

Article citation info:

Dziubak T. Operating fluids contaminations and their effect on the wear of elements of a motor vehicle's combustion engine. The Archives of automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2016; 72(2): 43-72, <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL72.ART3>

Zanieczyszczenia płynów eksploatacyjnych i ich wpływ na zużycie elementów silnika spalinowego pojazdu mechanicznego

TADEUSZ DZIUBAK¹

Wojskowa Akademia Techniczna

Streszczenie

Przedstawiono parametry zanieczyszczeń podstawowych płynów eksploatacyjnych silników spalinowych pojazdów mechanicznych: powietrza, paliwa i oleju silnikowego. Wykazano, że o zużyciu skojarzeń ciernych silnika decyduje pył mineralny (drogowy). Przedstawiono mechanizm zużywania ściernego dwóch współpracujących powierzchni skojarzenia ciernego silnika spalinowego tłok-pierścienie-cylinder. Wykazano, że największe zużycie powodują ziarna pyłu o rozmiarach d_z równych minimalnej $h_{\min}$ grubości filmu olejowego. Pokazano, że w powietrzu oczyszczonym za filtrem powietrza znajdują się zawsze ziarna pyłu o rozmiarach poniżej $2\div 5\ \mu\text{m}$. Przedstawiono skutki przyspieszonego zużycia tulei cylindrowej silnika eksploatowanego z niesprawnym układem filtracji powietrza. Wykazano, że zawarte w płynach eksploatacyjnych ziarna pyłu o rozmiarach poniżej $5\ \mu\text{m}$ są też przyczyną przyspieszonego zużycia elementów silnika. Udowodniono, że początkowy (po wymianie wkładu filtracyjnego) okres pracy filtru powietrza przegrodowego (papier, włóknina) charakteryzuje się niską skutecznością i dokładnością filtracji. Wykazano, że zanieczyszczenia zawarte w paliwie powodują nie tylko zużycie ściernie powierzchni elementów układów wtryskowych, ale też zużycie erozyjne elementów wtryskiwaczy.

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa; e-mail: tadeusz.dziubak@wat.edu.pl

Słowa kluczowe: płyny eksploatacyjne, zanieczyszczenia, zużycie ściernie i erozyjne, filtry powietrza, paliwa i oleju, skuteczność i dokładność filtracji.

1. Wstęp

Współczesne silniki spalinowe pojazdów mechanicznych do prawidłowego działania wymagają wielu płynów eksploatacyjnych. Każdy płyn eksploatacyjny spełnia inną funkcję, stąd ich różne właściwości oraz skład chemiczny. Podstawowymi płynami eksploatacyjnymi współczesnego samochodu są: powietrze atmosferyczne pobierane z atmosfery, paliwo, olej silnikowy i przekładniowy. W mniejszych ilościach w samochodzie występują płyny eksploatacyjne takie jak: płyn chłodzący, płyn hamulcowy, czynnik chłodniczy w układzie klimatyzacji, elektrolit w akumulatorze, płyn w amortyzatorach.

W uzyskaniu dużej trwałości i niezawodności silników oraz całego pojazdu bardzo dużą rolę odgrywa czystość płynów eksploatacyjnych. Właściwości płynów eksploatacyjnych ulegają pogorszeniu w czasie eksploatacji pojazdów, na skutek zanieczyszczenia różnego rodzaju ciałami stałymi i płynnymi, np. woda w paliwie lub oleju napędowym, pył w powietrzu, paliwie, oleju hydraulicznym itp. Zanieczyszczenia płynów eksploatacyjnych powodują ich starzenie fizyczne lub chemiczne. Zmniejszają również trwałość elementów maszyn i pojazdów na skutek intensyfikowania procesów korozyjnych, tribologicznych i zmęzeniowych. Czystość płynów eksploatacyjnych, a w szczególności zasysanego przez silniki powietrza, odgrywa ważną rolę w uzyskaniu dużej trwałości i niezawodności silników spalinowych gwarantując uzyskanie wymaganych przebiegów międzynaprawczych.

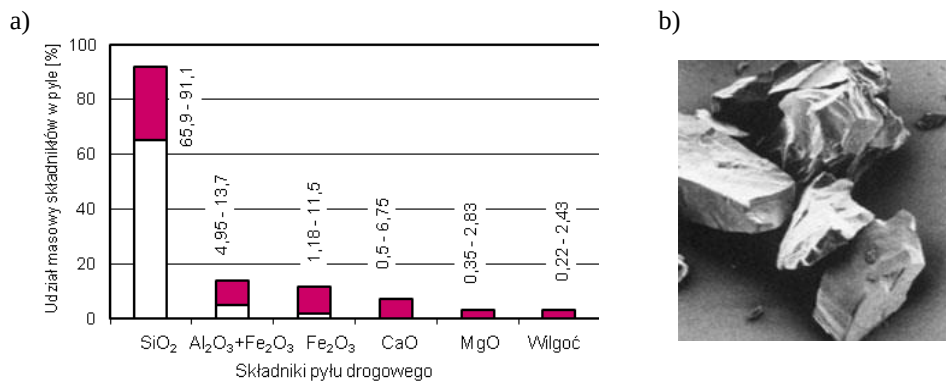
2. Charakterystyka zanieczyszczeń płynów eksploatacyjnych

Podstawowym płynem eksploatacyjnym, a jednocześnie podstawowym składnikiem czynnika roboczego każdego silnika spalinowego jest powietrze atmosferyczne. Zużycie powietrza przez silnik jest zależne proporcjonalnie od mocy silnika. W silnikach tłokowych z 1 kg/s (2800 m³/h) powietrza zużytego do spalania paliwa uzyskuje się około 700 kW mocy. Przykładowo maksymalne zapotrzebowanie powietrza wynosi: dla wolnossącego silnika o ZS samochodu Peugeot 306 Sedan 1.9 D – około 220 m³/h, silnika o ZS z turbodoładowaniem i intercoolerem samochodu Volkswagen T4 1.9 TDI – 385 m³/h, silnika Scania R420 – ponad 1600 m³/h, a czołgu T-72 przekracza 3400 m³/h. Wraz z powietrzem silniki spalinowe zasysają znaczne ilości zanieczyszczeń, szczególnie, gdy pojazdy eksploatowane są po drogach nieutwardzonych i bezdrożach. Do pozostałych płynów eksploatacyjnych zanieczyszczenia mogą dostawać się z atmosfery w wyniku operacji dystrybucyjno-magazynowych, poprzez nieszczelności w układach, podczas prac obsługowych lub tworzyć się w nich w wyniku procesów fizycznych lub chemicznych. Ze względu na procesy tribologiczne zachodzące w skojarzeniach trących silnika najistotniejsze są zanieczyszczenia mineralne znajdujące się w powietrzu atmosferycznym, które przyspieszają zużycie współpracujących powierzchni.

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

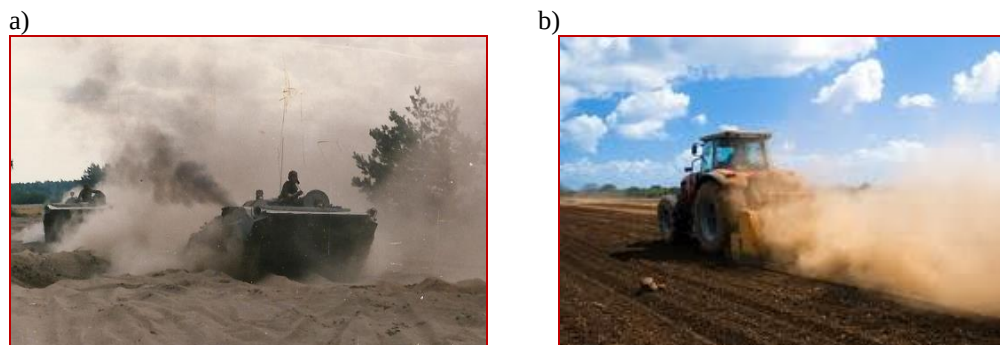
czerpnia powietrza znajduje się na wysokości 1÷2 m od podłoża, podczas jazdy w kolumnie lub podczas silnego wiatru i suszy [2].

Podstawowym składnikiem pyłu drogowego jest krzemionka (SiO_2) i korund (Al_2O_3), których udział w pyłe dochodzi do 60÷95% (rys.1a). Według twardości ocenianej na podstawie dziesięciostopniowej skali Mohsa, w której talk odpowiada twardości 1, a diament 10, krzemionka (SiO_2) ma twardość 7, a korund (Al_2O_3) 9. Minerale te twardością znacznie przewyższają materiały konstrukcyjne stosowane w budowie silników. Ziarna pyłu mają najczęściej bardzo nieregularny kształt (rys. 1b) zbliżony do wielościanów o ostrych krawędziach.



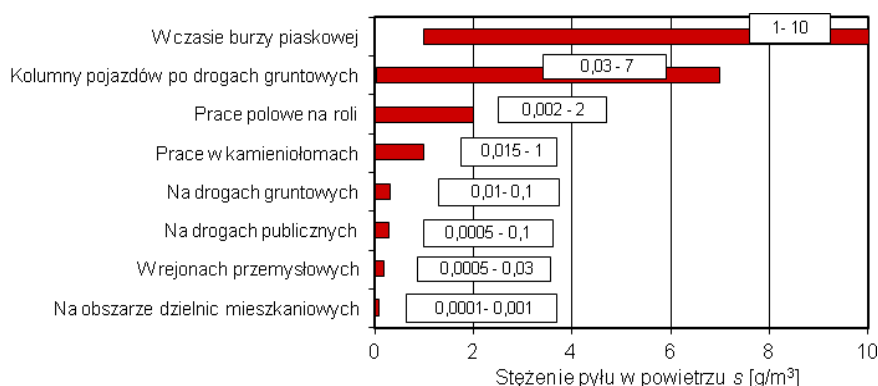
Rys. 1. Przeciętny skład chemiczny pyłu drogowego w Polsce (a) [2], obraz ziaren krzemionki (b) [12]

Stężenie zapylenia powietrza, którego miarą jest masa pyłu (w gramach lub w mg) zawarta w 1 m^3 powietrza atmosferycznego, jest wielkością zmienną i zależy od bardzo wielu czynników. Należą do nich głównie: rejon i rodzaj podłoża, rodzaj układu jezdni (kołowy, gąsienicowy), wysokość nad podłożem, rodzaj ruchu pojazdów (pojazd pojedynczy lub kolumna), a także warunki meteorologiczne. Najmniejsze stężenie pyłu w powietrzu, 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. Największe stężenie pyłu w powietrzu, dochodzące do $3,8\div 7 \text{ g/m}^3$ [5], występuje podczas jazdy pojazdów gąsienicowych w kolumnie po poligonowych placach ćwiczeń o suchym podłożu (rys. 2a). Podczas prac polowych stężenia pyłu w powietrzu może osiągnąć wartość 2 g/m^3 (rys. 2b).



Rys. 2. Stężenie pyłu w powietrzu podczas: a) jazdy kolumny bojowych wozów piechoty po terenie piaszczystym (źródło własne), b) podczas prac polowych [17]

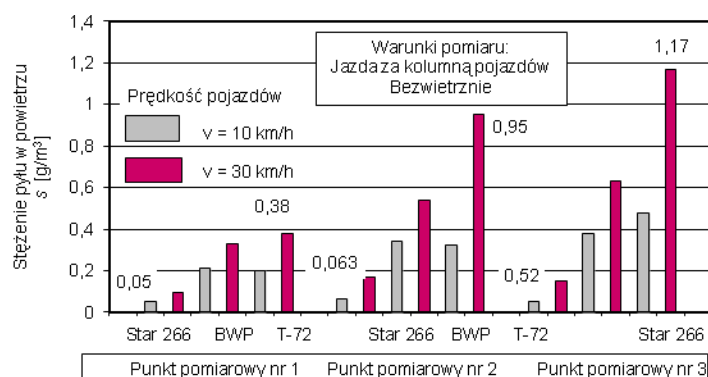
W czasie burzy piaskowej stężenia pyłu w powietrzu osiąga wartość 10 g/m^3 [19]. Jest ono, więc ponad 1000 razy większe niż podczas ruchu pojazdów na ulicach miast.



