

Andrzej SUCHECKI  
Jacek NOWAKOWSKI  
Tomasz KNEFEL  
Józef SOCHACKI

PTNSS–2015–3467

## Impact assessment of technological changes on selected performance diesel engines

*The article presents the research results of compression-ignition engines, with a small displacement. Engines that were tested, were characterized by the same displacement, but have been produced in two versions: with a power of 51 i 67 kW, and for each version were used two methods for surface treatment of cylinders: conventional honing and made by laser oil microchambers. Each motor has been tested durability consisting of 504 hours of work. For the analyzes were selected three parameters: opacity, blow-by exhaust gases to the crankcase and lubricating oil consumption. Oil consumption was analyzed based on both the average hourly consumption resulting from the refilling of oil, and the hourly consumption measured at different loadings.*

Key words: Diesel engine, durability test, opacity, blow-by exhaust gases, lubricating oil consumption

### Ocena wpływu zmian technologicznych na wybrane parametry pracy silników o zapłonie samoczynnym

*W artykule przedstawiono wyniki badań silników o zapłonie samoczynnym, o niewielkiej pojemności skokowej. Silniki, które poddano badaniom charakteryzowały się tą samą pojemnością skokową, lecz zostały wyprodukowane w dwóch wersjach: o mocy 51 i 67 kW, a dla każdej z wersji zastosowano dwie metody obróbki powierzchni cylindrów: konwencjonalne honowanie oraz wykonanie za pomocą lasera mikrokomór olejowych. Każdy z silników został poddany próbie trwałościowej obejmującej 504 godziny pracy. Do analiz wybrano trzy wielkości: zadymienie spalin, przedmuchy spalin do skrzyni korbowej oraz zużycie oleju smarującego. Tę ostatnio analizowano zarówno w oparciu o średnie godzinowe zużycie wynikające z uzupełniania oleju, jak i zużycie godzinowe zmierzone przy różnych obciążeniach.*

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie samoczynnym, test trwałościowy, zadymienie, przedmuchy spalin, zużycie oleju

#### 1. Wprowadzenie

W ostatnich latach główne kierunki zmian w konstrukcji silników są wyznaczone przez wymagania zawarte w przepisach prawnych dotyczących dopuszczalnych stężeń toksycznych składników w spalinach oraz emisji dwutlenku węgla. Prace rozwojowe związane są głównie ze zwiększeniem efektywności procesu spalania, przez rozwój i doskonalenie układów związanych z tworzeniem mieszanki palnej. Jednak producenci silników wprowadzają również nowe rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne poszczególnych elementów silników. Jednym z obszarów, który podlega intensywnym pracom rozwojowym jest konstrukcja złożeń tłok-cylinder. Chodzi głównie o zmniejszenie zużycia oleju przez silnik, a co za tym idzie, stężeń toksycznych składników spalin.

#### 2. Nowe kierunki obróbki powierzchni cylindrów

W celu polepszenia współpracy między pierścieniami tłokowymi a tuleją cylindrową, obecnie stosuje się różne technologie wykonywania gładzi cylindrowej. Celem nadrzędnym jest zmniejszenie siły tarcia między pierścieniem a

tuleją, zapewniając przy tym małe zużycie obu elementów pary trącej. Można to osiągnąć przez nadanie pierścieniowi uszczelniającemu oraz powierzchni tulei kształtu zapewniającego utrzymanie oleju smarującego na powierzchni roboczej w takiej ilości, aby jego zużycie było minimalne. Odpowiednia konstrukcja i technologia powłok ma zapewnić przy tym brak zatarcia w przypadku przerwania filmu olejowego, co jest zadaniem najtrudniejszym. Istotną rolę odgrywa tu czynnik smary i jego właściwości, zwłaszcza zdolność tworzenia warstw granicznych na powierzchni tulei cylindrowej i pierścienia tłokowego. Należy bez względu na panujące obciążenia oddzielić pierścień tłokowy od tulei cylindrowej. Przemieszczający się po powierzchni tulei pierścień musi na swej drodze natrafić na minimalnej grubości warstwę czynnika smarnego, aby mógł się wytworzyć klin smarny i powstał film olejowy [2].

Nowe kierunki obróbki powierzchni cylindrów wynikają ze zmian w konstrukcjach silników, w których dąży się do zmniejszenia zużycia oleju i spełnienia przepisów prawnych dotyczących zawartości toksycznych składników w spalinach, jak i również emisji CO<sub>2</sub> [4, 5].

---

Aktualnie w procesach produkcyjnych obróbki powierzchni cylindrów dominuje kierunek procesu honowania konwencjonalnego wielostopniowego z strukturą geometryczną powierzchni typu płasko wierzchołkowego [1, 3]. Dla opisanie obrazu takiej struktury powierzchni cylindra przyjmuje się parametry chropowatości według wymagań normy ISO 13565-2 [6].

Inne nowe kierunki obróbki powierzchni cylindrów są oparte na bazie honowania konwencjonalnego wielostopniowego i są to procesy typu: honowania ślizgowo-spiralnego polegające na zmianie kąta honowania, honowania strumieniowego polegające na zastosowaniu obróbki powierzchni cylindra cieczą pod wysokim ciśnieniem, honowania laserowego zapewniające nacięcie głębokich rys lub wykonanie laserem kieszeni olejowych w formie systemu mikrokomór ciśnieniowych.

Najnowsze technologie obróbki powierzchni cylindrowych są połączeniem obróbki konwencjonalnej honowania z obróbką laserem i obejmują następujące operacje [7]: honowanie konwencjonalne-wstępne i bazowe, obróbka laserowa polegająca na wypalaniu wąskich, głębokich rowków lub kieszeni-olejowych w górnej części tulei cylindrowej, honowanie końcowe-wykańczające mające na celu usunięcie nadtopionych warstw materiału powstałych w wyniku wypalania laserem kieszeni olejowych oraz utworzenie płaskiej powierzchni typu „plateau”.

Zasada honowania laserowego jest taka sama jak w honowaniu konwencjonalnym. Wrzeczono z głowicą optyczną i laserową wykonuje w zależności od kształtu struktury (kieszeni olejowych) ruch obrotowy i posuwisto-zwrotny. W czasie procesu wysoka energia promieniowania laserowego kierowana jest na obrabianą powierzchnię, częściowo jest odbijana i pochłaniana przez materiał cylindra. Energia pochłonięta jest tak duża, że powoduje podgrzanie materiału do stanu lotnego i następuje wypalenie określonego rowka lub kieszeni. Kształt struktury laserowej jest zapewniany w cyklu sterowanym numerycznie.

