

WPŁYW OBRÓBKI TULEI CYLINDROWEJ TURBODOŁADOWANEGO SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM NA EMISJĘ ZWIĄZKÓW SZKODLIWYCH

JERZY MERKISZ¹, MACIEJ BAJERLEIN², MAREK ŚLĘZAK³, ANDRZEJ SUCHECKI⁴

Politechnika Poznańska, Przemysłowy Instytut Motoryzacji, BOSMAL

Streszczenie

Instytut Silników Spalinowych i Transportu we współpracy z Instytutem Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL pracuje nad analizą zużycia oleju w aspekcie emisji związków toksycznych. Złożone w poprzednich latach, tendencje w konstrukcji silników spalinowych zostały ograniczone przepisami prawa dotyczącymi zarówno toksyczny związek i emisji CO₂. W efekcie, producenci silników spalinowych opracowali szereg udoskonaleń nie tylko w celu poprawy spalania, ale także zmniejszenia zużycia oleju. Poziom zużycia oleju w rzeczywistości, jest traktowany jako kryterium oceny zaawansowania silnika. Zapewnia również o poprawności wyprodukowania silnika, co więcej, oznacza to, że praca silnika spełnia normy. Artykuł zawiera opis tulei honowanych konwencjonalnie i laserowo. Ponadto prezentuje wyniki badań prowadzonych w celu określenia wpływu tulei cylindrowych na zużycie paliwa, jak również emisję związków toksycznych. Badania przeprowadzono na turbodoładowanym silniku wysoko-
prężnym z Common Rail. Pomiar zużycia zostały przeprowadzone z wykorzystaniem urządzeń AVL. Obecnie dalsze i bardziej szczegółowe badania prowadzone są tak, aby dokładnie zbadać korelację między cylindrem, zużyciem oleju oraz emisją.

Słowa kluczowe: zużycie oleju, honowanie, tuleje, silnik z zapłonem samoczynnym

1. Wprowadzenie

1.1. Obróbka tulei metodą tradycyjną

Tradycyjna mechaniczna obróbka tulei cylindrowych odbywa się w kilku etapach:

- wytaczanie wstępne,

¹ Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: jerzy.merkisz@put.poznan.pl

² Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: maciej.bajerlein@put.poznan.pl

³ Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa, e-mail: m.slezak@pimot.org.pl, tel. 22 777 70 12

⁴ Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL, ul. Sarni Stok 93, 43-300 Bielsko-Biała, e-mail: andrzej.suchECKI@bosmal.com.pl, tel. 33 813 05 40

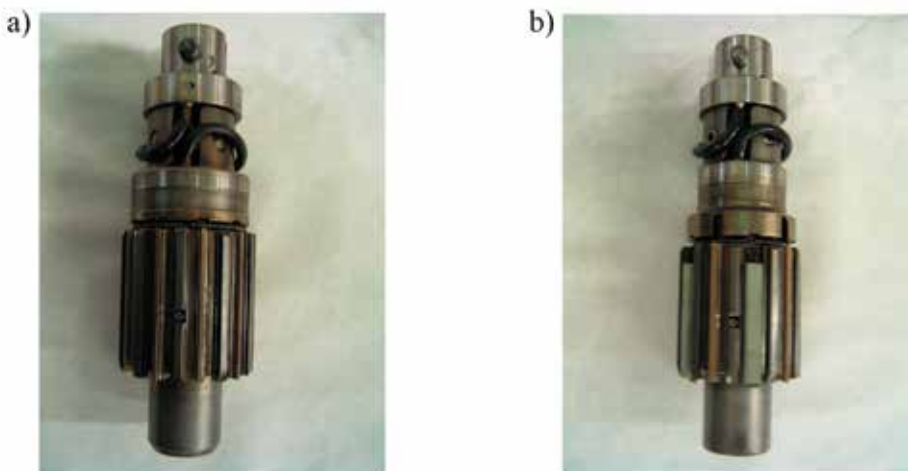
- wytaczanie końcowe (z pozostawieniem naddatku materiału około 0,07 mm na honowanie),
- honowanie.