Rys. 3. Maksymalne wartości stężenia zapylenia powietrza w zależności od rejonu i rodzaju dróg [19]

Z pokazanych na rys. 4 rezultatów badań stężenia zapylenia powietrza wokół samochodu osobowo-terenowego eksploatowanego w okresie letnim po poligonowym placu ćwiczeń wynika, że największą wartość stężenia pyłu w powietrzu $s = 1,17 \text{ g/m}^3$ zarejestrowano pod maską, z prawej strony silnika (punkt pomiarowy nr 3 – rys. 4b) dla przypadku, gdy pojazd poruszał się za kolumną czołgów T-72 [7].

Duże wartości stężenia pyłu w powietrzu z występujące za kolumną pojazdów gąsienicowych, znacznie większe niż za kolumną pojazdów kołowych, wynikają głównie z rodzaju układu jezdnych pojazdów. Koła samochodu gładko toczą się po terenie, natomiast gąsienica wciskana jest w podłoże, co powoduje unoszenie gruntu i rozpraszanie go za pojazdem. Najmniejsze wartości stężenia pyłu w powietrzu (niezależnie od warunków eksploatacji) zarejestrowano nad maską silnika przy szybie (w osi pojazdu), co sugeruje umiejscowienie wlotu czerpni powietrza wlotowego do silnika. Wpływ prędkości jazdy jest tu znaczny, gdyż przy wzroście prędkości z $v = 10 \text{ km/h}$ do $v = 30 \text{ km/h}$ wartości stężeń ulegają dwukrotnemu zwiększeniu.

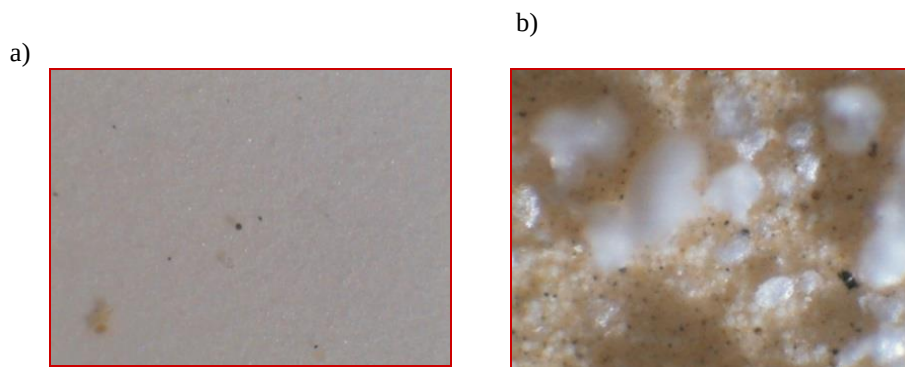


Rys. 4. Stężenie zapylenia powietrza w punktach pomiarowych 1, 2, 3 pojazdu osobowo-terenowego poruszającego się za kolumną: czołgów T-72, BWP, samochodów Star 266 przy różnych prędkościach jazdy [7]

Do oleju silnikowego zanieczyszczenia zewnętrzne, głównie jako cząstki pyłu mineralnego, przedostają się przez układ zasilania silnika wraz z paliwem i powietrzem, a także podczas prac obsługowych. W oleju silnikowym znajdują się zanieczyszczenia zewnętrzne i wewnętrzne będące cząstkami pyłu i metali, których nie usunięto w czasie produkcji, produkty zużywania elementów silnika, produkty niezupełnego spalania oraz produkty przemian chemicznych. Stężenie zanieczyszczeń w oleju jest funkcją czasu pracy oleju w silniku i zależy od: rodzaju i właściwości oleju, ilości dolewanego oleju, rodzaju układu filtracji oleju, a także od warunków eksploatacji.

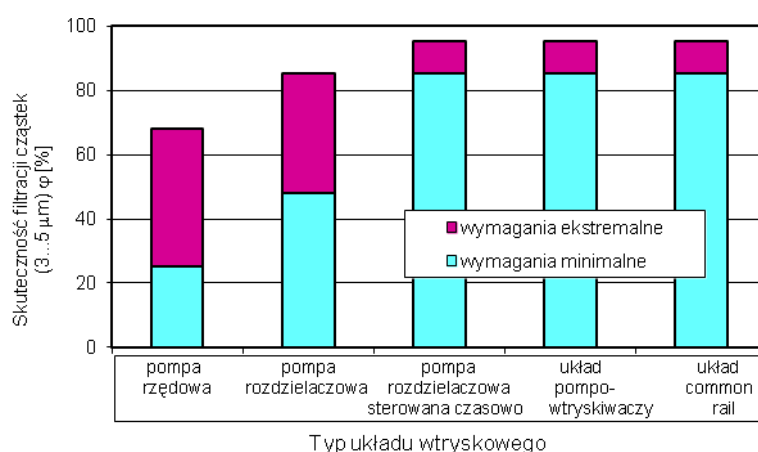
W nowoczesnych silnikach stężenie zanieczyszczeń w oleju wynosi od 0,1% masy (po małym przebiegu) do 0,5÷1,0% masy po przebiegu około 15 tys. km [2]. Cząstek zanieczyszczeń olejów mniejszych niż 3 μm jest 75÷96%, a rozmiary mniejsze niż 3÷10 μm stanowią 99% liczby cząstek. Maksymalny rozmiar cząstek zanieczyszczeń w oleju wynosi 20 μm [2]. Zanieczyszczenia olejów silnikowych zawierają 65÷87% substancji organicznych i 13÷35% związków nieorganicznych. Substancje nieorganiczne to głównie zanieczyszczenia przedostające się do oleju z zewnątrz (krzemionka), a także w produkty zużycia elementów silnika. Zanieczyszczenia wewnętrzne tworzą się w paliwach w wyniku działania tlenu, podwyższonej temperatury i katalitycznego oddziaływania metali. Zanieczyszczenia zewnętrzne przedostają się do paliw w wyniku działań magazynowo-dystrybucyjnych i stanowią je: pył z otoczenia, produkty korozji zbiorników, mikroorganizmy oraz produkty ich metabolizmu.

Za zanieczyszczenia paliw zgodnie z normą PN-EN 590 uważa się substancje stałe, które są zatrzymywane w czasie przesączania w próżni (od 2 do 5 kPa) 800 mililitrowej próbki przez filtr membranowy o nominalnej średnicy porów 0,8 μm . Maksymalny poziom zanieczyszczeń stałych oznaczonych zgodnie z ww. normą jest równy 24 mg/kg. Światowa Karta Paliw w wydaniu z 2013 r. dla olejów napędowych kat. 2, 3, 4 i 5 obniża ten poziom do 10 mg/kg. Rozmiary zanieczyszczeń powyżej 4 μm , powyżej 6 μm i powyżej 14 μm zawartych w olejach napędowych kat. 2, 3, 4 i 5 nie powinny przekraczać liczbowo odpowiednio: 18/16/13 [31]. Na rys. 5 pokazano przykładowy obraz sączka po filtracji badanego biopaliwa spełniającego i niespełniającego wymagań normy PN-EN 590 [28].



Rys. 5. Przykładowy obraz sączka po filtracji badanego biopaliwa (pow. 100x): a) spełniającego wymagania normy PN-EN 590 (ocena 16/14/11), b) niespełniającego wymagań normy PN-EN 590 (ocena 22/19/15) [28]

Coraz częściej silniki o ZS wyposażane są w układy bezpośredniego wtrysku paliwa. Układy te posiadają bardzo precyzyjnie wykonane pompy i wtryskiwacze, w których pod dużym ciśnieniem dochodzącym do 200 MPa paliwo podawane jest bezpośrednio do komór spalania. Wykonane precyzyjnie elementy aparatury wtryskowej są bardzo wrażliwe na jakość stosowanego paliwa, a szczególnie na poziom zanieczyszczeń stałych w paliwie. Z rys. 6 wynika, że minimalna wymagana skuteczność filtracji zanieczyszczeń zawartych w paliwie dla nowoczesnych układów paliwowych ustalona jest na poziomie 85%. Dla układów starszej konstrukcji np.: z rzędową pompą paliwową, wymagana skuteczność nieznacznie przekracza wartość 20%.



Rys. 6. Zalecenia dotyczące minimalnej skuteczności filtracji filtrów oleju napędowego [5]

W benzynach znajdują się cząstki zanieczyszczeń o rozmiarach poniżej 40 μm , a najwięcej jest cząstek o rozmiarach poniżej 20 μm [2]. Zanieczyszczenia olejów napędowych zawierają od 30% do 60%, a nawet do 90% substancji nieorganicznych [2]. Większa zawartość tych

substancji (do 60 mg/dm^3) znajduje się w olejach napędowych znajdujących się w zbiornikach pojazdów użytkowanych w warunkach polowych.

3. Warunki przyspieszonego zużycia powierzchni elementów silnika

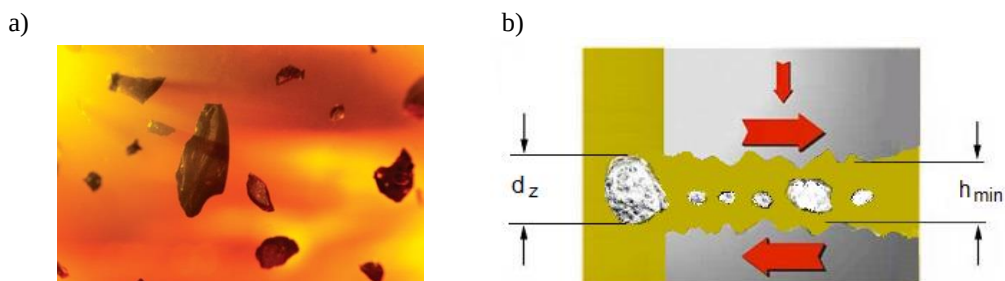
Podczas eksploatacji silników spalinowych wraz z powietrzem do cylindrów przedostają się znaczne ilości zanieczyszczeń, ale są to najczęściej ziarna pyłu o rozmiarach poniżej $2\div 5 \text{ }\mu\text{m}$, gdyż z taką dokładnością działają współczesne filtry powietrza, gdzie medium filtracyjnym jest papier filtracyjny lub włóknina. Ziarna pyłu o większych rozmiarach dostają się do cylindrów silnika w wyniku niesprawności układu zasilania powietrzem. W tym czasie do cylindrów silnika wraz z powietrzem mogą dostawać się ziarna pyłu o rozmiarach znacznie większych niż $5 \text{ }\mu\text{m}$. Zanieczyszczenia do cylindrów silnika przedostają się także wraz z paliwem i olejem, ale ich ilość jest znacznie mniejsza.

Do zużycia ściernego dochodzi wtedy, gdy twarde ciała obce dostają się pomiędzy dwie współpracujące powierzchnie, wbijając się na różne głębokości, doprowadzają do odkształcenia i skrawania mikroobjętości warstw wierzchnich współpracujących elementów. W literaturze dominuje pogląd, że największe zużycie powodują ziarna pyłu o rozmiarach d_z równych minimalnej $h_{\min}$ grubości warstwy oleju potrzebnej do utworzenia klina smarnego między współpracującymi powierzchniami, czyli gdy zachodzi poniższa zależność. Dla każdej innej wartości ilorazu $h_{\min}/d_z$ zużycie skojarzenia maleje (rys. 7) [11].