W wyniku dużego gradientu temperatury oraz bardzo skupionej wiązki promieniowania o dużej mocy, oddziaływanie promieniowania na materiał cylindra jest ograniczony do niewielkiej powierzchni, a całkowity wzrost temperatury obrabianej powierzchni jest nieznaczny. Dzięki temu następuje zahartowanie materiału w okolicy wypalanego rowka i wzrost twardości. Strukturę geometryczną powierzchni wykonanej laserem można scharakteryzować następująco: występuje w górnej strefie cylindra na długości odpowiadającej polu współpracy pakietu pierścieni tłokowych z gładzią cylindra w strefie GMP, pojedyncze poziome rysy nacięte laserem mają szerokość 40-80  $\mu\text{m}$ , a głębokość 5-25  $\mu\text{m}$ , odstęp pomiędzy rysami

zarówno na obwodzie jak i na długości jest taki sam, parametr  $R_z$  chropowatości powierzchni w strefie oddziaływania laserem wynosi 10-12  $\mu\text{m}$ .

Nowe metody i sposoby kształtowania powierzchni cylindrów, przez powiązanie procesu konwencjonalnego honowania cylindrów ze strukturą powierzchni gładkiej lub z udziałem dodatkowej obróbki laserem, są wynikiem prac badawczych konstruktorów silników, mających na celu zmniejszenie zużycia oleju i zawartości składników toksycznych w spalinach.

### 3. Cel pracy

Celem pracy była ocena silników o zapłonie samoczynnym, przeprowadzona w oparciu o próby trwałościowe, trwające dla każdego z nich pięćset cztery godziny. Analiza dotyczyła dwóch wersji silników: pięciu wykonanych w wersji Euro 4 oraz pięciu wykonanych w wersji Euro 5. Tuleje cylindrowe silników w wersji Euro 5 były wykonane za pomocą obróbki z wykorzystaniem lasera.

Badania miały na celu określenie wpływu różnic konstrukcyjnych na: zadymienie spalin, natężenia przepływu spalin do skrzyni korbowej („blow-by”) i zużycie oleju silnikowego.

Pomiary wykonano na hamowni silnikowej w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji „Bosmal” w Bielsku-Białej.

### 4. Program badań

Pomiary zadymienia spalin przeprowadzono w dziewiętnastu punktach, w całym zakresie użytecznych prędkości obrotowych, od 1000 do 5000 obr/min, co 250 obr/min, podczas pracy silnika przy pełnym obciążeniu. Temperatury oleju i cieczy chłodzącej utrzymywano na poziomie jak dla nominalnych warunków pracy. Po okresie stabilizacji pracy silnika, w każdym punkcie następowała seria trzech pomiarów, z których wyznaczano średnią wartość, wykorzystywaną do analizy.

Pomiary natężenia przedmuchów spalin z komory spalania do skrzyni korbowej przeprowadzono w tych samych punktach co pomiary zadymienia z tą różnicą, że przedmuchy mierzono zarówno przy pełnym, jak i najmniejszym możliwym obciążeniu.

Pomiary zużycia oleju w analizowanych silnikach były wykonywane dwoma metodami. Pierwsza polegała na uzupełnianiu oleju, po każdorazowym zatrzymaniu silnika w próbie (to jest co 3 godziny), do maksymalnego poziomu widocznego na poziomie wskaźniku oleju. Ilość dolanego oleju wpisywana jest do tabeli zużycia oleju, indywidualnej dla każdego badanego silnika.

Druga metoda to okresowe ważenie połączone ze zlewaniem. Pomiaru zużycia oleju tą metodą (tzw. „próby olejowe”) dokonuje się po określonym czasie pracy silnika tj. po docieraniu, po 126, 252,

378, 504 godzinach pracy, przy 80% mocy maksymalnej i określonych obciążeniach tj. pełnym obciążeniu i najmniejszym stabilnym obciążeniu. Procedura polega on na wstępnym nagraniu silnika i uzupełnieniu oleju do wymaganego poziomu w misce olejowej. Po ponownym doprowadzeniu silnika do nominalnej temperatury pracy wyłącza się go i przez trzydzieści minut zlewa całość oleju do specjalnego naczynia. Po określeniu początkowej masy oleju wykonuje się „próbę olejową”, to znaczy silnik pracuje przy założonych parametrach przez cztery godziny. Po skończonej próbie ponownie zlewa się olej, ustala masę końcową, a różnica jest wynikiem pomiaru. Warto dodać, że każde zlewanie oleju powinno odbywać się w takiej samej temperaturze oleju i cieczy chłodzącej.

## 5. Stanowisko i obiekty badań

Badane silniki były umieszczane stanowisku hamownianym, w którym do zmiany obciążenia używano elektrowirowego hamulca W150 z elektronicznym układem sterującym firmy SCHENCK, zapewniającym utrzymanie wszystkich nastaw w żądanym przedziale zmian.

Zadymienie spalin mierzono dymomierzem AVL 415S Smoke Meter, z grzaną drogą pobierania próbek, przy stałej prędkości obrotowej (ustalone warunki). Natężenie przepływu przedmuchiwanego spalin mierzono za pomocą przepływomierza z przesłoną spiętrzącą AVL Blow-By Meter 4040-A02. Do pomiaru masy oleju w próbach olejowych wykorzystano specjalistyczną wagę Bizerba S.p.A. Milano.

Obiektami badań były silniki o zapłonie samoczynnym, czterocylindrowe, o pojemności skokowej 1248 cm<sup>3</sup>. Badano dwie grupy silników. Do pierwszej zaliczono silniki, rozwijające moc 51 kW (oznaczone je jako: S1, S2, S3, E1, E2 i E3), a w drugiej były silniki o mocy 67 kW (silniki: S4, S5, E4 i E5). Do obu grup przyporządkowano zarówno silniki spełniające normy emisji

zanieczyszczeń Euro 4, jak i Euro 5. Symbolem „S” oznaczono silniki spełniające normy emisji spalin Euro 4, natomiast symbolem „E” silniki spełniające normy emisji spalin Euro 5.

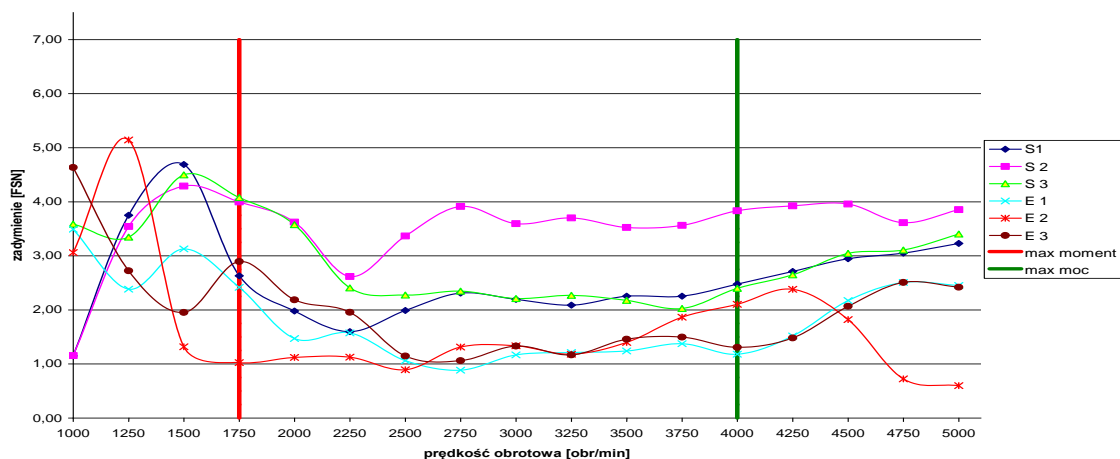
## 6. Wyniki badań wybranych parametrów silników wykonanych w wersjach euro IV i euro V po określonych godzinach pracy

Wyniki pomiarów opracowano i przedstawiono w formie graficznej. Na wykresach zawarta jest informacja o mocy danych silników: 51 kW, 67 kW i oznaczeniu silnika: S1, S2, E1, E2,...itd.