Wytaczanie wstępne i końcowe odbywa się na wysoko precyzyjnych wytaczarkach pozwalających uzyskać bardzo dobre parametry obróbcze. Wytaczanie końcowe ma za zadanie uzyskania właściwej geometrii tulei cylindrowej i wymiaru średnicy, z pozostawieniem naddatku materiału około 0,07 mm na honowanie.

Honowanie (tak zwane „szlifowanie krzyżowe”) cylindrów wykonywane jest na honownicy sterowanej komputerem przy użyciu głowic wyposażonych w płytki diamentowe i ceramiczne. Celem honowania jest uzyskanie końcowej geometrii tulei oraz optymalnej chropowatości i struktury powierzchni. Szlifowanie krzyżowe polega na prowadzeniu głowicy honującej w ruchu obrotowym i jednocześnie posuwisto-zwrotnym.

Honowanie wykonywane jest również w kilku etapach:

- honowanie podstawowe. W etapie tym następuje dokładna obróbka tulei poprzez zeszlifowanie naddatku materiału o około 0,05 mm za pomocą głowicy z płytkami diamentowymi (rys. 1 a)
- honowanie wykańczające. Następuje dalsze zeszlifowanie materiału przy pomocy głowicy z płytkami diamentowymi o około 0,018 mm, połączone z tworzeniem rys („szlifowanie krzyżowe”). Rysy tworzone są dzięki temu, że z płytek wystają bardzo twarde kawałki diamentu.
- obróbka końcowa. Ostatni etap w którym struktura chropowatości powierzchni uzyskuje ostateczny kształt, poprzez zeszlifowanie materiału tulei o około 0,002 mm za pomocą głowicy z płytkami ceramicznymi. W etapie tym zostają usunięte tylko maksymalne wierzchołki chropowatości w celu przyspieszenia procesu docierania



Rys.1. Głowica do honowania podstawowego z płytkami diamentowymi i głowica do honowania wykańczającego płytkami diamentowymi i ceramicznymi



Rys.2. Powierzchnia tulei cylindrowej po honowaniu (powiększenie 100)

silnika. Często honowanie wykańczające i obróbka końcowa wykonywane są za pomocą jednej głowicy wyposażonej w płytki diamentowe i ceramiczne (rys. 1 b). Ma to na celu przyspieszenie procesu honowania w produkcji wielkoseryjnej.

W wyniku tych operacji na powierzchni tulei powstają rysy krzyżujące się pod kątem około $44^{\circ} \div 64^{\circ}$. Na rysunku 2 przedstawiono fotografie powierzchni po obróbce honowania.

Cele obróbki są następujące:

- wymiary geometryczne tulei zgodne z rysunkiem konstrukcyjnym,
- struktura powierzchni zapewniająca zatrzymanie odpowiedniej ilości oleju w celu zmniejszenia tarcia pierścieni o tuleję cylindrową,
- odpowiedni profil chropowatości umożliwiający prawidłowe dopasowanie się pierścieni tłokowych do tulei (dotarcie się),
- odpowiedni naddatek metalu na zużycie w trakcie eksploatacji silnika.

1.2. Obróbka tulei metodą laserową

Nowoczesne technologie obróbki tulei cylindrowych są połączeniem obróbki konwencjonalnej i laserowej i przewidują następujące operacje:

- honowanie podstawowe i wykańczające wykonany w sposób tradycyjny opisany w punkcie 1.1.
- obróbka laserowa (np. wypalanie wąskich, głębokich rowków (zasobników oleju) w górnej części tulei cylindrowej),
- obróbka końcowa mająca na celu usunięcie nadtopionych warstw materiału (osadów i wypływek) powstałych w wyniku wypalania laserem rowków.

Adaptacja honowania laserowego do linii technologicznych w przemyśle motoryzacyjnym jest równie łatwa jak innych urządzeń obróbkowych. Głowica laserowa jest montowana do wrzeciona przesuwającego się w ruchu obrotowym i posuwisto-zwrotnym.



Rys.3. Głowica laserowa w trakcie wykonywania zasobników oleju w górnej części tulei cylindrowej [3]

Całość procesu obróbkowego odbywa się w cyklu sterowanym numerycznie. Wysoka energia promieniowania laserowego kierowana jest na obrabianą powierzchnię tulei cylindrowej. Częściowo jest odbijana i pochłaniana przez materiał tulei. Energia pochłonięta jest tak duża, że powoduje podgrzanie materiału do stanu lotnego i następuje wypalenie określonego rowka. Głębokość rowków zazwyczaj wynosi od 20 do 60 mikronów, a szerokość od 40 do 90 mikronów (rys. 4).