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

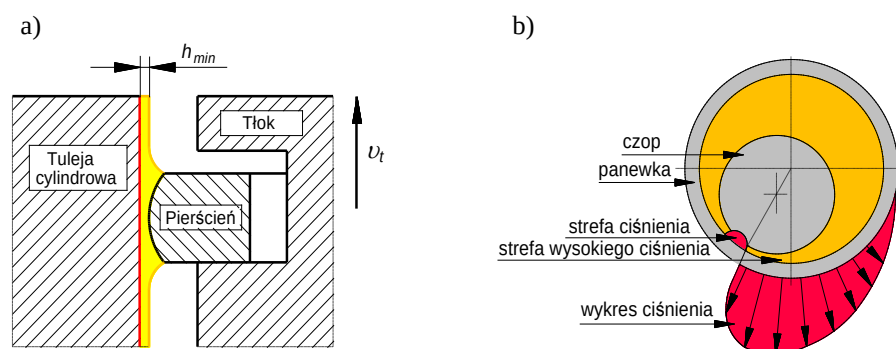
Minimalna grubość filmu olejowego $h_{\min}$ między dwoma współpracującymi tarciowo powierzchniami jest wprost proporcjonalna do lepkości oleju η zależnej od temperatury, współczynnika C zależnego od wymiarów łożyska, prędkości względnej smarowanych powierzchni v , a odwrotnie proporcjonalna do siły obciążającej P i wyraża się ogólną zależnością:

$$h_{\min} = \eta \cdot \frac{C \cdot v}{P}. \quad (2)$$



Rys. 7. Działanie cząstek stałych na parę tribologiczną: a) zanieczyszczenia zawieszone w oleju [1], b) warunek maksymalnego zużycia skojarzenia [11]

Dla ustalonych warunków pracy silnika grubość filmu olejowego h_{min} zmienia się cyklicznie w obszarze skojarzeń tribologicznych w zależności od warunków pracy skojarzenia. Między tuleją cylindrową a pierścieniami tłokowymi grubość filmu olejowego zdeterminowana jest prędkością tłoka (rys. 8).

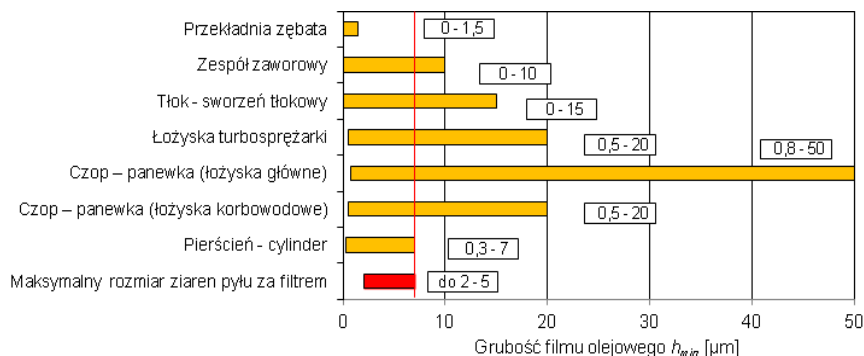


Rys. 8. Tworzenie się filmu olejowego w skojarzeniach: a) T-P-C, b) czop – panewka

Między zwrotami zewnętrznymi DMP i GMP prędkość tłoka (pierścieni tłokowych) jest największa, a więc grubość filmu olejowego w tym obszarze przyjmuje maksymalne wartości. Zmiana kierunku ruchu tłoka w skrajnych położeniach tulei cylindrowej powoduje, że jego prędkość w tym obszarze jest najmniejsza, a w DMP i GMP równa 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.

W tych warunkach teoretycznie każda cząstka o dowolnie małych rozmiarach może być powodem zużycia. W wyniku zmian grubości filmu olejowego, ziarna pyłu, które znalazły się między współpracującymi powierzchniami ulegają kruszeniu i rozdrobnieniu i mogą wnikać między dwie powierzchnie współpracujące tarcioowo, gdzie grubość filmu olejowego przyjmuje małe wartości.

W typowych skojarzeniach silnika spalinowego grubości filmu olejowego podana w pracy [4] przyjmują zróżnicowane wartości (rys. 9).



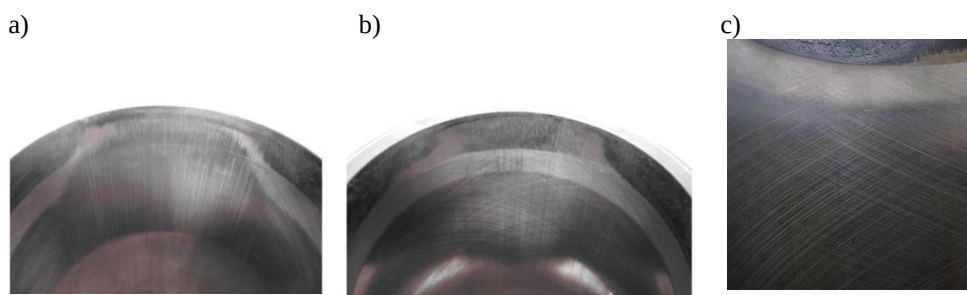
Rys. 9. Grubości filmu olejowego w typowych skojarzeniach silnika spalinowego [4]

Widać wyraźnie, że nawet najmniejsze ziarna pyłu i te poniżej $2\div 5\text{ }\mu\text{m}$, będą powodowały przyspieszone zużycie. Uważa się, że wszystkie ziarna pyłu powyżej $1\text{ }\mu\text{m}$ są przyczyną przyspieszonego zużycia, jednak agresywność ścierna pyłu maleje w przypadku, gdy rozmiary ziaren pyłu są mniejsze niż $5\text{ }\mu\text{m}$. Natomiast ziarna pyłu poniżej $1\text{ }\mu\text{m}$ są niebezpieczne ze względu na to, że działają na gładź cylindrową jak pasta polerska. Do wypolerowanej gładzi cylindrowej nie przylegają cząstki oleju, co prowadzi do przerwania filmu olejowego i przyspieszonego zużycia.

Wielkość zużycia elementów silnika w wyniku oddziaływania pyłu zależy od: parametrów zasysanego pyłu, wartości luzów między współpracującymi częściami, parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych silnika, właściwości mechanicznych materiałów. Pył dostający się wraz z powietrzem do cylindrów silnika najintensywniej oddziałuje na pierwszy pierścień tłokowy, tłok oraz górną część cylindra. Stosowanie filtrów bocznikowych w układach smarowania silnika wynikało właśnie z konieczności usunięcia z oleju silnikowego zanieczyszczeń o średnicy poniżej $1\text{ }\mu\text{m}$.

4. Wpływ zanieczyszczeń powietrza wlotowego na zużycie skojarzenia „tłok-pierścień tłokowe-cylinder”

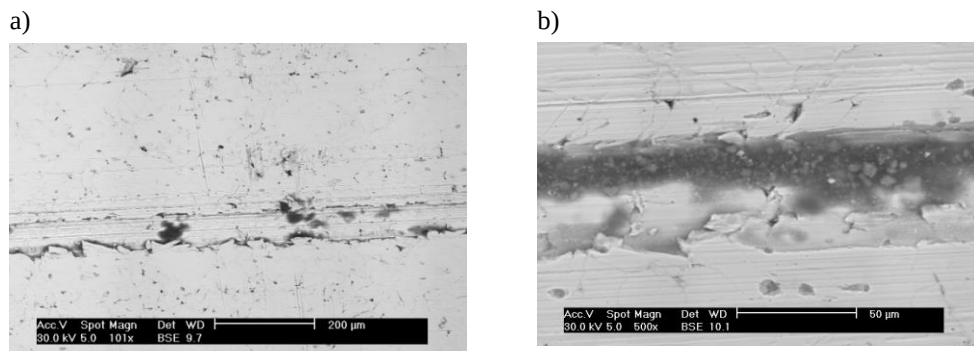
Przyspieszone zużycie tulei cylindrowej może być skutkiem eksploatacji silnika z niesprawnym układem filtracji powietrza. Obraz takiego zużycia tulei cylindrowej samochodu ciężarowego pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Widok zużycia gładzi cylindrowej silnika samochodu ciężarowego eksploatowanego z niesprawnym i sprawnym układem filtracji powietrza: a) wyraźne pasmo rys bez śladów honowania, b) widoczne pojedyncze rysy na tle śladów po obróbce powierzchniowej, c) sprawny układ filtracji powietrza [9]

Widać wyraźnie zużycie ścierna gładzi cylindrowej w postaci równoległych ciągłych pasm rys wzdłuż tworzącej tulei cylindrowej zlokalizowane w górnej strefie gładzi cylindrowej na około $1/5$ obwodu. Rysy spowodowane zostały twardymi i dużymi ziarnami pyłu. Pasma rys są na tyle intensywne i głębokie, iż nie widać śladów po końcowej obróbce powierzchniowej gładzi – honowaniu (rys. 10a). Znacznie mniejsze zużycie gładzi cylindrowej, widoczne w postaci pojedynczych rys na tle śladów po obróbce powierzchniowej pokazano na rys. 10b. Widok gładzi cylindrowej silnika samochodu ciężarowego eksploatowanego ze sprawnym układem filtracji powietrza pokazano na rys. 10c. Widać wyraźne ślady po honowaniu oraz osady produktów spalania na tulei cylindrowej powyżej górnego martwego położenia pierwszego

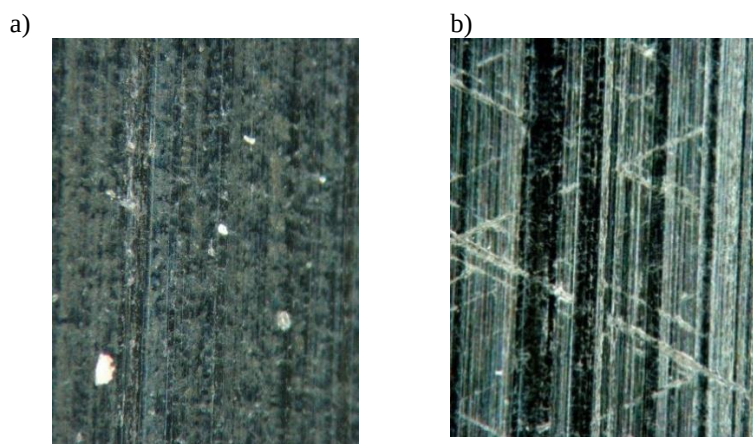
pierścienia tłokowego. Powstawanie zagłębień w gładzi cylindrowej w wyniku oddziaływania cząstek o wysokiej twardości pokazano na rys. 11.



Rys. 11. Rysy w gładzi cylindrowej spowodowane cząstkami pyłu [9]

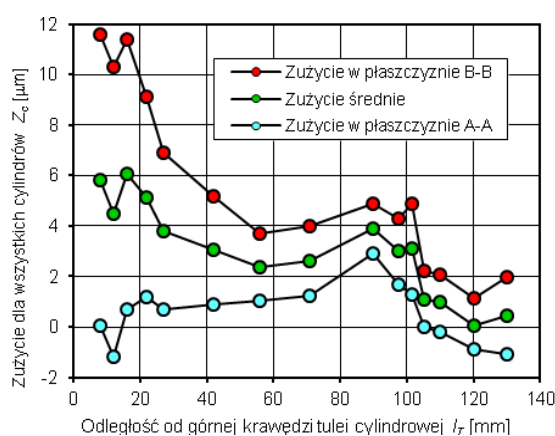
W gładzi cylindrowej znajdują się liczne równoległe do tworzącej tulei cylindrowej, nieregularnie rozmieszczone rysy o szerokości do 70 µm. Ubytki materiału w postaci rys (bruzd) są wynikiem mechanicznego oddziaływania na powierzchnię gładzi cylindrowej cząstek o dużej twardości uczestniczących w procesie tarcia. Wielkość rys lub wyłobień w gładzi cylindrowej jest odwzorowaniem wielkości cząstek obcych przemieszczających się podczas tarcia między współpracującymi elementami.

Topografię górnej części gładzi cylindrowej silnika samochodu ciężarowego eksploatowanego z niesprawnym układem filtracji powietrza pokazano na rys. 12. Na powierzchni gładzi w strefie GMP pierścienia tłokowego widać obce cząstki, natomiast skupiska rys wraz osadami obcych cząstek oraz śladami honowania środkowej strefy gładzi cylindrowej (pow. 50x) widać na rys. 12b.