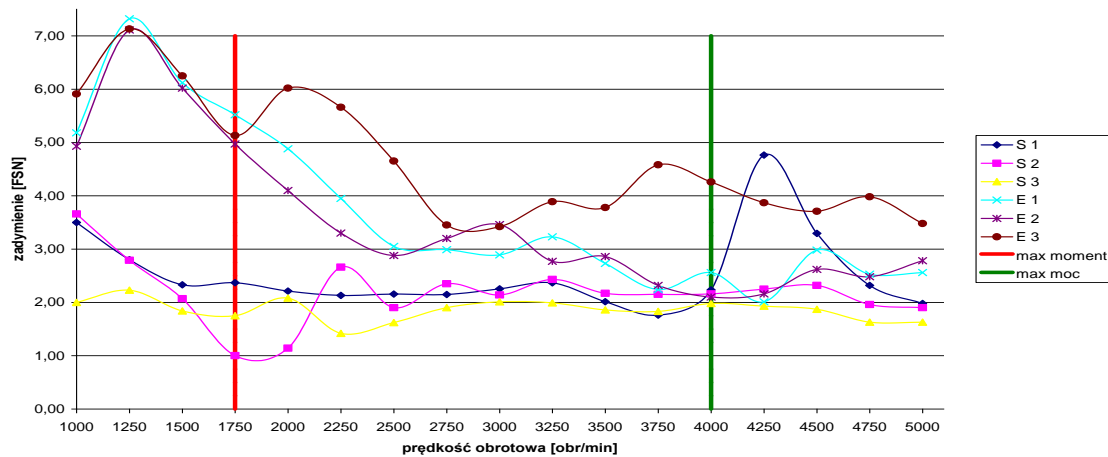
### Zadymienie spalin

Wybrane wyniki pomiarów zadymienia spalin przedstawiono na rys. 1÷4. Na osi poziomej każdego z nich przedstawiono prędkość obrotową, a na pionowej wartości zadymienia spalin. Każdemu silnikowi przyporządkowany jest odpowiedni kolor linii łączącej punkty pomiarowe. Na wykresach zaznaczono pionowymi liniami: najmniejszą prędkość obrotową, przy której rozwijany jest maksymalny wartość momentu obrotowego (linia czerwona) oraz prędkość obrotową maksymalnej mocy (linia zielona).

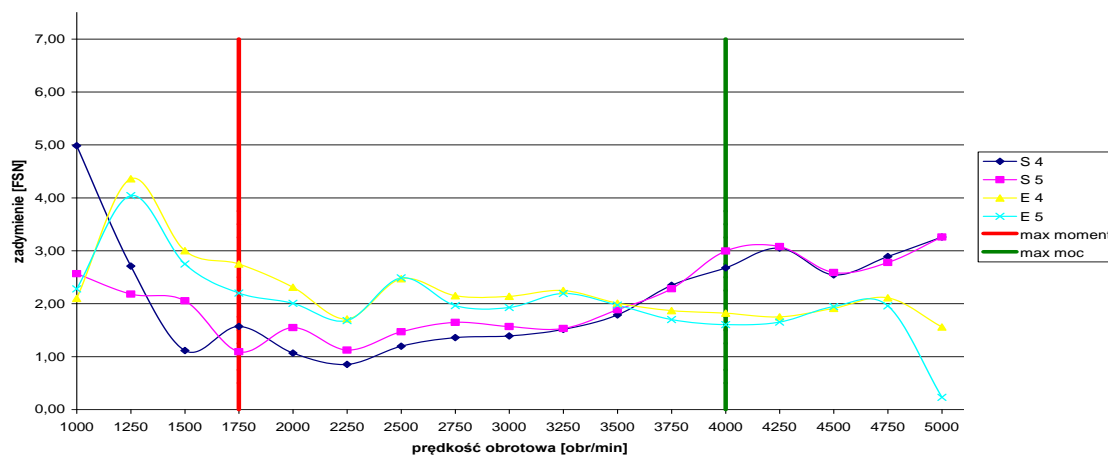
Pomiary zadymienia spalin zawsze były wykonane przy pełnym obciążeniu, a spaliny były pobierane przed filtrem cząstek stałych. Charakter zmian tej wielkości jest we wszystkich przypadkach podobny: przy niewielkich prędkościach obrotowych są osiągnięte stosunkowo duże wartości, a po osiągnięciu maksymalnego momentu obrotowego zadymienie zmniejsza się i pozostaje na tym poziomie aż do osiągnięcia maksymalnej prędkości obrotowej. W zakresie użytecznych prędkości obrotowych odnotowano wartości zadymienia od 1 do 6 FSN. Pomiary wykazały, że jednostki napędowe o mocy 51 kW w wersji Euro IV po docieraniu emitowały więcej dymu, niż silniki w wersji Euro V.



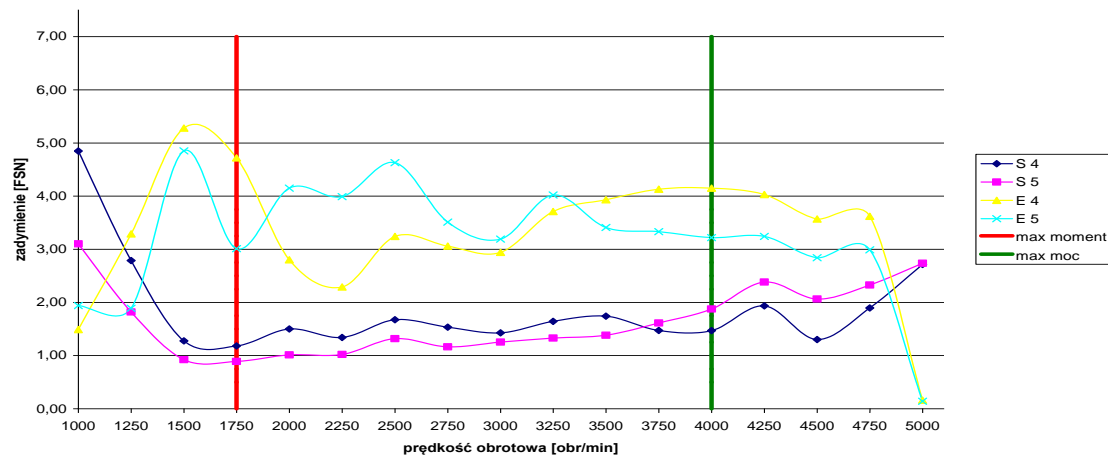
Rys. 1. Zmiany zadymienia spalin po docieraniu, przy pełnym obciążeniu, dla silników o mocy 51 kW