Ilość wypalanego materiału uzależniona jest od parametrów promieniowania takich jak:

- częstotliwość impulsów,
- moc,
- rodzaj promieniowania,
- szybkość posuwu głowicy laserowej.



Rys.4. Tuleja cylindrowa z widocznymi rowkami wykonanymi za pomocą lasera

Proces wypalania trwa zazwyczaj od 9 do 15 sekund na jeden cylinder. W wyniku dużego gradientu temperatury oraz bardzo skupionej wiązki promieniowania o dużej mocy, oddziaływanie promieniowania na materiał tulei jest ograniczony do niewielkiej powierzchni, a całkowity wzrost temperatury obrabianej tulei jest nieznaczny. Dzięki temu następuje zahartowanie materiału w okolicy wypalanego rowka i wzrost twardości.

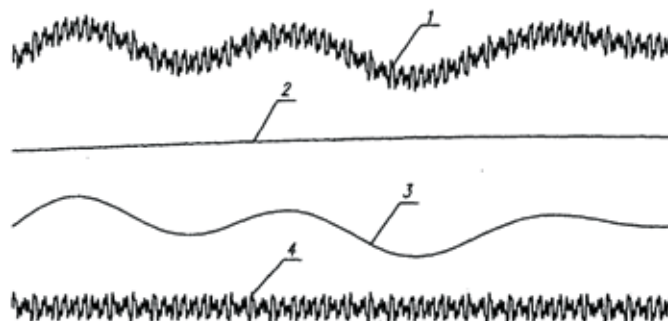
Zalety obróbki laserowej są następujące:

- tworzenie głębokich wąskich rowków (zasobników oleju) na powierzchni tulei w celu zatrzymywania oleju,
- tworzenie twardej struktury wokół rowków co ma znaczny wpływ na zużycie tulei cylindrowej i pierścieni tłokowych,
- otrzymanie bardzo dobrych właściwości poślizgowych i nośności podłoża,
- precyzyjne kontrolowanie procesu obróbkowego,
- eliminację wpływu zużycia narzędzia obróbkowego.

2. Metodyka kontroli powierzchni tulei po honowaniu

Do kontroli powierzchni tulei po honowaniu wykorzystuje się profil poprzeczny. Z profilu tego można wyodrębnić profil kształtu, profil falistości i profil chropowatości (patrz rys. 5). W dalszej części tego opracowania zajmiemy się tylko analizą profilu chropowatości i falistości powierzchni stosowane obecnie w produkcji technologii obróbki zapewniają w stopniu zadawalającym powtarzalność i zgodność produkcji z dokumentacją konstrukcyjną w zakresie kształtu powierzchni.

Wadami mechanicznej obróbki tulei są nieregularności w wielkości i rozmieszczeniu ziaren na płytkach diamentowych służących do honowania, co wprowadza nieprawidłowości w kształcie chropowatości. Pojawiają się również błędy w przebiegu drogi narzędzia, szczególnie w miejscach skrajnych w ruchu posuwisto-zwrotnym. Szczególnie niekorzystne



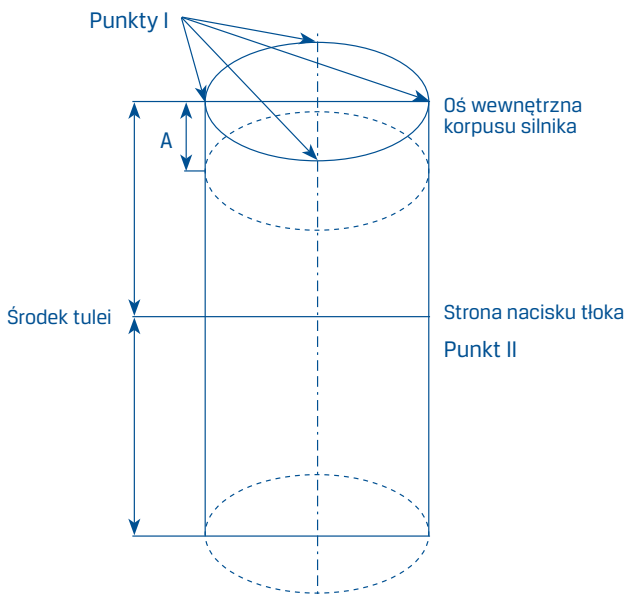
Rys.5. Podział profilu powierzchni (1) na profil kształtu (2), falistości (3) i chropowatości (4)