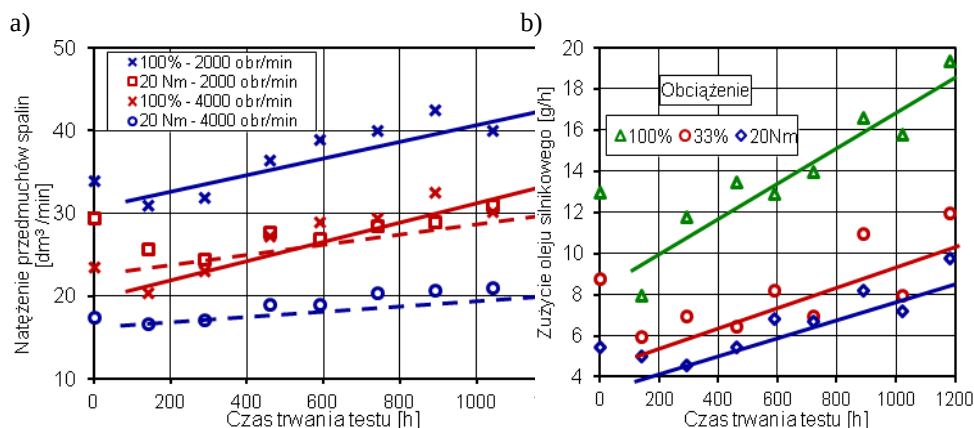


Rys. 12. Topografia gładzi cylindrowej silnika samochodu ciężarowego eksploatowanego z niesprawnym układem filtracji powietrza: a) obce cząstki na powierzchni gładzi w strefie GMP (pow. 20x), b) rysy oraz ślady honowania środkowej strefy gładzi cylindrowej (pow. 50x) [9]

Na rys. 13 pokazano wyniki badań zużycia skojarzenia T-P-C silnika 4-cylindrowego o ZS ($V_{ss} = 1,3 \text{ dm}^3$, $N_e = 66 \text{ kW}$ przy 4000 obr/min, $M_o = 200 \text{ Nm}$ w zakresie 1750÷2250 obr/min), turbodoładowanego, z chłodzeniem powietrza doładowującego i recyrkulacją spalin po 1200 godzinach pracy według określonego testu trwałościowego [21]. Największe zużycie tulei cylindrowych zarejestrowano w ich górnej części w płaszczyźnie prostopadłej (B-B) do osi silnika, co jest zgodne z wynikami innych badań [11, 20]. Zużycie tulei cylindrowej i pierścieni tłokowych spowodowane zanieczyszczeniami przedostającymi się do tulei cylindrowej wraz z powietrzem wlotowym jak i zanieczyszczeniami zawartymi w oleju jest przyczyną spadku szczelności przestrzeni nadłokowej. W efekcie nastąpił ubytek sprężanego czynnika, a tym samym spadek ciśnienia w końcu suwu sprężania, a w konsekwencji spadek mocy badanego silnika około 2,5% oraz wzrost jednostkowego zużycia paliwa o 3,4% (rys. 13). Zużycie skojarzenia T-P-C to jednocześnie wzrost natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej (rys. 14a), co powoduje wzrost temperatury oleju smarującego, spadek jego właściwości smarnych oraz wydmuchiwanie oleju przez gazy spalinowe. Efektem tego zjawiska jest zanik „klina smarnego”, w wyniku czego układ przechodzi z warunków tarcia płynnego w tarcie graniczne.



Rys. 13. Zużycie tulei cylindrowych 4-cylindrowego, turbodoładowanego silnika o ZS i mocy $N_{emax} = 66 \text{ kW}$ w płaszczyźnie prostopadłej (B-B) i równoległej (A-A) do osi silnika [21]



Rys. 14. Wpływ trwania testu na: a) natężenie przedmuchów spalin przy pełnym i małym obciążeniu silnika, b) zużycie oleju silnikowego przy różnych obciążeniach silnika [21]

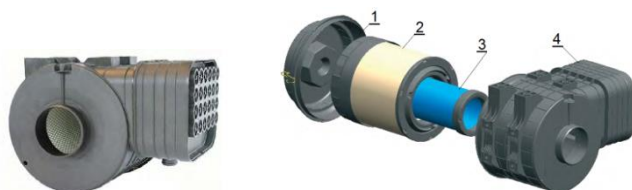
Po 1200 godzinach pracy silnika przy pełnym obciążeniu i 4000 obr/min natężenie przedmuchów wzrosło o 61%. Przyspiesza to znacznie degradację oleju silnikowego. Zwiększony w skojarzeniu T-P-C luz intensyfikuje zjawisko pompującego działania pierścieni tłokowych, tym samym wzrasta zużycie oleju i toksyczność spalin. W tym samym czasie zużycie oleju silnikowego wzrosło o 108%, 96% i 113%, odpowiednio przy obciążeniach 100%, 33% i 20 Nm (rys. 14b).

Za dostarczenie do cylindrów silnika powietrza o odpowiedniej jakości (czystości) tak aby zminimalizować zużycie elementów silnika, odpowiada filtr powietrza. Dominującym materiałem filtracyjnym, który stosowany jest do filtracji płynów eksploatacyjnych pojazdów, a w szczególności do filtracji powietrza wlotowego współczesnych silników pojazdów mechanicznych, są papiery filtracyjne, z których kształtowane są wkłady filtracyjne. W samochodach osobowych stosowane są filtry jednostopniowe z elementem filtracyjnym w postaci panelu (rys. 27), natomiast samochody ciężarowe i specjalne wyposażone są w filtry dwustopniowe, gdzie pierwszym stopniem filtracji jest filtr bezwładnościowy (monocyklon lub multicyklon), a drugim papierowy wkład filtracyjny. Tak skonstruowane filtry zapewniają docelową skuteczność filtracji dochodzącą do 99,9% i dokładność powyżej $2\div 5\text{ }\mu\text{m}$.



Rys. 15. Filtry powietrza oraz ich wkłady filtracyjne: a) filtr jednostopniowy współczesnego samochodu osobowego [13], b) filtr dwustopniowy NLG Piclon (monocyklon-przegroda porowata) samochodu ciężarowego [25], c) dwustopniowy PicoFlex (multicyklon-przegroda porowata) samochodu ciężarowego [22]

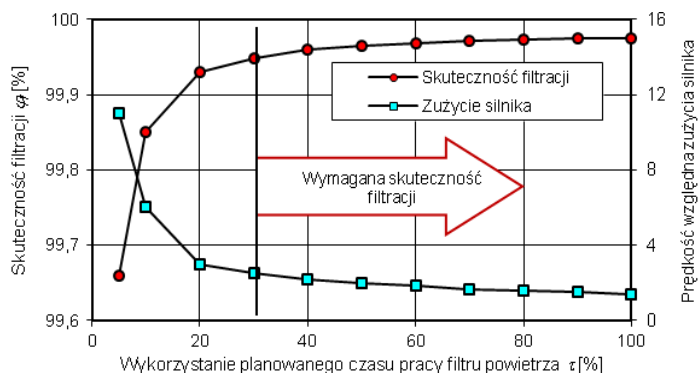
W pojazdach mechanicznych poruszających się w warunkach dużego zapylenia powietrza oraz w przypadku, kiedy przed systemem filtracji stawiane są wymogi długiego okresu międzyobsługowego przy zachowaniu wysokiej skuteczności filtracji, stosowane są trójstopniowe systemy filtracji, które w porównaniu do filtrów dwustopniowych (multicyklon – przegroda filtracyjna) różnią się tylko dodatkowym wkładem filtracyjnym, nazywanym „wkładem bezpieczeństwa” i włączonym szeregowo za wkładem filtracyjnym głównym.



Rys. 16. Filtr trójstopniowy SPB2: 1 – pokrywa, 2 – wkład filtracyjny, 3 – wkład bezpieczeństwa, 4 – multicyklon [29]

Według Autora pracy [14] nowo zamontowany w filtrze wkład papierowy dopiero po przekroczeniu 25% (rys. 30) przewidywanego przebiegu zapewnia wymaganą skuteczność i dokładność filtracji powietrza. W tym czasie masa zanieczyszczeń przedostających się do cylindrów silnika wraz z powietrzem jest znaczna, a ziarna pyłu przekraczają kilkakrotnie rozmiar $5\ \mu\text{m}$. Okres ten charakteryzuje się dużą prędkością względną zużycia silnika, kilkakrotnie większą niż podczas pracy z filtrem o nominalnej skuteczności filtracji. Tak więc częsta, nieuzasadniona wymiana wkładu filtracyjnego może być przyczyną przyspieszonego zużycia elementów silnika.

Na rys. 19 i 20 przedstawiono wyniki badań autora charakterystyk papierowej przegrody filtracyjnej pracującej w układzie dwustopniowym: pojedynczy cyklon zwrotny z wlotem stycznym i ustawiony za nim szeregowo cylindryczny wkład papierowy o odpowiednio dobranej powierzchni, tak aby prędkość filtracji nie przekraczała $v_F = 0,06\ \text{m/s}$ [5]. Badano charakterystyki skuteczności filtracji $\varphi_w = f(k_m)$, dokładności $d_{zmax} = f(k_m)$ i oporu przepływu $\Delta p_w = f(k_m)$ wkładów wykonanych z dwóch papierów filtracyjnych różniących się właściwościami filtracyjnymi, o roboczych nazwach VH1 i VH2 (tabela 1), gdzie k_m współczynnik chłonności pyłu.



Rys. 17. Skuteczność filtracji i prędkość zużycia silnika w funkcji czasu pracy filtru powietrza [14]

Współczynnik chłonności k_m jest definiowany, jako masa pyłu zatrzymana na powierzchni 1 m^2 papieru filtracyjnego w jednostce czasu i określany ilorazem masy pyłu m_{PF} i czynnej powierzchni papieru filtracyjnego A_c [5, 6, 8]:

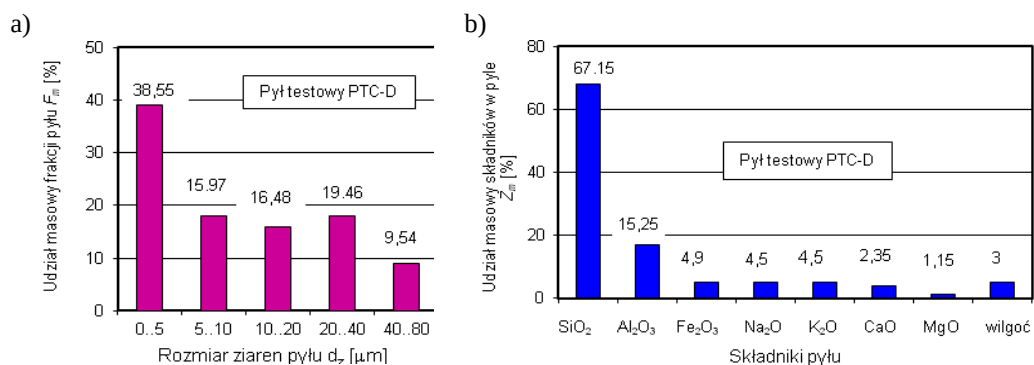
$$k_m = \frac{m_{PF}}{A_c} [\text{g/m}^2]. \quad (4)$$

Dla papierów filtracyjnych w chwili osiągnięcia oporu dopuszczalnego $\Delta p_{flop} = 3 \div 5 \text{ kPa}$ współczynnik chłonności przyjmuje wartości $k_m = 190 \div 220 \text{ g/m}^2$ [5].