Rys. 2. Zmiany zadymienia spalin po 504 godzinach pracy, przy pełnym obciążeniu, dla silników o mocy 51 kW



Rys. 3. Zmiany zadymienia spalin po docieraniu, przy pełnym obciążeniu, dla silników o mocy 67 kW



Rys. 4. Zmiany zadymienia spalin po 504 godzinach pracy, przy pełnym obciążeniu, dla silników o mocy 67 kW

W miarę upływu czasu testu, zadymienie spalin silników w wersji Euro IV zmniejszało się, a silników w wersji Euro V ulegało zwiększeniu. Z kolei silniki o mocy 67 kW w wersji Euro IV we wszystkich przypadkach były źródłem mniejszego zadymienia niż silniki Euro V mimo, że te ostatnie pracowały w warunkach większego obciążenia cieplnego. Nie stwierdzono również niewłaściwej

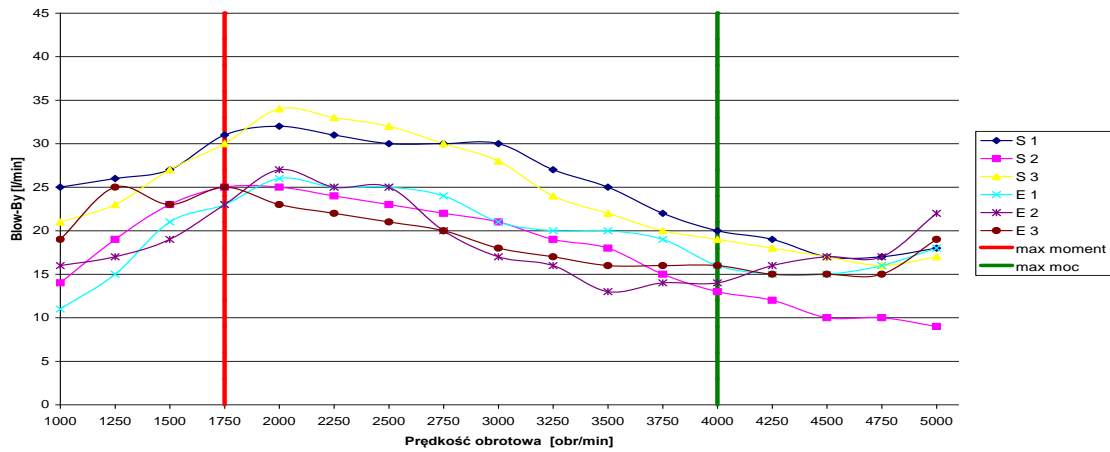
pracy układów zasilania w paliwo silników o większej mocy.

#### Przedmuchi spalin do skrzyni korbowej (Blow-By)

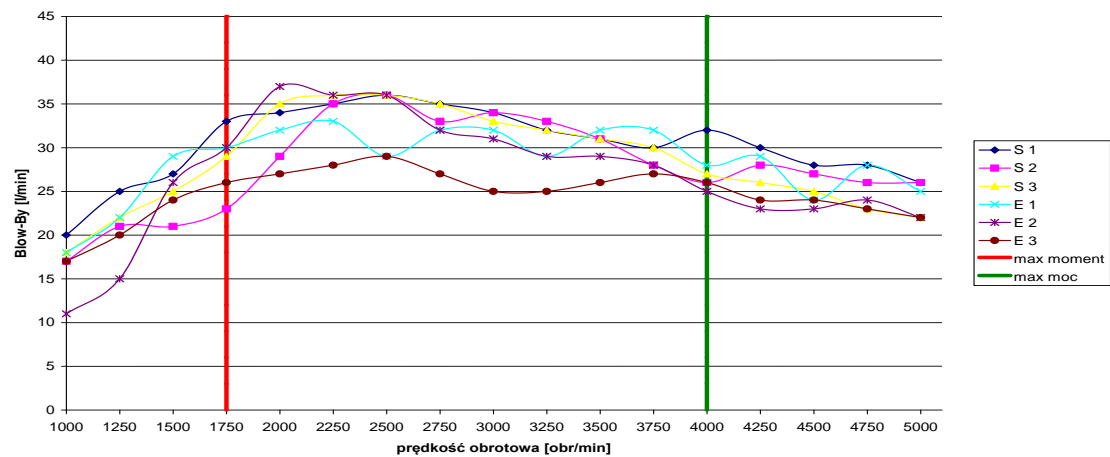
Pomiary natężenia przedmuchi spalin do skrzyni korbowej wykonywano zarówno przy niewielkim (5 Nm), jak i przy pełnym obciążeniu silnika. Wybrane wyniki pomiarów – ograniczone

do pełnego obciążenia - przedstawiono na rys. 5÷8. Na osi poziomej każdego z nich przedstawiono prędkość obrotową, a na pionowej wartości natężenia przepływających spalin. Każdemu silnikowi przyporządkowany jest odpowiedni kolor linii łączącej punkty pomiarowe. Podobnie jak

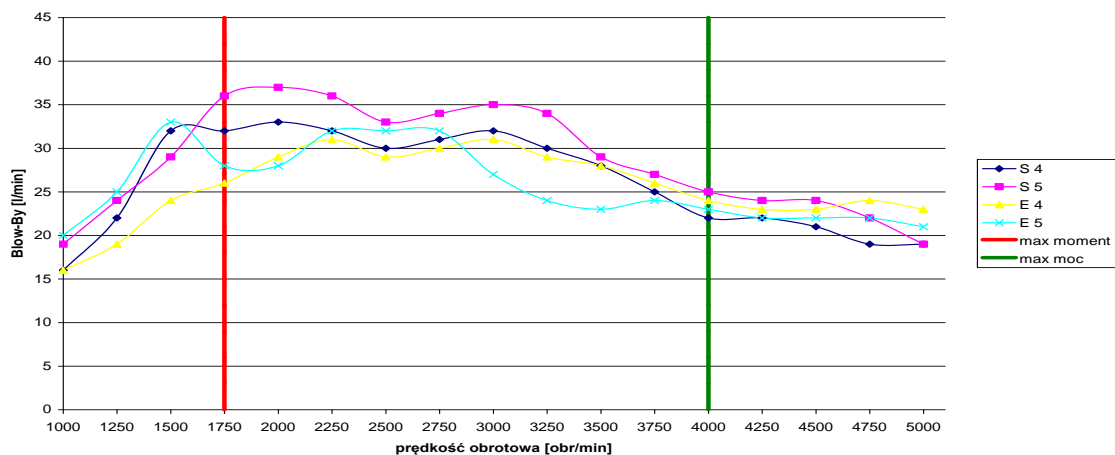
poprzednio, na wykresach zaznaczono pionowymi liniami: najmniejszą prędkość obrotową, przy której rozwijany jest maksymalny wartości momentu obrotowego (linia czerwona) oraz prędkość obrotową maksymalnej mocy (linia zielona).