są poziome rysy w górnej części tulei cylindrowej. Rysy takie mają wpływ na wzrost zużycia oleju w silniku, gdyż występuje wtedy zjawisko tzw. „pompowania oleju” do komory spalania.

Ocena chropowatości powierzchni honowanych jest złożona i wymaga zastosowania skomplikowanych metod.

W związku z powyższym w procesie technologicznym przeprowadzane są specjalne pomiary kontrolne powierzchni tulei po obróbce. Pomiary te prowadzone są według norm państwowych i międzynarodowych takich jak DIN EN ISO 4287, ASME B46.1, DIN EN ISO 13565-1 i 13565-2, EN 10049. Na podstawie tych norm firmy produkujące silniki opracowują i wydają swoje normy wewnętrzne (np. norma FIAT 1.00103/01).

Pomiary chropowatości prowadzone są w wyznaczonych miejscach tulei (rys. 6.) na odcinkach pomiarowych (ln) przy pomocy specjalnych przyrządów pomiarowych. Przyrządy te muszą umożliwiać pomiar wzniesień i zagłębień na powierzchni tulei z dokładnością 0.01 μm oraz rejestrację profilu chropowatości za pomocą specjalnego programu komputerowego eliminującego ewentualne błędy pomiarowe i szумы. Program ten musi umożliwiać przeprowadzenie analizy profilu chropowatości w celu wyznaczenia wymaganych parametrów charakteryzujących profil jak również musi umożliwiać wykreślenie krzywej Abbott'a.



Rys. 6. Miejsca pomiaru chropowatości na tulei cylindrowej

Punkty I – 4 punkty w odstępach 90° w strefie w pobliżu pierwszego pierścienia uszczelniającego (A) – pomiary wykonywane w trakcie ustawiania parametrów maszyny na linii produkcyjnej i w trakcie badań bardziej szczegółowych.

Punkt II – w środku tulei po stronie parcia tłoka – pomiar wykonywany na bieżąco w celu kontroli produkcji.

Zazwyczaj stosowane są dwie różne metody kontroli:

Metoda pierwsza stosowana jest w specjalnym Laboratorium Pomiarowym i polega na określeniu, w co najmniej czterech punktach tulei cylindrowej (na odpowiedniej wysokości) charakterystyk chropowatości i stanu powierzchni.

Metoda druga stosowana jest na linii obróbczej gdzie oceniana jest prawidłowość obróbki honowania i dokonywany przegląd zdolności procesu. W tej metodzie kontrolowane są wszystkie bądź tylko wybrane charakterystyki honowania wymienione w metodzie pierwszej. Pomiar wykonuje się z reguły tylko w jednym określonym (reprezentatywnym) miejscu tulei.

- **Ocena powierzchni nośnej**

W ramach oceny powierzchni nośnej wykonuje się następujące analizy:

- sprawdzenie wyglądu powierzchni metodą fax-film,
- sprawdzenie wyglądu powierzchni przez bezpośrednie oględziny optyczne,
- badania mikrograficzne.

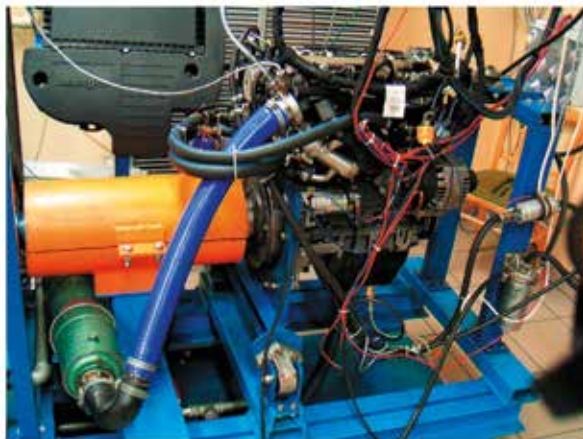
- **Określenie kąta krzyżowania się rys po honowaniu**

Kąt krzyżowania się rys po honowaniu powinien zawierać się w granicach $44^{\circ} \div 64^{\circ}$.