Tabela 1. Parametry badanych papierów filtracyjnych firmy J.C. BINZER PAPIERFABRIK

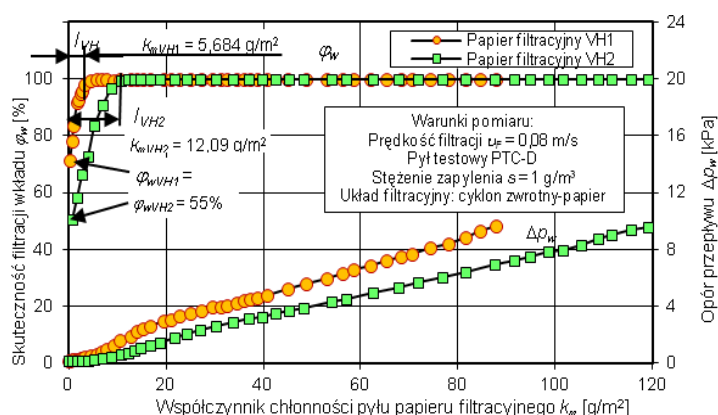
Lp.	Parametry	Jednostki	Oznaczenie papieru	
			796/1 VH 86 (VH1)	844 VH 86/4 (VH2)
1	Gramatura	g/m^2	204	108
2	Grubość – obciążenie 2 N/cm^2	mm	0,9	0,67
3	Opór przepływu przy $400 \text{ cm}^3/\text{s}$, $A = 10 \text{ cm}^2$	mbar	6,7	1,04
4	Wytrzymałość na rozrywanie	kPa	385	212
5	Zawartość żywicy	%	18,8	17
6	Maksymalna wartość średnicy porów	μm	51	89
7	Wartość średnia średnicy porów	μm	42	76

Podczas badań stosowano stężenie pyłu w powietrzu wlotowym do cyklonu o wartości $s = 1 \text{ g/m}^3$. Odseparowywany w cyklonie pył odsysano eiekcyjnie w sposób ciągły. Skuteczność filtracji określano metodą gravimetryczną w kolejnych cyklach pomiarowych, jako iloraz masy pyłu testowego zatrzymanej na filtrze i doprowadzonej do filtru wraz powietrzem. Stosowano pył testowy PTC-D, będący krajowym zamiennikiem pyłu AC-Fine, którego skład chemiczny i granulometryczny podano na rysunku 18.



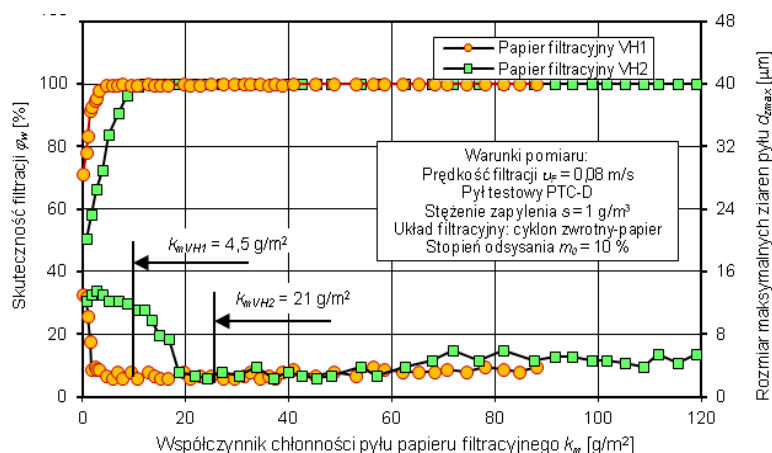
Rys. 18. Skład granulometryczny (a) i skład chemiczny (b) pyłu testowego PTC-D [27]

Ze względu na osiągane wartości skuteczności filtracji, czas pracy badanych papierów można podzielić umownie na dwa okresy (rys. 19 i 20). Początkowy (I_{VH1} , I_{VH2}), charakteryzujący się małymi wartościami skuteczności filtracji, które systematycznie i gwałtownie wzrastają wraz z ilością masy pyłu zatrzymanego przez papier filtracyjny.



Rys. 19. Charakterystyka skuteczności filtracji $\phi_w = f(k_m)$ i oporu przepływu $\Delta p_w = f(k_m)$ papieru filtracyjnego VH1 i VH2 w funkcji współczynnika chłonności pyłu k_m [7]

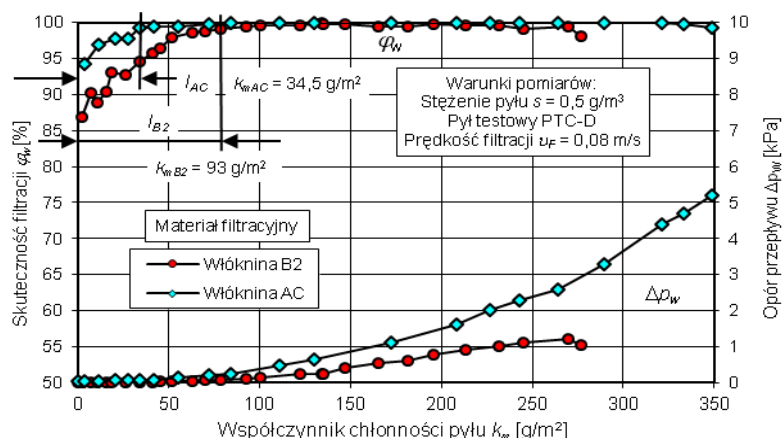
Okres początkowy trwa od chwili rozpoczęcia procesu filtracji do osiągnięcia przez papier maksymalnej ustalonej wartości skuteczności filtracji. Następujący po nim okres filtracji zasadniczej charakteryzuje się dużymi (powyżej 99%) i ciągle, ale powolnie rosnącymi wartościami skuteczności filtracji. W przypadku badanych papierów przyjęto strefę rozdziału obu okresów z chwilą uzyskania przez papier skuteczności filtracji $\phi_w = 99,5\%$ [5]. Po pierwszym cyklu pomiarowym skuteczność papieru filtracyjnego VH1 osiąga wartość $\phi_{wVH1} = 77\%$, a papieru VH2 tylko $\phi_{wVH2} = 55\%$ – rys. 19. W zależności od rodzaju papieru, w tym rozmiaru porów (tabela 1) okres ten może trwać do 20% przewidywanego przebiegu pojazdu limitowanego osiągnięciem dopuszczalnego oporu przepływu filtr powietrza. W tym czasie w powietrzu oczyszczonym przez wkłady filtracyjne znajdował się pył zawierający ziarna o rozmiarach nie przekraczających $d_{zmax} = 13,4 \mu m$ dla papieru VH1 i $d_{zmax} = 13,8 \mu m$ dla papieru VH2 (rys. 20). Przyjęto, że ziarno pyłu o największym rozmiarze d_{zmax} znajdujące się w strumieniu powietrza wylotowego z badawczego wkładu filtracyjnego wyraża dokładność filtracji papieru w kolejnym cyklu pomiarowym.



Rys. 20. Rozmiar maksymalnych ziaren pyłu d_{zmax} w funkcji chłonności współczynnika pyłu k_m papieru filtracyjnego VH1 i VH2 pracującego za cyklonem, jako drugi stopień filtracji [7]

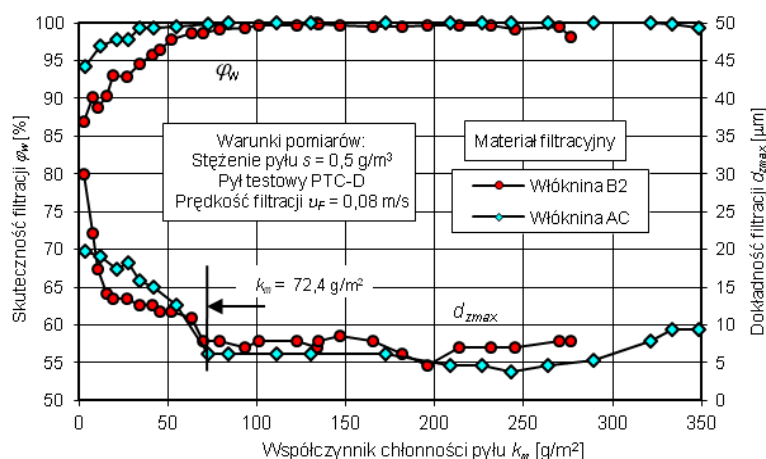
Najmniejszy rozmiar ziarna pyłu ($d_{zmax} = 2,7 \mu\text{m}$) zarejestrowano w strumieniu powietrza oczyszczanego przez papier filtracyjny VH1 przy współczynniku chłonności $k_m = 4,5 \text{ g/m}^2$. Natomiast w powietrzu za papierem VH2 maksymalny rozmiar ziarna pyłu $d_{zmax} = 2,7 \mu\text{m}$ zarejestrowano znacznie później, bo dopiero po osiągnięciu przez papier współczynnika chłonności $k_m = 21 \text{ g/m}^2$ – rys. 20.

Na rysunkach 21 i 22 pokazano wyniki badań włókien filtracyjnych (tabela 2), których charakterystyki filtracyjne określono w warunkach filtracji jednostopniowej. Początkowy okres filtracji charakteryzuje się małymi i systematycznie rosnącymi wartościami skuteczności filtracji wraz z ilością masy zatrzymanego pyłu. Okres ten trwa od chwili rozpoczęcia procesu filtracji do osiągnięcia przez badane włókny ustalonej wartości skuteczności filtracji $\phi_w = 99,5\%$. Wartość tę badane włókny AC i B2 osiągnęły przy współczynniku chłonności odpowiednio: $k_{mB2} = 34,5 \text{ g/m}^2$ $k_{mAC} = 93 \text{ g/m}^2$. W analizowanym okresie filtracji w powietrzu oczyszczonym przez włókny znajdował się pył zawierający ziarna o rozmiarach w zakresie $d_{zmax} = 6,2 \div 30 \mu\text{m}$ (rys. 22). Najmniejszy rozmiar ziarna pyłu $d_{zmax} = 7,8 \mu\text{m}$ i $d_{zmax} = 6,2 \mu\text{m}$ zarejestrowano w strumieniu powietrza oczyszczanego przez włókny B2 i AC przy współczynniku chłonności $k_m = 72,4 \text{ g/m}^2$.



Rys. 21. Charakterystyki skuteczności filtracji $\varphi_w = f(k_m)$ i oporu przepływu $\Delta p_w = f(k_m)$ w funkcji współczynnika chłonności pyłu k_{m1} włókien filtracyjnych B2 i AC określone w warunkach filtracji jednostopniowej [6]

Niska skuteczność papieru filtracyjnego ($\varphi = 55\div 77\%$) oraz włókien ($\varphi = 86\div 94\%$) powiązana jest z obecnością dużych ($d_{zmax} = 30 \mu m$) ziaren pyłu w powietrzu oczyszczonym w początkowym, chociaż krótkim okresie pracy. Może mieć to wpływ na przyspieszone zużycie głównie skojarzenia T-P-C, co pokazano w pracach [9, 11, 14, 20, 21, 30].



Rys. 22. Charakterystyki skuteczności $\varphi_w = f(k_m)$ i dokładności filtracji $d_{zmax} = f(k_m)$ w funkcji współczynnika chłonności pyłu k_m włókien filtracyjnych B2 i AC określone w warunkach filtracji jednostopniowej [6]

W rzeczywistych warunkach taki stan pracy filtru powietrza występuje po wymianie zanieczyszczonego wkładu filtracyjnego na nowy. Z chwilą ustabilizowania się skuteczności filtracji na poziomie $99,5\div 99,9\%$ w powietrzu oczyszczonym występują ziarna pyłu o maksymalnych rozmiarach nieprzekraczających $d_{zmax} = 5\div 7 \mu m$. Największą skuteczność filtracji ($99,9\%$) osiąga filtr w końcowym okresie pracy, czyli wtedy, gdy jego opór przepływu

zbliża się do wartości oporu dopuszczalnego Δp_{fdop} , będącego kryterium wymiany wkładu filtracyjnego.