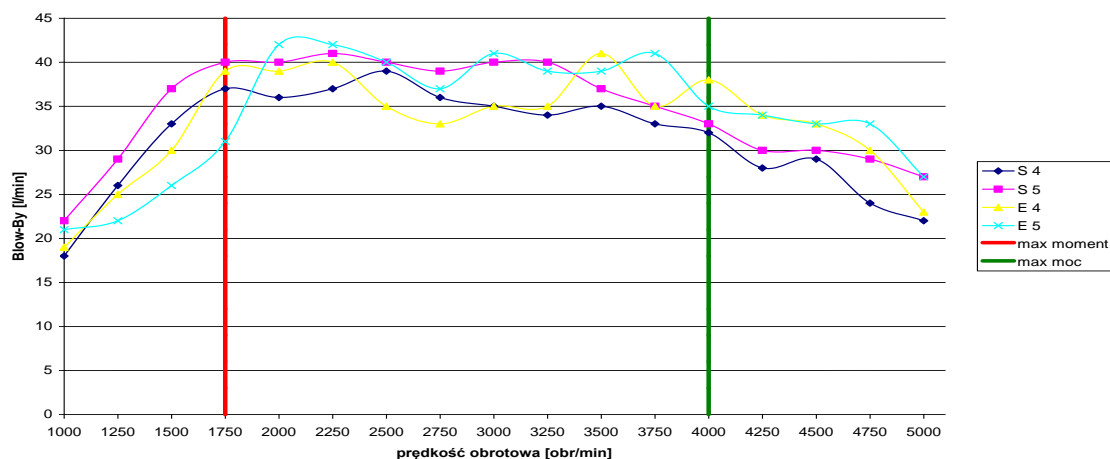
Rys. 5. Zmiany natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej po docieraniu, przy pełnym obciążeniu, dla silników o mocy 51 kW



Rys. 6. Zmiany natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej po 504 godzinach pracy, przy pełnym obciążeniu, dla silników o mocy 51 kW



Rys. 7. Zmiany natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej po docieraniu, przy pełnym obciążeniu, dla silników o mocy 67 kW



Rys. 8. Zmiany natężenia przedmuchi spalin do skrzyni korbowej po 504 godzinach pracy, przy pełnym obciążeniu, dla silników o mocy 67 kW

Zmiany natężenia przedmuchi spalin, zmierzone przy pełnym obciążeniu, dla wszystkich przypadków zachowują podobny charakter – po początkowym zwiększaniu wartości przy niskich prędkościach obrotowych, maksima są osiągnięte przy prędkościach obrotowych odpowiadających największym ciśnieniom efektywnym, po czym – dla maksymalnych prędkości obrotowych – następuje zmniejszenie wartości przedmuchi, praktycznie do poziomu wyjściowego. W grupie silników o maksymalnej mocy 51 kW, dla wersji Euro IV odnotowano nieco większe wartości przedmuchi spalin w odniesieniu do wersji Euro V. Przy największym ciśnieniu efektywnym wartości przedmuchi wynosiły od 27 do 37 l/min, a przy maksymalnej mocy od 25 do 32 l/min. W grupie silników o maksymalnej mocy 67 kW w zasadzie nie występują różnice w zmierzonych wartościach przedmuchi. Daje się zauważyć większy przedział maksymalnych wartości przedmuchi, związany z większym zakresem średniego ciśnienia użytecznego silników o większej mocy.

Nieco inny charakter mają przebiegi przedmuchi zmierzone przy niewielkim obciążeniu. Tutaj decydującą rolę odgrywa prędkość obrotowa i wraz z jej zwiększaniem następuje zwiększanie wartości przedmuchi. Podobnie jak przy pełnym obciążeniu większe wartości przedmuchi zanotowano dla silników w wersji Euro IV. Po przepracowaniu przez silniki 504 godzin wartości przedmuchi mierzone przy największej prędkości obrotowej wynosiły: dla silników o mniejszej mocy od 20 do 32 l/min, a dla większej mocy od 20 do 24 l/min.

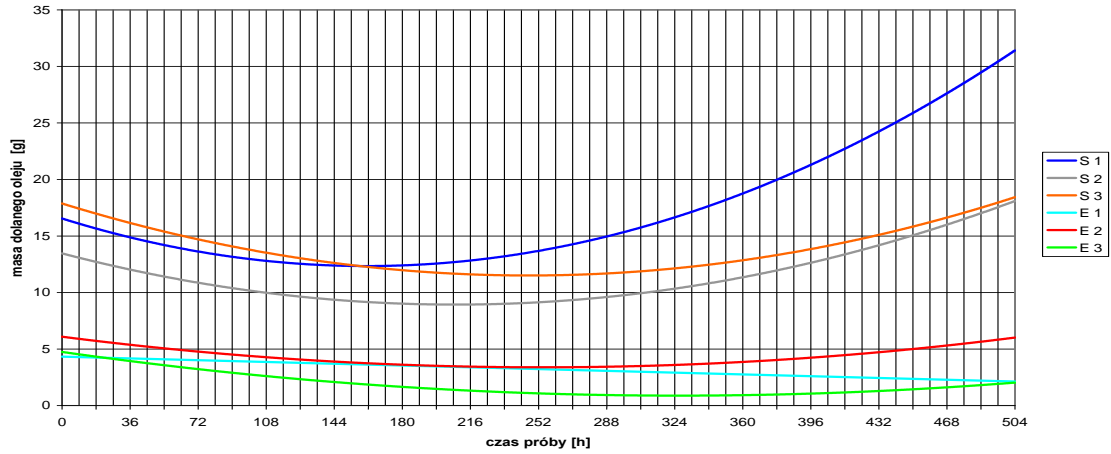
### Zużycie oleju

Jak już wspomniano, zużycie oleju w analizowanych silnikach określono prowadząc pomiary dwoma metodami. W pierwszej z metod dolewano oleju co trzy godziny pracy silników i rejestrowano masę uzupełnionego oleju. W drugiej metodzie zużycie oleju mierzono w tzw. "próbach olejowych", w dwóch testach po przepracowaniu przez silnik określonej liczby godzin, przy pełnym obciążeniu i przy 33% obciążeniu.