Wykończenie powierzchni cylindrowej zgodnie z założeniami konstrukcyjnymi pozwala na zmniejszenie zużycia oleju nawet o 50% w stosunku do obróbek występujących w praktyce produkcji wielkoseryjnej.

3. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na stanowisku silnikowym Politechniki Poznańskiej wyposażonym w silnik z tulejami cylindrowymi obrobioną metodą laserową oraz w silnik, w którym

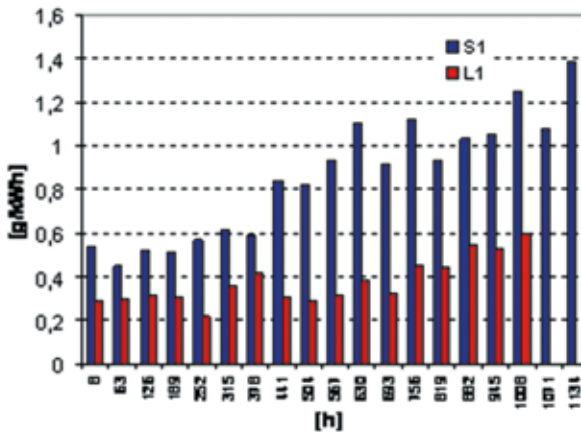


Rys.7. Silnik zamontowany na stanowisku hamulcowym

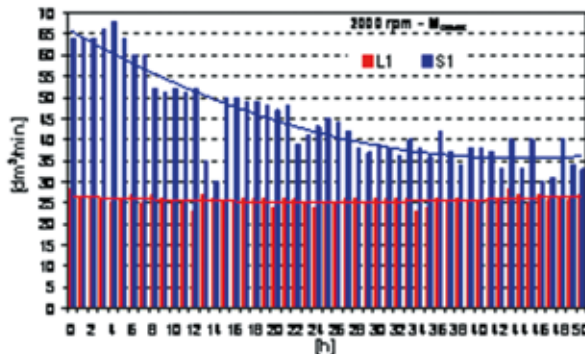
tuleje cylindrowe były obrabione metodą tradycyjną. Badania prowadzono na hamowni silnikowej na silnikach o zapłonie samoczynnym z turbodoładowaniem, zasilanym w systemie Common Rail. Silniki wyposażone były w korpusy, których tuleje cylindrowe obrabione zostały tradycyjną metodą honowania jak również w korpusy których końcowe operacje obróbkowe wykonano metodą laserową.

4. Wyniki pomiarów

Rysunek 8 pokazuje średnie zużycie oleju podczas badań funkcjonalnych silników. Konstruktywna analiza para-metrów oznacza, że silnik z tulejami honowanymi laserowo zużywa 40-80% mniej leju silnikowego w trakcie całego badania niż silnik z wyposażony w tuleje konwencjonalne. Inną korzyścią silnika z tulejami laserowymi są znacznie mniejsze



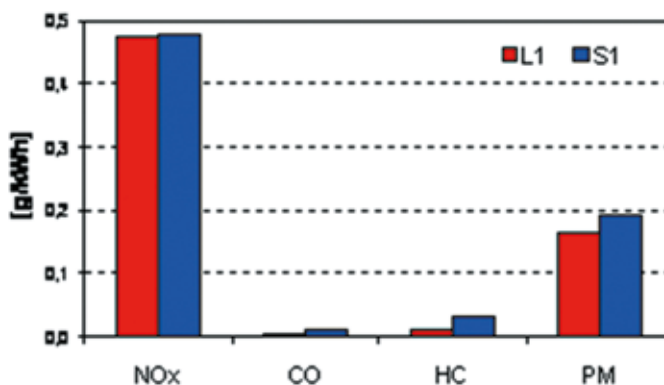
Rys.8. Zużycie oleju, S1 - silnik z mechaniczną obróbką powierzchni cylindra, L1 silnik z laserową obróbką powierzchni cylindra