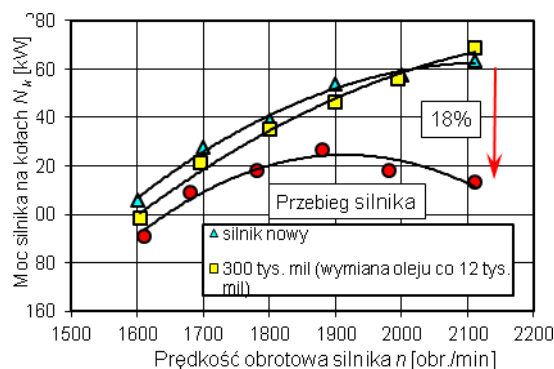
Ze względu na dużą wartość skuteczności zatrzymywanych zanieczyszczeń oraz dużą dokładność wkład filtracyjny powinien więc być eksploatowany jak najdłużej. Jednak wraz ze wzrostem masy pyłu zatrzymanego na wkładzie filtracyjnym rośnie nie tylko skuteczność, ale też i opór przepływu filtru powietrza, co może być przyczyną spadku mocy silnika. Dlatego producenci współczesnych samochodów osobowych zalecają wymianę wkładu filtracyjnego po określonym przebiegu (30÷60 tys. km), co odpowiada osiągnięciu przez filtr wartości oporu dopuszczalnego około $\Delta p_{fdop} = 3$ kPa. W filtrach powietrza samochodów ciężarowych i specjalnych stosowane są czujniki dopuszczalnego oporu o nominalnych wartościach z zakresu $\Delta p_{fdop} = 5\div 8$ kPa. Poważnym więc błędem popełnianym przez użytkowników pojazdów i na stacjach serwisowych jest wymiana wkładu filtracyjnego wcześniej niż zaleca to instrukcja obsługi lub nim nastąpi sygnalizacja oporu dopuszczalnego.

5. Wpływ zanieczyszczeń oleju silnikowego na zużycie skojarzeń ciernych silnika

Część zanieczyszczeń powietrza, które dostaje się do cylindrów silnika przez układ zasilania powietrzem, jest spalana, część jest usuwana wraz ze spalinami. Na ściankach tulei cylindrowej osiada tylko 10÷20% zanieczyszczeń, które dostają się do silnika przez układ dolotowy. Ta część zanieczyszczeń, będących głównie pochodzenia mineralnego o rozmiarach ziaren pyłu poniżej 2÷5 μm , tworzy wraz z olejem rodzaj pasty ścierniej, która w zetknięciu z powierzchniami skojarzenia tłok-pierścienie tłokowe-cylinder (T-P-C) niszczy ich strukturę. W wyniku ruchu tłoka w kierunku DMP pierścienie zgarniają olej z gładzi cylindrowej wraz z zanieczyszczeniami do miski olejowej. Po przedostaniu się do układu smarowania zanieczyszczenia rozprowadzane są przez instalację olejową do tych obszarów tribologicznych silnika, które są smarowane olejem, na przykład do skojarzeń: czop-panewka wału korbowego, czop-panewka wałka rozrządu, prowadnica zaworu-trzonek zaworu, powodując ich przyspieszone zużycie ściernie.

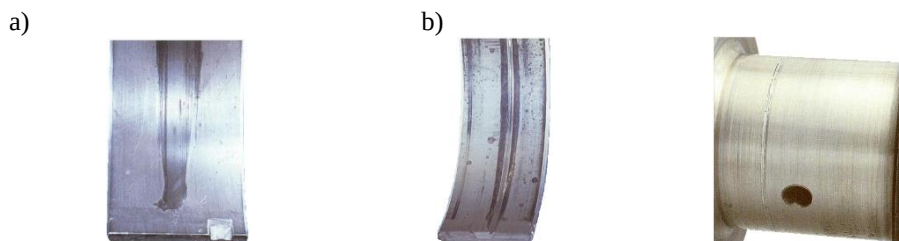
Szczególnie niebezpieczne dla gładzi cylindrowej są zanieczyszczenia o średnicy poniżej 1 μm . W wyniku ich działania następuje tzw. polerowanie powierzchni gładzi cylindrowej, w wyniku czego nie przylegają do niej cząstki oleju, co prowadzi do przerwania filmu olejowego, wystąpienia tarcia granicznego, a tym samym zwiększonego zużycia.

W wyniku zwiększonego zużycia elementów silnika następuje spadek mocy i wzrost jednostkowego zużycia paliwa. W silniku Cummins N 14, w którym wymianę oleju wykonywano cyklicznie, co 25 tys. mil, zarejestrowano ponad 18% spadek mocy w stosunku do silnika nowego i silnika, gdzie wymianę oleju wykonywano dwukrotnie częściej (rys. 23) [11]. Wraz z wymianą oleju usuwano zanieczyszczenia, które były przyczyną przyspieszonego zużycie elementów skojarzenia T-P-C. Wymiana oleju z mniejszą częstotliwością powodowała kumulację zanieczyszczeń, co skutkowało zwiększonym zużyciem tego skojarzenia i spadkiem mocy.



Rys. 23. Zmiana mocy silnika Cummins N14 nowego i po różnych przebiegach pojazdu z wymianą oleju co 12 tys. i 25 tys. mil [11]

Zanieczyszczenia zawarte w oleju powodują zarysowania i uszkodzenia powierzchni skojarzeń (rys. 24). Mogą osadzać się w materiale panewek łożysk, a skutki ich obecności w postaci zużycia ściernego będą odczuwalne nawet po wymianie oleju.

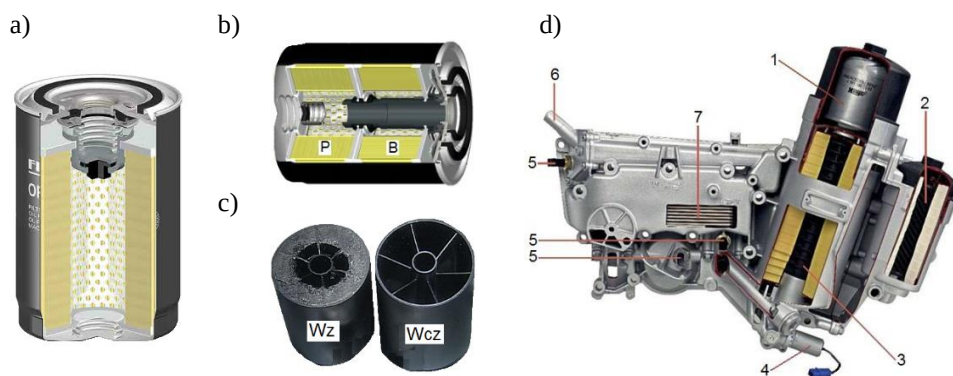


Rys. 24. Widok zużycia panewek (a) i czopa wału korbowego (b) silnika samochodu eksploatowanego z niesprawnym układem filtracji powietrza [26]

Czystość oleju silnikowego zapewniają filtry pełnoprzepływowe. Są to z reguły filtry wymieniane w całości, z wkładem filtracyjnym zamkniętym w blaszanej lub plastikowej obudowie przykręcaniej do bloku silnika (rys. 25a). Obecny trend konstrukcyjny w filtracji oleju silnikowego zmierza w kierunku dwóch rodzajów filtrów: pełnoprzepływowego zatrzymującego większe zanieczyszczenia i bocznikowego, wysokiej dokładności filtracji, przez który przepływa 5÷10% strumienia oleju z obiegu silnika. Standardowe medium filtracyjne oleju silnikowego zatrzymuje cząstki o rozmiarach poniżej 9 μm , a kompozytowe poniżej 4 μm i dzięki wielowarstwowej strukturze separuje 20-krotnie lepiej cząstki o średnicy 10 μm .

Stosowanie filtrów bocznikowych wynikało z konieczności usunięcia z oleju silnikowego najdrobniejszych zanieczyszczeń o średnicy poniżej 1 μm , powodujących tzw. polerowanie gładzi cylindrowej. Stosuje się dwa rodzaje filtrów bocznikowych: z wkładem filtracyjnym lub jako odśrodkowe (rys. 25c). Filtry pełnoprzepływowe i bocznikowe mogą występować w jednym zespole (rys. 25b) lub w tzw. module filtracyjnym (rys. 25d), w którym znajduje się również chłodnica oleju, filtr paliwa i czujniki. Dzięki zastosowaniu jednej obudowy można wyeliminować przewody łączące poszczególne typy filtrów oraz szybko podgrzać

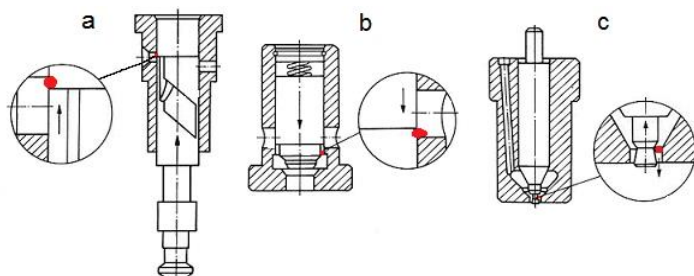
lub schłodzić olej (w zależności od aktualnej potrzeby), co jest korzystne dla optymalnej pracy jednostki napędowej.



Rys. 25. Systemy filtracji oleju silnikowego: a) tradycyjny filtr puszkowy, b) zespół filtracyjny: filtr pełnoprzepływowy (P) i filtr boczny (B) [24], c) wirnik filtru bocznego (odśrodkowego) zanieczyszczonego (Wz) i czystego (Wcz), d) moduł filtracyjny stosowany w Mercedes-Benz, MAN i Deutz: 1 – filtr boczny, 2 – filtr paliwa, 3 – pełnoprzepływowy filtr oleju, 4 – elektrozawór, 5 – czujniki ciśnienia i temperatury, 6 – odpływ cieczy chłodzącej do układu ogrzewania kabiny kierowcy, 7 – chłodnica oleju [33]

6. Wpływ zanieczyszczeń paliwa na przyspieszone zużycie elementów układu wtryskowego

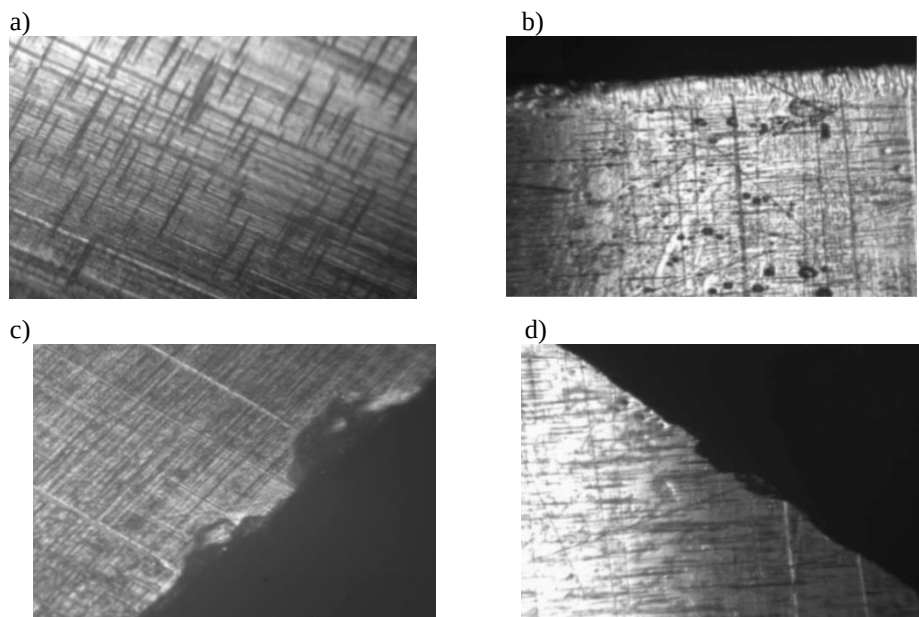
Sposoby przedostawania się zanieczyszczeń między uszczelniające powierzchnie par precyzyjnych sekcji tłoczącej klasycznej pompy wtryskowej pokazano na rys. 26. Duże ziarna, które dostają się między współpracujące powierzchnie, ulegają zaklinowaniu, odkształcaniu lub rozdrobnieniu na mniejsze cząstki, powodując, iż na współpracujących powierzchniach powstają dość charakterystyczne miejscowe rysy i wgłębienia, a nawet poważne ubytki materiału tych części.



