ (standardowe materiały celulozowe charakteryzują się masą jednostkową około 200 g/m^2), skuteczność początkowa φ_0 materiału z dodatkiem



Rys. 15. Efektywność filtracji standardowych materiałów filtracyjnych stosowanych w filtrach silnikowych oraz standardowego materiału filtracyjnego z cienką warstwą włókien elektrospininowych [13]

cienkich włókien wzrosła do 50%, przy nieznacznym wzroście oporów przepływu Δp , natomiast współczynnik jakości q określony poniższą zależnością uzyskał wartość sześciokrotnie większą niż standardowy materiał celulozowy.

$$q = \frac{-\ln(1 - \varphi_0)}{\Delta p}. \quad (4)$$

6. Podsumowanie

- Wszystkie ziarna pyłu zawarte w płynach eksploatacyjnych są przyczyną przyspieszonego zużycia współpracujących powierzchni elementów zarówno silników spalinowych tłokowych, jak i turbinowych, jednak największą intensywność tego zużycia obserwuje się dla ziaren pyłu o rozmiarach 2÷40 μm .
- Stosowane powszechnie w motoryzacji papierowe przegrody filtracyjne charakteryzują się małą skutecznością i dokładnością we wstępnym okresie filtracji, co jest przyczyną przyspieszonego zużycia silnika. Po przekroczeniu tego okresu filtry powietrza uzyskują wymaganą skuteczność, ale są zauważalnie nieefektywne przy zatrzymywaniu ziaren pyłu poniżej 5 μm .
- Wraz ze wzrostem rozmiarów ziaren pyłu, dla zwykle stosowanych w technice średnic włókien (około 20÷30 μm), efektywność osadzania ziaren w przegrodzie porowatej wskutek działania podstawowych mechanizmów filtracji rośnie za wyjątkiem mechanizmu dyfuzyjnego, którego efektywność maleje. Powoduje to istnienie minimum skuteczności filtracji, którego położenie zależy od prędkości przepływu aerozolu i średnicy włókna (rys. 10).
- Obniżenie wymiarów włókna w przegrodzie filtracyjnej powoduje przesunięcie minimum skuteczności filtracji w stronę mniejszych submikronowych ziaren pyłu przy jednoczesnym wzroście efektywności filtracji dla wszystkich ziaren (rys. 11).
- Dotychczas prowadzone prace badawcze doprowadziły do wytworzenia materiałów filtracyjnych o średnicach włókien poniżej 1 μm (nanowłókien), a więc znacznie mniejszych niż średnice powszechnie stosowanych włókien celulozowych. Zastosowanie nanowłókien jako warstwy filtracyjnej powoduje wyraźne zwiększenie skuteczności filtracji ziaren pyłu o średnicach poniżej 5 μm .
- Ze względu na trudną technologię otrzymywania nanowłókien, powszechność ich stosowania jest na razie niewielka.

LITERATURA

- [1] K. BACZEWSKI, M. HEBDA, *Filtracja płynów eksploatacyjnych*, MCNEMT, Radom 1991/92.
- [2] I. BORAWSKA, *Papierowe przegrody filtracyjne — własności, metody badań i zastosowanie*, Filtry i filtracja płynów, I Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna, Rzeszów 1974.
- [3] M. DURST, G. KLEIN, N. MOSER, *Filtration in Fahrzeugen*, Materiały informacyjne firmy Mann-Hummel GMBH, Ludwigsburg, Niemcy, 2005.
- [4] P. DZIERŻANOWSKI i in., *Turbinowe silniki śmigłowe i śmigłowcowe*, WKŁ, Warszawa 1985.
- [5] T. DZIUBAK, *Problemy filtracji powietrza w silnikach spalinowych pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, z. 4 (124), 2000.
- [6] A. ELSÄSSER, R. BRAUN, H. JENSEN, *Luftversorgungsmodule für die neuen Common-Rail Dieselmotoren OM611 und OM612 von Daimler Chrysler*, MTZ, 61, 2000, no 3.
- [7] J. FITCH, *Clean Oil Reduces Engine Fuel Consumption*, Practicing Oil Analysis, 11-12, 2002.
- [8] J. GEORGE, R. FORNA, T. CRAVERO, *Air Filtration with Fine Polymeric Fibers*, 16th Annual Technical Conference and Exposition 2003 Technical Sessions Papers, Reno-Nevada, June 17-20, 2003.
- [9] T. GRAFE, M. GOGINS, M. BARRIS, J. SCHAEFER, R. CANEPA, *Nanofibers in Filtration Applications in Transportation*, Filtration 2001 International Conference and Exposition, Chicago, Illinois, December 3-5, 2001.
- [10] K. GRAHAM, M. OUYANG, T. RAETHER, T. GRAFE, B. MC DONALD, P. KNAUF, *Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications*, 5th Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society, Galveston, Texas, April 9-12, 2002.
- [11] T. KALDOŃSKI, *Zużycie elementów precyzyjnych aparatury wtryskowej silników z zapłonem samoczynnym*, cz. I. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, z. 1-2, 1984, 57-58.
- [12] T. A. KOWALEWSKI, A. L. YARIN, S. BŁOŃSKI, *Nanofibres by electro-spinning of polymer solution*, The 5th Euromech Fluid Mechanics Conference, Toulouse, France, August 24-28, 2003.
- [13] E. СЛАБОВ, Б. АНТРОПОВ, В. НИЛОВ, *Влияние очистки воздуха на ресурс двигателя. Автомобильный транспорт*, no 4, 1978.
- [14] J. W. SCHAEFFER, L. M. OLSON, *Air Filtration Media for Transportation Applications*, Filtration & Separation, vol. 35, no 2, 1998.
- [15] S. SZCZECIŃSKI, *Odpylanie powietrza wlotowego*, Wojskowy Przegląd Techniczny, nr 6, 1983.
- [16] J. TRUHAN, *Filter Performance as the Engine Sees It*, Filtration & Separation, vol. 34, no 12, 1997.
- [17] R. WIATREK, *Zagadnienie oczyszczania powietrza wlotowego w lotniczych silnikach turbinowych*, Technika Lotnicza i Astronautyczna, nr 10-11, 1971.

T. DZIUBAK

Problems of filtration of air sucked-in to vehicle combustion engine

Abstract. Influence of polluted exploitation fluids on wear of engine elements and its durability is described. Filtration systems of inlet air used in vehicle combustion engines are characterized. The basic mechanisms of filtration in porous partition are discussed. Improvement in filtration efficiency of air getting into engine due to application of materials with nanofibers is shown.

Keywords: wear of engine elements, air filter, filtering material, filtration mechanisms, nanofibers

Universal Decimal Classification: 621.43