Rys.9. Przedmuchy ze skrzyni korbowej, S1 - silnik z mechaniczną obróbką powierzchni cylindra, L1 silnik z laserową obróbką powierzchni cylindra

przedmuchy. W przypadku silnika z konwencjonalnie traktowanymi tulejami cylindrowymi staje się całkiem jasne, że przedmuchy obniżają się zdecydowanie po okresie ok. 23 godzin (rys. 9). Małe przedmuchy do skrzyni korbowej i niskie zużycie oleju są wynikiem szczelności tłoka, pierścieni tłokowych i montażem cylindra.

Na rys. 10 przedstawiono wyniki pomiarów emisji związków toksycznych spalin (CO, HC, NO_x, PM) w teście ESC. W silniku z tulejami honowanymi laserowo, emisji PM i HC drastycznie spadła, natomiast emisja CO i NO_x prawie nie uległ zmianie. Ograniczone przenikanie oleju do komory spalania pozwoliło zaobserwować obniżenie emisji HC, oraz niższą emisję PM, która była spowodowana niższą masą frakcyjną węglowodorów. Niższa emisja PM może być również wynikiem mniejszej ilości powstawania sadzy w wyniku niecałkowitego i niepełnego spalania ciężkich frakcji węglowodorów zawartych w oleju smarującym, którego przenikanie do komory spalania było utrudnione.



Rys.10. Emisja związków toksycznych, S1 - silnik z mechaniczną obróbką powierzchni cylindra, L1 silnik z laserową obróbką powierzchni cylindra

5. Wnioski

Przedstawiona metoda obróbki powierzchni cylindra, wykazuje znaczące różnicę pomiędzy konwencjonalnym honowaniem cylindra, a laserowym w celu spełnienia wymogów ekologicznych i wydłużenia cyklu pracy silnika. Wyniki badań silnika niewątpliwie pokazują korzyści płynące dla silnika, którego tuleje były honowane laserem. Tuleje cylindrowe wykazują większą szczelność tłoka, pierścieni tłokowych, mniejsze zużycie oleju, a w konsekwencji emisję związków toksycznych. Korzyści laserowego honowania powierzchni są następujące:

- zmniejszenie zużycia oleju o około 40%,
- zmniejszenie w silnikach ZS emisji cząstek stałych PM od 10 do 30%,
- zmniejszenie emisji węglowodorów (HC) o około 20%,
- znaczna poprawa szczelności pierścieni tłokowych,
- przedłużenie trwałości pierścieni tłokowych i tulei o około 50%.

Literatura

- [1] Wniosek: Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (...), zmieniające dyrektywę 72/306/EWG i dyrektywę .../.../WE (...) {SEC(2005) 1745}
- [2] BERGMANN H.W., BRANDENSTEIN C., LANG A., LINDNER H., QUEITSCH R., STENGEL E.: *UV-Laserbelichtung von Grauguß Zylinderlaufbahnen von Verbrennungskraftmaschinen*, VDI-Berichte nr 1764, 2003
- [3] Dyrektywa 2005/55/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z 28.09.2005.
- [4] HILL S.H.: *Cylinder Bore Finishes and Their Effect on Oil Consumption*, Perfect Circle Div. of Dana Corp., 2001-01-33550
- [5] KLINK U.: *Laserhonen für Zylinderlaufbahnen*, MTZ 58(1997)9
- [6] KOZACZEWSKI W.: *Konstrukcja grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych*, WKŁ Warszawa, 2004.
- [7] ISO 13565-2 *Struktura geometryczna powierzchni; metoda profilowa powierzchni o warstwowych właściwościach funkcjonalnych*, PKN 1999.
- [8] LENTHAL J.S.: *Cylinder Bore Surface Finish, its Evolution and Specification*. The Tribology of Internal Combustion Engines, University of Birmingham, 1996.
- [9] Gehring GmbH&Co. KG. *Laserstrukturierung-Vebesserung der Tribologischen Eigenschaften von Oberflächen*, 2004.
- [10] MERKISZ J.: *Zużycie oleju w szybkoobrotowych silnikach spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 1994.