Rys. 26. Sposoby przedostawania się zanieczyszczeń między uszczelniające powierzchnie par precyzyjnych: a) w sekcji tłoczącej, b) w zaworku tłoczącym, c) przy czopiku rozpylacza [7]

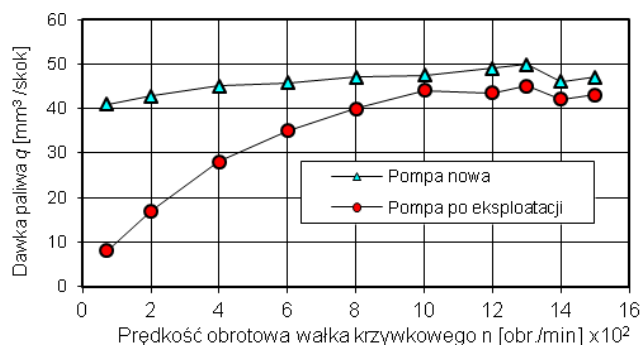
Na podstawie obserwacji mikroskopowych Autorzy pracy [18] stwierdzają, że procesy zużyciowe par precyzyjnych zachodzą głównie w części położonej nad rowkiem sterującym

dawką paliwa (rys. 27b, c i d). Dominujące mechanizmy zużycia w tym obszarze to odkształcenia plastyczne oraz bruzdowanie i mikroskrawanie powierzchni wywoływane twardymi zanieczyszczeniami zawartymi w paliwie, o rozmiarach ziaren (rzędu $1\div 2\ \mu\text{m}$) porównywalnymi z grubością filmu olejowego. Na rys. 27a pokazano nowy nieuszkodzony fragment powierzchni tłoczka, gdzie wyraźnie dominują ślady po szlifowaniu elementu.



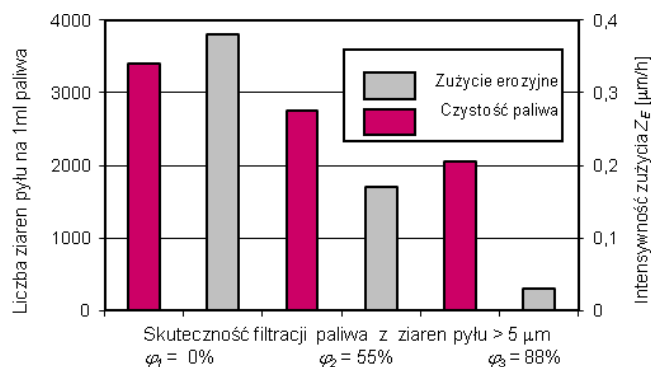
Rys. 27. Obraz powierzchni tłoczka sekcji wtryskowej: a) nowy fragment powierzchni tłoczka (wyraźnie dominują ślady po szlifowaniu), b, c, d) powierzchnia tłoczka po eksploatacji (powiększenie 125x) [16]

Zużycie skojarzeń „tłoczek-cylinderek” klasycznej pompy wtryskowej powoduje zwiększenie luzów, a tym samym zwiększenie strat hydraulicznych podczas tłoczenia, co skutkuje zmniejszeniem dawki paliwa i zmianą charakterystyki tłoczenia pompy wtryskowej (rys. 28).



Rys. 28. Charakterystyka klasycznej pompy wtryskowej nowej i po eksploatacji [7]

Zanieczyszczenia zawarte w paliwie, które z dużą prędkością wypływają otworami wtryskiwacza, powodują zużycie erozyjne. Wpływ koncentracji ziaren pyłu $d_z > 5 \mu\text{m}$ zawartych w paliwie na zużycie erozyjne wtryskiwacza przedstawiono na rys. 29 [30]. Zastosowanie filtra paliwa zdecydowanie ogranicza to zużycie. Filtr o skuteczności filtracji $\varphi_2 = 55\%$ powoduje zmniejszenie intensywności zużycia wtryskiwacza o ponad 50%, a skuteczność filtracji $\varphi_2 = 88\%$ obniża zużycie dziesięciokrotnie.



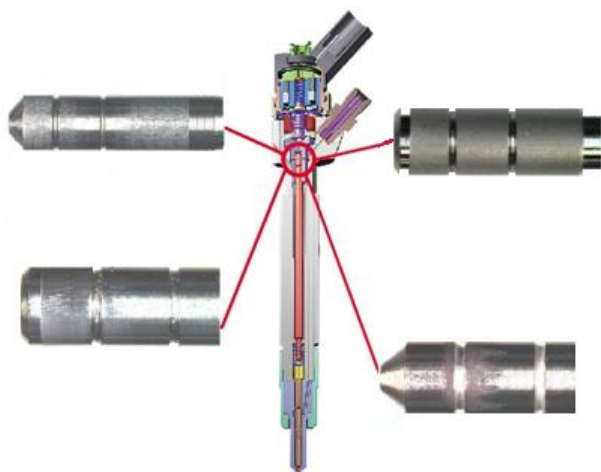
Rys. 29. Wpływ zawartości zanieczyszczeń w paliwie na intensywność erozyjnego zużycia wtryskiwacza [30]

Na rys. 30 przedstawiono przykłady zużycia erozyjnego elementów układu wtryskowego przy niedostatecznej filtracji paliwa. Szczególnie charakterystyczne jest zużycie gniazda zaworu elektromagnetycznego układu wtryskowego PD silnika o ZS pojazdu użytkowego. Bardzo widoczne są wgłębienia wzdłużne wywołane erozją cząstek zawartych w paliwie (rys. 30a). Powodują one nieszczelności wewnętrzne i zmniejszają tym samym dawki wtryskiwanego paliwa. W praktyce uszkodzenie tego typu przejawia się malejącą mocą silnika, nierównomierną pracą i wzmożoną emisją sadzy. Podobne obrazy zużycia w postaci wyżłobień materiału i utworzonych rys zaobserwowano dla zaworka wtryskiwacza CRI (rys. 30b, c).



Rys. 30. Zużycie elementów układu wtryskowego przy niedostatecznej filtracji paliwa: a) erozyjne gniazda zaworu elektromagnetycznego [5], b, c) zaworka wtryskiwacza CRI [10]

Zużycie ściernie elementów pompowtryskiwacza widoczne, jako obwodowe wytarcia tłoczka sterującego i iglicy spowodowane niską jakością paliwa przedstawia rys. 31.



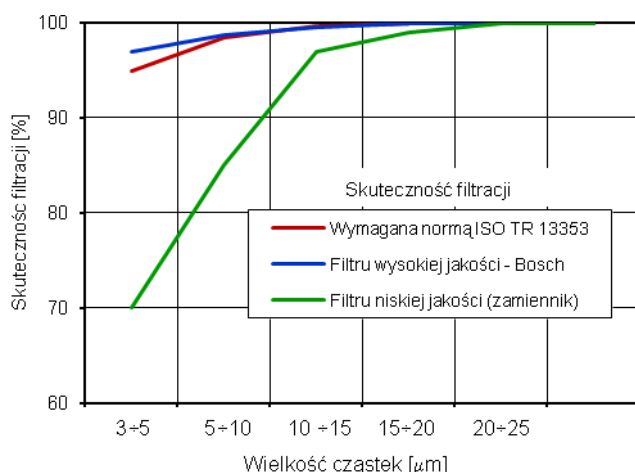
Rys. 31. Przykładowe zużycie ścierne elementów pompowtryskiwacza widoczne, jako obwodowe wytarcia tłoczka sterującego [23]

Dowodem na znajdujące się w paliwie zanieczyszczenia jest widok filtra siatkowego znajdującego się na zaworze regulacji ciśnienia DRV systemu Common Rail Bosch zabezpieczający pompę przed dostawianiem się zanieczyszczeń zawartych w paliwie (rys. 32).



Rys. 32. Zawór regulacji ciśnienia DRV Common Rail Bosch z filtrem siatkowym (a), widok nowego filtra (b), po eksploatacji (c) widok z mikroskopu cyfrowego [16]

Przyczyną przyspieszonego zużycia elementów układu wtryskowego jest niedostateczna filtracja paliwa spowodowana opóźnionymi okresami wymiany filtra lub stosowanie nieoryginalnych filtrów – tanich zamienników, których skuteczność filtracji znacznie odbiega od wymagań normy ISO – rys. 33. W przefiltrowanym paliwie znajduje się wtedy znaczna liczba cząstek zanieczyszczeń o rozmiarach $d_z = 3\div 15\ \mu\text{m}$. Są to zanieczyszczenia, które powodują największe zużycie powierzchni skojarzeń ciernych.



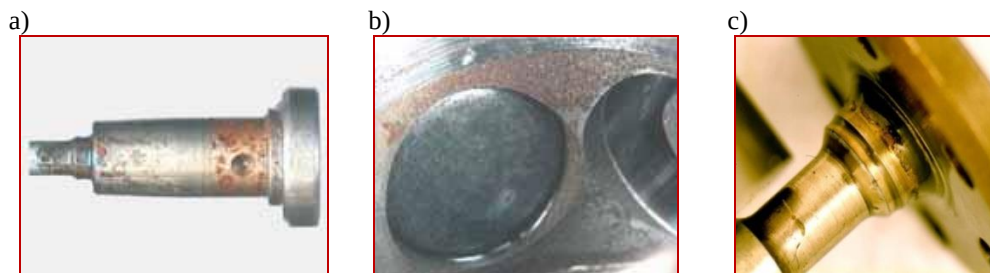
Rys. 33. Skuteczność filtracji filtrów paliwa w porównaniu do wymagań normy ISO 13353 [10]

Na fragmencie zaworka Delphi Nissan Micra 1,5 DCI (w chwilę po demontażu wtryskiwacza – rys. 34a) widać wyraźnie bardzo dużą ilość zanieczyszczeń metalicznych. Prawdopodobną przyczyną znajdujących się na zaworku ciał obcych było uszkodzenie pompy wysokiego ciśnienia. Natomiast w gnieździe zaworka wtryskiwacza Common Rail Delphi Ford Mondeo TDCI (rys. 34b) widoczne są zanieczyszczenia niemetaliczne, które dostały się w wyniku niedostatecznej filtracji paliwa.

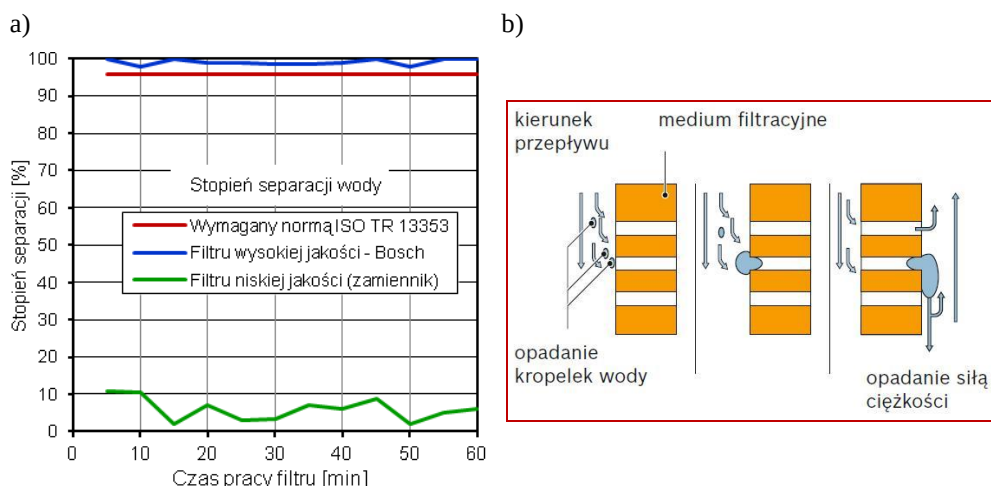


Rys. 34. Widok zanieczyszczeń: a) na zaworku Delphi Nissan Micra 1,5 DCI; b) w gnieździe zaworka wtryskiwacza Common Rail Delphi Ford Mondeo TDCI [16], c) w zaworze ssącym pompy wysokiego ciśnienia CPI [7]

Wilgoć będąca jednym z zanieczyszczeń w paliwie jest przede wszystkim przyczyną zużycia korozyjnego w układzie wtryskowym oraz w silniku (rys. 35). Jej obecność w paliwie jest wynikiem niedostatecznej filtracji będącej skutkiem zbyt późnych wymian filtrów lub stosowania filtrów nieoryginalnych – niskiej jakości (rys. 36a).