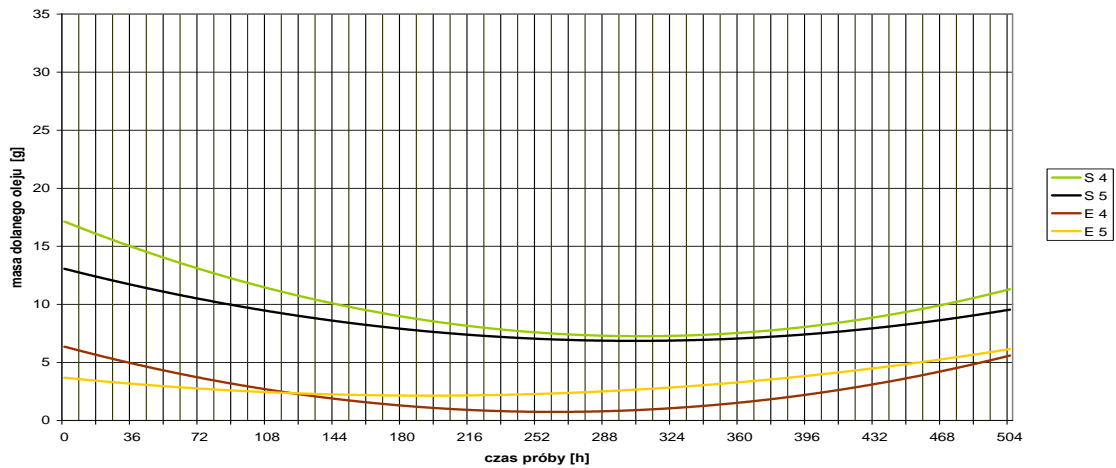
Rysunki 9 i 10 przedstawiają wyznaczone dla każdego silnika średnie, godzinowe zużycie oleju, wynikające z uzupełniania go do maksymalnego poziomu. Na osi poziomej każdego z wykresów przedstawiono czas trwania próby, a na pionowej osi jest podana masa dolanego oleju. W celu porównania zużycia oleju przez poszczególne silniki, uzyskane z pomiarów wartości ujęto w dwie grupy: jedną stanowiły dane dla silników o mocy 51 kW, a drugą dane dla silników o mocy 67 kW.

Charakter zmian zużycia oleju dla obu grup jest podobny: większe zużycie oleju ma miejsce na początku próby, po dotarciu silnika oraz pod koniec pod koniec próby, gdy widoczny jest wpływ zużycia par ciernych silnika. W przedziale od 180 do 360 godzin pracy silników zużycie oleju jest najmniejsze – od 2 g dla silników o mocy 67 kW w wersji Euro V, do 12 g dla silników o mocy 51 kW w wersji Euro IV. Od razu dają się również zauważyć istotne różnice w zużyciu oleju przez silniki obu grup. Średnie godzinowe zużycie oleju jest mniejsze o około 70 % dla silników wykonanych w wersji Euro V, zarówno tych o maksymalnej mocy 51 kW, jak i o maksymalnej mocy 67 kW. Widać wyraźny wpływ zastosowanej technologii obróbki tulei cylindrowych, polegający na wykonaniu kieszeni olejowych na powierzchni tulei.





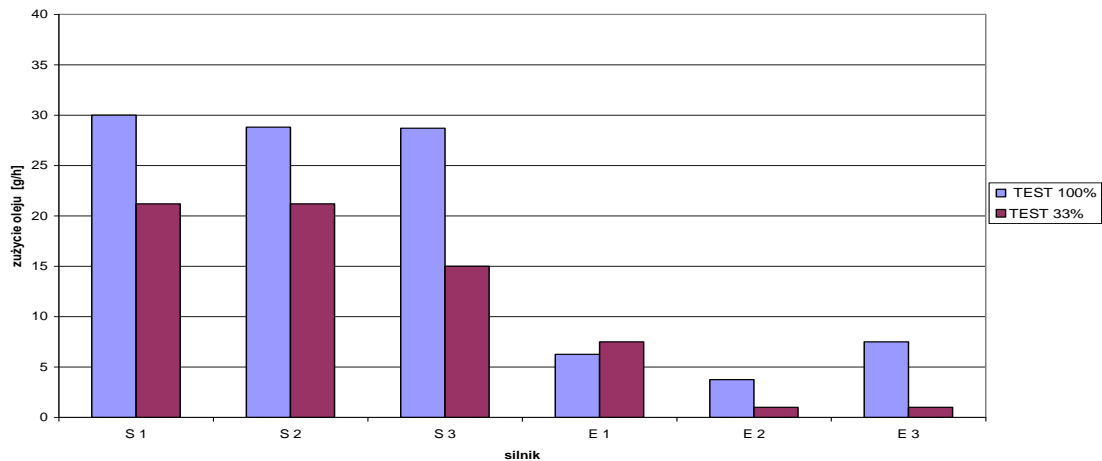
Rys. 9. Średnie godzinowe zużycie oleju wynikające z uzupełniania co trzy godziny pracy dla silników o mocy 51 kW



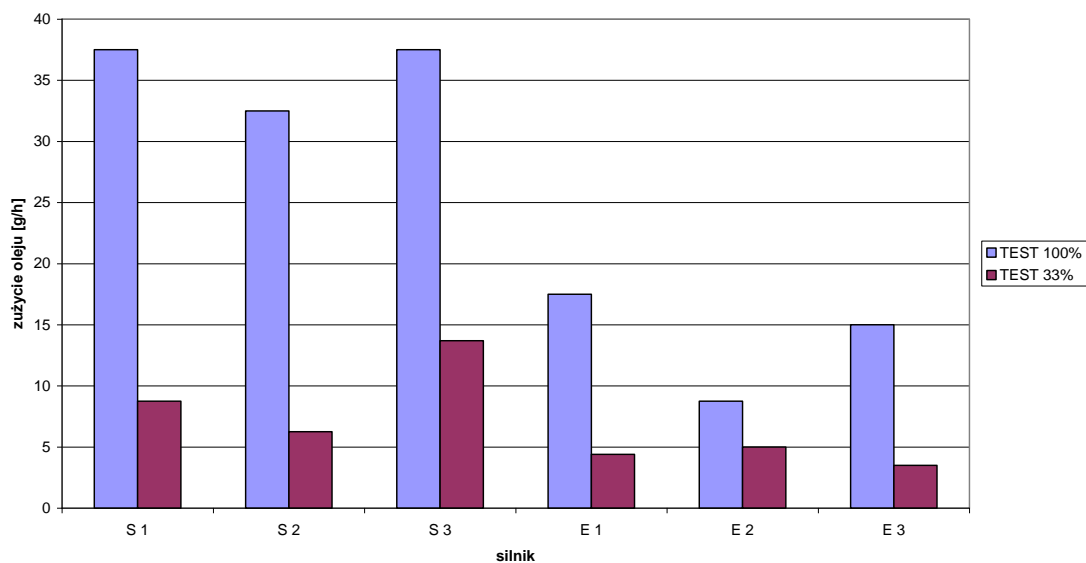
Rys. 10. Średnie godzinowe zużycie oleju wynikające z uzupełniania co trzy godziny pracy dla silników o mocy 67 kW