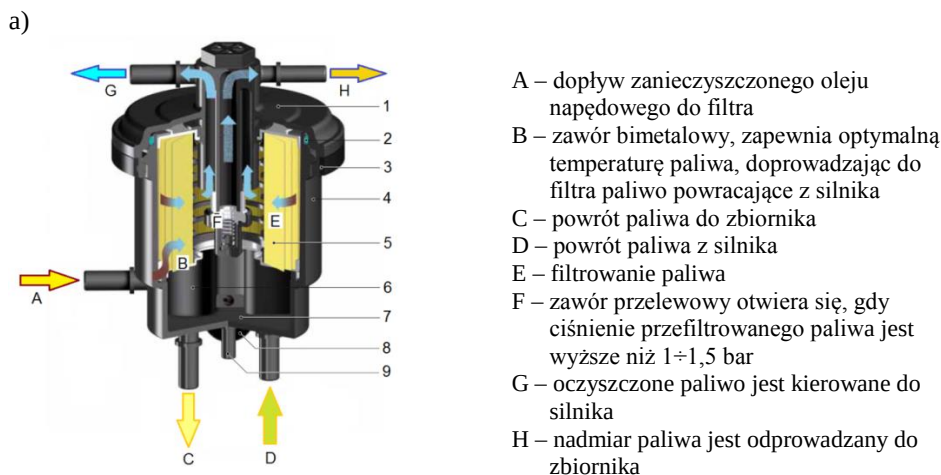


Rys. 35. Zużycie korozyjne elementów układu wtryskowego przy niedostatecznej filtracji wody:
a) korozja elementu wtryskiwacza, b) obudowy pompy wysokiego ciśnienia [10],
c) zaworek we wtryskiwaczu Delphi [15]



Rys. 36. Filtracja wody w filtrach paliwa w aspekcie wymagań normy ISO 13353:
a) skuteczność filtracji, b) separacja wody z paliwa wskutek efektu koalescencji (wytrącanie wody po czystej stronie filtru) [33]

Najprostszą metodą usuwania wody z paliw silnikowych jest osadzanie grawitacyjne, które jest tym skuteczniejsze, im większe są średnice kropelek wody zdyspergowanej w paliwie. Bardzo efektywnym sposobem usuwania zawieszonej wody w paliwie jest koalescencja (rys. 36b) w złożu włóknistym polegająca na zatrzymywaniu kropelek wody i osadzaniu na pojedynczym włóknie, a w efekcie zwiększaniu wymiarów. Współczesne filtry paliwa to konstrukcje odznaczające się dużą liczbą dodatkowych funkcji. Należą do nich czujniki i zawory do sterowania ciśnieniem i temperaturą, nagrzewnice elektryczne, wymienniki ciepła, czujniki wody i instalacje odprowadzające wodę (rys. 37).



Rys. 37. Filtr paliwa w układzie Common Rail: 1 – pokrywa filtra z tworzywa sztucznego, 2 – pierścień uszczelniający, 3 – pierścień metalowy, 4 – obudowa filtra z tworzywa sztucznego, 5 – medium filtracyjne (o plisach w układzie gwiazdowym), 6 – zawór bimetalowy (włącznik termostatyczny), 7 – osadnik wody, 8 – korek spustowy wody, 9 – rurka spustowa [33]

7. Wnioski

1. Powszechnym szkodliwym dla eksploatowanych pojazdów mechanicznych zanieczyszczeniem powietrza jest pył drogowy, którego ziarna to nieregularne bryły o ostrych krawędziach oraz dużej twardości i maksymalnych rozmiarach do $80\div 100\text{ }\mu\text{m}$.
2. Największe zużycie powodują ziarna pyłu o rozmiarach d_z równych minimalnej h_{min} grubości warstwy oleju potrzebnej do utworzenia klina smarnego między powierzchniami współpracującymi. W typowych skojarzeniach silnika spalinowego grubość filmu olejowego przyjmuje wartości w granicach $0\div 50\text{ }\mu\text{m}$.
3. Dominujące mechanizmy zużycia w obszarze skojarzeń tribologicznych to odształcenia plastyczne oraz bruzdowanie i mikroskrawanie powierzchni wywoływane twardymi ziarnami pyłu mineralnego o rozmiarach ziaren porównywalnych z grubością filmu olejowego.
4. Wszystkie ziarna pyłu powodują przyspieszone zużycie, chociaż agresywność ścierna pyłu maleje w przypadku, gdy rozmiary ziaren pyłu są mniejsze niż $2\div 5\text{ }\mu\text{m}$. Taką wartość uważa się za górną dopuszczalną wielkość ziaren pyłu, które mogą być przepuszczane przez filtry powietrza, paliwa i oleju. Większe ziarna zanieczyszczeń mogą dostawać się do skojarzeń ciernych w wyniku niesprawności filtra, nieszczelności układu lub w wyniku stosowania nieoryginalnych filtrów płynów eksploatacyjnych.
5. Ziarna pyłu o rozmiarach poniżej $1\text{ }\mu\text{m}$ są przyczyną tzw. polerowania powierzchni gładzi cylindrowej, w wyniku czego zanika zjawisko powstawania filmu olejowego, co jest powodem przyspieszonego zużycia. Konieczność usunięcia zanieczyszczeń o tych rozmiarach spowodowała stosowanie filtrów bocznikowych oleju.
6. Zanieczyszczenia zawarte w paliwach silnikowych powodują przyspieszone zużycie elementów aparatury wtryskowej w postaci zużycia ściernego oraz wgłębień wzdłużnych wywołanych erozją cząstek, co skutkuje spadkiem mocy silnika, jego nierównomierną

- pracą, wzrostem jednostkowego zużycia paliwa i zwiększoną emisją związków toksycznych.
7. W pierwszym okresie pracy filtra powietrza do cylindrów silnika mogą przedostawać się ziarna pyłu o rozmiarach kilkakrotnie przewyższających dopuszczalny rozmiar $2\div 5\text{ }\mu\text{m}$, co wynika ze zjawisk zachodzących w przegrodzie porowatej w okresie filtracji początkowej. Częsta, nieuzasadniona wymiana wkładu filtracyjnego może być więc przyczyną przyspieszonego zużycia elementów skojarzenia T-P-C, a tym samym spadku mocy silnika i skrócenia okresu międzynaprawczego.
 8. Stosowanie oryginalnych filtrów płynów eksploatacyjnych, gdzie dominującym materiałem filtracyjnym jest papier filtracyjny lub złożo kompozytowe, zapewnia wymaganą skuteczność i dokładność filtracji, a tym samym mniejsze zużycie elementów i większą trwałość układów.

Literatura

- [1] Avis M. Particles: Friend or Foe? Understanding the Value of Particles in Oil Analysis. Machinery Lubrication 2012; 6.
- [2] Baczewski K. Zanieczyszczenia płynów eksploatacyjnych. Paliwa, oleje i smary w eksploatacji. 1997; 33: 8-11.
- [3] Chłopek Z. Testing of hazards to the environment caused by particulate matter during use of vehicles. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability. 2012 2; 160-170.
- [4] Diesel Engine Air Filtration. Materiały informacyjne firmy PALL Corporation. USA, 2004.
- [5] Durst M, Klein G, Moser N. Filtration in Fahrzeugen. Materiały informacyjne firmy Mann+Hummel GMBH. Ludwigsburg, Niemcy 2005.
- [6] Dziubak T, Szwedkowicz S. Badania eksperymentalne włókien filtracyjnych do filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych. Logistyka. 2014; 6: 3465-3474 (płyta CD).
- [7] Dziubak T. Filtracja powietrza wlotowego do silników spalinowych pojazdów mechanicznych. Warszawa, WAT. 2012.
- [8] Dziubak T, Szwedkowicz S. Experimental research on nonwoven filter fabric for intake air filtration in the IC engine of an off-road Vehicle. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2014; 66(4): 3-22.
- [9] Dziubak T, Wysocki T. Analiza wpływu konstrukcji wkładu filtra powietrza na wystąpienie uszkodzeń w postaci zarysowań wzdłużnych gładzi tulei cylindrowych w silniku ciągnika siodłowego MAN F19. Opinia techniczna. Warszawa, WAT. 2009.
- [10] Filtr oleju napędowego. Bosch Autospec, 1/43/wiosna, 2012; 10-11.
- [11] Fitch J. Clean Oil Reduces Engine Fuel Consumption. Practicing Oil Analysis Magazine. 2002; 11-12.
- [12] Fitch J. A Much Closer Look at Particle Contamination. Practicing Oil Analysis Magazine. 2005; 9.
- [13] Fleck S, Heim M, Beck A, Moser N, Durst M. Realitätsnahe Prüfung von Motorsaugluftfiltern. MTZ 05/Jahrgang 70, 2009, 414-418.
- [14] Grafe T, Gogins M, Barris M, Schaefer J, Canepa R. Nanofibers in Filtration Applications in Transportation. Filtration 2001 International Conference and Exposition; 2001; Chicago, Illinois.

- [15] Specjalistyczna pracownia regeneracji, naprawy wtryskiwaczy i pomp Common Rail. Available from: <http://www.wtryskiwacz.com/regeneracja-naprawa-pomp-common-rail.html>.
- [16] Specjalistyczna pracownia regeneracji, naprawy wtryskiwaczy i pomp Common Rail. Available from: www.wtryskiwacz.com/common-rail-delphi-naprawa-regeneracja-wtryskiwaczy.html.
- [17] <http://www.google.pl/search?q=prace+rolnicze&hl=pl&prmd=imvns&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=CY4mUPGLMIjT Aa85ICQDA&ved=0CFEQsAQ&biw=1440&bih=766>.
- [18] Ignaciuk P, Gil L, Walczak M. Identyfikacja mechanizmu powstawania uszkodzeń aparatury wtryskowej silników o zapłonie samoczynnym. *Postępy Nauki i Techniki*. 2012; 12: 53-60.
- [19] Jaroszczyk T, Pardue B A, Heckel S P, Kallsen K J. Engine air cleaner filtration performance – theoretical and experimental background of testing. AFS Fourteenth Annual Technical Conference and Exposition; 2001; Tampa, Florida.
- [20] Koszałka G. Application of the piston-rings-cylinder kit model in the evaluation of operational changes in blowby flow rate. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2010; 4(48): 72-81.
- [21] Koszałka G, Suchecki A. Changes in performance and wear of small diesel engine during durability test. *Combustion Engines*. 2015; 3(162); 34-40.
- [22] Mann+Hummel PicoFlex® - The new compact air cleaner for your highest requirements. Available from: www.mann-hummel.com.
- [23] Materiały techniczne i szkoleniowe firmy Bosch. 2013.
- [24] Materiały reklamowe firmy Filtron. Available from: <http://www.filtron.pl>.
- [25] NLG Piclon. Two-stage air cleaners with integrated pre-separation. Available from: www.mann-hummel.com.
- [26] Oil and your engine. Available from: www.toromontcat.com/pdf/oilengine.
- [27] PN-S-34040, Filtry powietrza. Wymagania i badania. PKN. 1996.
- [28] Sachta D. Zawartość zanieczyszczeń stałych w paliwach do silników Diesla, w aspekcie wymagań stawianych przez Światową Kartę Paliw. *Nafta Gaz*. 2010; 4: 302-306.
- [29] STG Donalclone™ Air Cleaner. Available from: www.donaldson.com.
- [30] Truhan J. Filter Performance as the Engine Sees It. *Filtration & Separation*. 1997; 34(12): 1019-1022.
- [31] Worldwide Fuel Charter. Fifth Edition. September, 2013; 11-14.
- [32] Inter Cars – filtry olejowe. Available from: www.intercars.com.pl/#/ajax_str.php?id=48&news=11881&kat_nazwa=WYDA&kat=5&msg=Filtry_oleju.