Z kolei na rys. 11÷14 przedstawiono zużycie oleju określone w próbach olejowych. Na osi poziomej każdego z nich umieszczono oznaczenie silnika, a na osi pionowej o ilość oleju zużytego przez godzinę trwania próby. Kolorem niebieskim

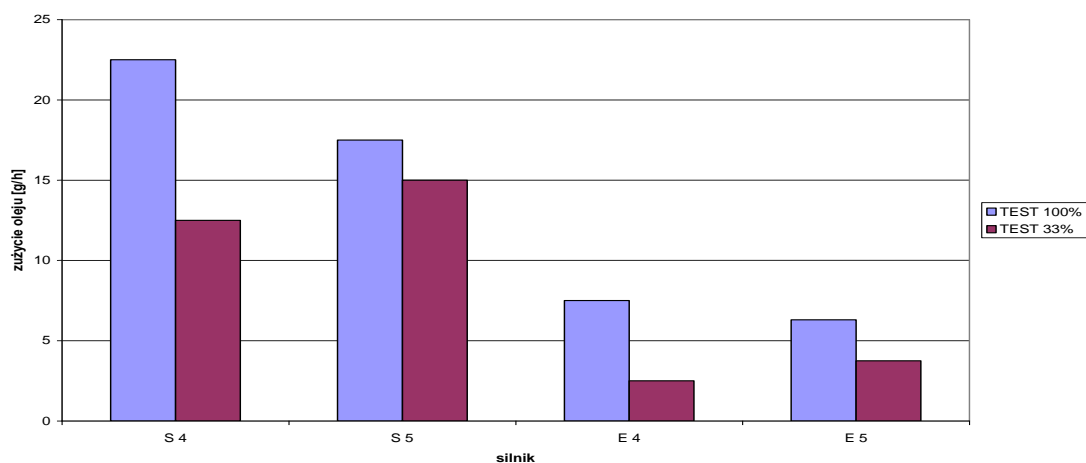
oznaczono próbę olejową przy pełnym obciążeniu, a kolorem czerwonym próbę przy 33% obciążeniu. Rys. 11 i 12 przedstawiają zużycie oleju w silnikach o mocy 51 kW, a rysunki 13 i 14 zużycie w silnikach o mocy 67 kW.



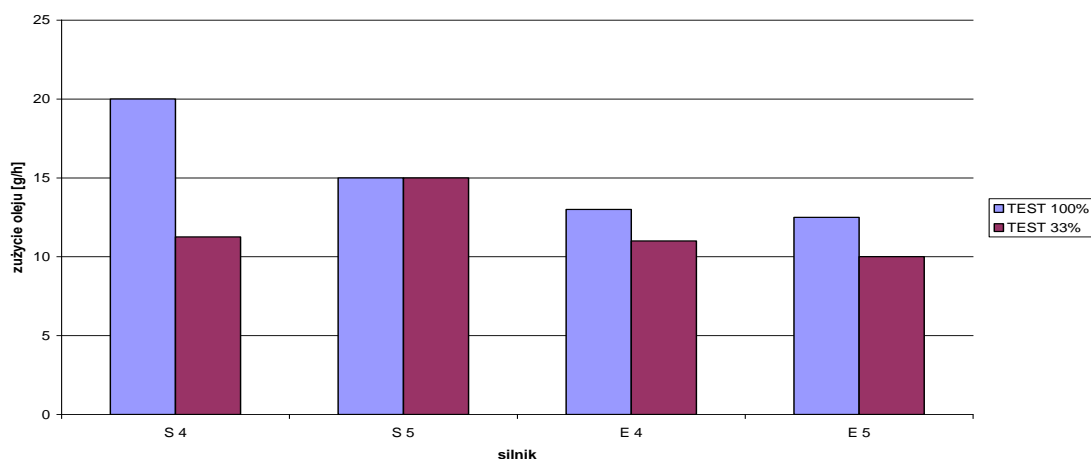
Rys. 11. Zużycie oleju po docieraniu dla silników o mocy 51 kW



Rys. 12. Zużycie oleju po 504 godzinach pracy dla silników o mocy 51 kW



Rys. 13. Zużycie oleju po docieraniu dla silników o mocy 67 kW



Rys. 14. Zużycie oleju po 504 godzinach pracy dla silników o mocy 67 kW

Przy pełnym obciążeniu silniki obu grup zużywają więcej oleju niż przy obciążeniu częściowym.

Dla silników o mniejszej mocy, próba olejowa przeprowadzona po przepracowaniu 504 godzin wykazała zwiększenie zużycia oleju o około 20 %

(tuleje wykonane w standardowej technologii) i o około 100 % (tuleje wykonane z wykorzystaniem lasera). Jednak silniki, których cylindry były wykonane w nowszej technologii zużywały o około 40 % mniej oleju.



---

Nieco odmiennie wartości uzyskano dla silników o większej mocy. Zużycie oleju po zakończeniu testu w silnikach, które zostały wykonane w standardowej technologii, niewiele odbiegało od zużycia na początku testu. Nastąpiło nawet niewielkie zmniejszenie zużycia. Natomiast te wykonane z wykorzystaniem lasera zwiększyły zużycie oleju o około 100 %.

## 7. Podsumowanie i uwagi końcowe

Przedstawione wyniki pomiarów umożliwiły porównanie wybranych parametrów pracy silników wykonanych w wersji Euro IV i Euro V. Sformułowano następujące uwagi końcowe:

### A. dotyczące zadymienia spalin

- Po docieraniu silniki o mocy 51 kW wykonane w wersji Euro V charakteryzują się mniejszym zadymieniem od silników wykonanych w wersji Euro IV, a wartości zadymienia zawierały się w szerokim zakresie od 0,6 do 7,32 FSN.
- Silniki o mocy 67 kW wykonane w wersji Euro V w całym zakresie pomiarowym wykazywały wyższe wartości zadymienia niż silniki tej samej mocy wykonane w wersji Euro IV.
- Pomiar wartości zadymienia w silnikach w wersji Euro V mógł być w pewien sposób zniekształcony. Wynika to z konstrukcji silnika, która uniemożliwia właściwe zamocowanie sondy pomiarowej. Na wielkość zadymienia mogło mieć również wpływ nadmierne, zdaniem autorów, zużycie oleju smarującego przez turbosprężarkę. Warto też pamiętać, że pomiary te były wykonywane przed filtrem cząstek stałych, natomiast za filtrem wartości zadymienia praktycznie były równe zeru.

### B. dotyczące przedmuchi spalin do skrzyni korbowej

Ilość gazów przedostających się do skrzyni korbowej jest jednym z parametrów diagnostycznych umożliwiających określenie nieszczelności przestrzeni między tłokiem, a gładzią cylindrową. Natężenie przepływających gazów można zmierzyć za pomocą przepływomierzy o małym oporze wewnętrznym. Pomiaru dokonuje się przez podłączenie instalacji pomiarowej w miejscu korka wlewu oleju, separatora oleju czy w miejscu miarki poziomu oleju. Należy jednak pamiętać, że podczas wykonywania pomiaru pozostałe otwory, którymi mogą uchodzić gazy spalinowe ze skrzyni korbowej muszą być zaślepienie. Na dokładność wyników pomiarów w głównej mierze ma wpływ temperatura silnika oraz prędkość obrotowa. Dlatego pomiary wykonuje się zwykle przy ściśle określonej prędkości obrotowej i obciążeniu.

- Wartości przedmuchi spalin do skrzyni korbowej przy pełnym obciążeniu zawierały się w zakresie od 9 do 43 l/min, a przy obciążeniu 5

Nm były mniejsze i mieściły się w zakresie od 7 do 32 l/min.

- Przedmuchi spalin do skrzyni korbowej przy pełnym obciążeniu zarówno dla silników o mocy 51 kW, jak i 67 kW osiągają maksymalne wartości przy prędkości obrotowej, w których występuje maksymalny moment obrotowy; jest to związane z wartościami ciśnienia generowanymi w cylindrze.
- Przedmuchi spalin do skrzyni korbowej we wszystkich silnikach przy obciążeniu 5 Nm zwiększają się wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej. Wtedy silnik wykonuje większą liczbę cykli pracy, co powoduje, że w tym samym czasie ilość przepływających gazów jest większa. Jednak odnosząc przedmuchi spalin do skrzyni korbowej do jednego cyklu pracy silnika okazuje się, że przy obciążeniu 5 Nm wartości te niewiele różnią się od siebie w całym zakresie prędkości obrotowej silnika.
- Wartości przedmuchi spalin do skrzyni korbowej zarówno w silnikach o mocy 51 kW i 67 kW są nieco niższe w silnikach wykonanych w wersji Euro 5 niż w silnikach wykonanych w wersji Euro IV. Na taką relację może mieć wpływ lepsze uszczelnienie węzła tłok-pierścienie tłokowe -cylinder. W silnikach Euro V przez laserowe nacięcie w tulei cylindrowej w obrębie GMP kieszeni olejowych zmniejszono ryzyko przzerwania filmu olejowego pomiędzy współpracującymi elementami, co jednocześnie powoduje lepsze uszczelnienie węzła tłok-pierścienie-cylinder i zwiększenie szczelności komory spalania.

### C. dotyczące zużycia oleju

Silniki wykonane w wersji Euro V posiadające tuleje cylindrowe obrabiane laserowo, charakteryzują się wyraźnie mniejszym zużyciem oleju w porównaniu do silników wykonanych w Euro IV.

- Zarówno w silnikach o mocy 51 kW, jak i 67 kW, godzinowe zużycie oleju było mniejsze dla wersji Euro V.
- Wartości średniego godzinowego zużycia oleju w próbie zawierały się w przedziale od 1 do 7 g/h dla silników wykonanych w wersji Euro V i od 8 do 32 g/h dla silników wykonanych w wersji Euro IV.
- Wszystkie silniki charakteryzowały się wyższym godzinowym zużyciem oleju w początkowym i końcowym etapie trwania próby trwałościowej, co może mieć związek z docieraniem się współpracujących elementów na początku i ze zużywaniem par ciernych w końcowym etapie próby.
- Zużycie oleju w próbach olejowych przy pełnym obciążeniu było wyższe, niż w próbach olejowych przy częściowym (33%) obciążeniu dla obu wersji silników.

- Wartości zużycia oleju w próbach olejowych przy pełnym obciążeniu zawierały się od 10 do 37 g/h dla silników wykonanych w wersji Euro IV i od 2,5 do 17,5 g/h dla silników wykonanych w wersji Euro V.
- Wartości zużycia oleju w próbach olejowych przy częściowym (33%) obciążeniu zawierały

się od 2,5 do 21 g/h dla silników wykonanych w wersji Euro IV i od 1 do 11 g/h dla silników drugiej wersji.

Większe zużycie oleju w próbach olejowych przy pełnym obciążeniu dla obu wersji silników, może wynikać z wyższej temperatury pracy oraz zużywania oleju przez turbosprężarkę.

## Literatura

- [1] Hill S.H.: Cylinder Bore Finish and Their Effect on Oil Consumption, Perfect Circle Div. of Dana Corp., 2001-01-33550.
- [2] Kaźmierczak A.: Wpływ zastosowania powłoki ceramicznej na procesy tribologiczne w uszczelnieniu pierścieniowym silników spalinowych, Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej Nr 88; Wrocław, 2002.
- [3] Lenthal J.S.: Cylinder Bore Surface Finish, its Evolution and Specification. The Tribology of Internal Combustion Engines, University of Birmingham, 1996.
- [4] Robota A., Zwein F.: Einfluss der Zylinderlaufflächentopografie auf den Ölverbrauch und die Partikelemissionen eines DI- Dieselmotors, MTZ 60 (1999) 4.
- [5] Suhecki A., Sordyl A., Bielaczyc P.: Analysis of the oil consumption in the modern EURO 4, direct-injection, turbocharger compression-ignition automobile engines, PTNSS Congress 2005, Paper P05-C030.
- [6] ISO 13565-2, PKN 1999 Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa; powierzchnie o warstwowym właściwościach funkcjonalnych.
- [7] Materiały firmy GEHRING GmbH&Co. KG. Laserstrukturierung- Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Oberflächen, 2004.

Mr Andrzej Suhecki, DEng. – Head of Engine Testing Laboratory at Automotive Research and Development Institute BOSMAL in Bielsko-Biała.

*dr inż. Andrzej Suhecki – kierownik Pracowni Badań Stanowiskowych Silników w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o. w Bielsku Białej*



Mr Jacek Nowakowski, DSc., DEng. – Professor Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science at Technical University of Bielsko-Biała.

*dr hab. inż. Jacek Nowakowski – profesor na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.*



Mr Tomasz Knefel, DSc., DEng. – doctor at the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science at Technical University of Bielsko-Biała.

*dr hab. inż. Tomasz Knefel – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.*



Mr Józef Sochacki M.Sc. – specialist at Automotive Research and Development Institute BOSMAL in Bielsko-Biała.

*mgr inż. Józef Sochacki – specjalista w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o. w Bielsku Białej.*