

NAPADŁEK Wojciech, PSZCZÓŁKOWSKI Józef, WOŹNIAK Adam

METODYKA OCENY ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE ZMODYFIKOWANYCH LASEROWO ELEMENTÓW SILNIKA

Streszczenie

Przedstawiono metodykę badań i oceny trwałości (odporności na zużycie) zmodyfikowanych laserowo elementów silnika samochodu Fiat 126p. Modyfikacja laserowa silnika polegała na wytworzeniu na elementach skojarzenia T-P-C mikrozasobników olejowych, zapewniających stały wpływ oleju na warunki tarcia w tym skojarzeniu. Dokonano wyboru metody badawczej zużycia podczas rozruchu silnika w niskiej temperaturze otoczenia. Scharakteryzowano stanowisko badawcze w komorze niskiej temperatury oraz warunki realizacji badań. Przedstawiono także wyniki badań wstępnych i wynikające z nich wnioski.

WSTĘP

Odporność na zużycie elementów skojarzenia T-P-C decyduje o eksploatacyjnej trwałości tłokowego silnika spalinowego. Dlatego podejmowane są prace badawcze, projektowe, technologiczne a także eksploatacyjne, mające na celu poprawę właściwości skojarzenia, także zmianę warunków jego funkcjonowania. Jednym z możliwych działań w tym zakresie jest modyfikacja laserowa elementów skojarzenia T-P-C silnika, polegająca na wytworzeniu na ich powierzchni mikrozasobników olejowych, zapewniających długotrwałą obecność oleju w skojarzeniu i jego wpływ na warunki tarcia. Jako tryb weryfikacji osiągnięcia założonego celu wybrano badania zużyciowe, realizowane w warunkach rozruchu silnika w niskiej temperaturze.

Badania rozruchowe silników w niskiej temperaturze stanowią wyodrębnioną dziedzinę badawczą i charakteryzują się istotną specyfiką, także w zakresie badania zużycia. Problematyka rozruchu silników ma także ważny aspekt użytkowy w zakresie poprawy właściwości rozruchowych oraz funkcjonowania i utrzymania stanu zdatności silników. Można tu wskazać takie obszary badawcze jak:

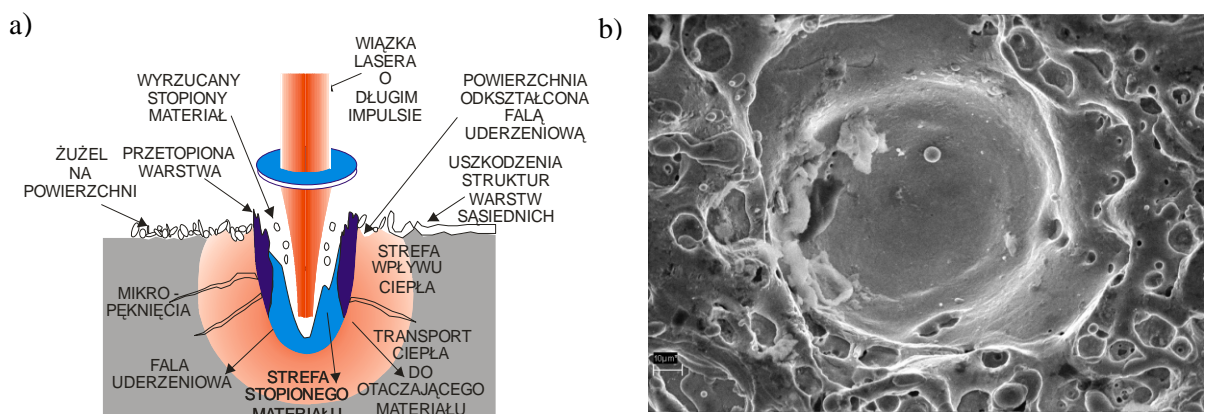
- badania właściwości rozruchowych silników, w tym wspomaganie rozruchu, ze szczególnym uwzględnieniem badania procesów roboczych prowadzących do wytworzenia i zapłonu mieszanki palnej, jej spalania i emisji spalin,
- badania regulacyjnych charakterystyk rozruchowych silników i optymalizacji parametrów dla warunków rozruchu,
- badania procesów tarcia w węzłach kinematycznych silnika podczas jego rozruchu (momentu oporu) oraz procesów zużywania zachodzących w tych węzłach,
- badania nad wykorzystaniem parametrów rozruchu, jako sygnałów diagnostycznych do oceny stanu silnika spalinowego (natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik).

W kontekście planowanych badań szczególne znaczenie ma aspekt rozruchowego zużycia silników. Wybór tej metody badawczej jest przede wszystkim uzasadniony znanym faktem dużego rozruchowego zużycia silników, zwłaszcza w niskiej temperaturze otoczenia.

1. CECHY POWIERZCHNI MODYFIKOWANEJ LASEROWO

Modyfikacja laserowa powierzchni (warstwy wierzchniej) elementów maszyn polega na wytworzeniu na niej za pomocą promieniowania laserowego mikrozasobników olejowych. Ich zadaniem jest zatrzymywanie oleju w węźle tribologicznym maszyny, a przez to wpływanie na warunki tarcia i zużycia. Technologia ablacyjnej mikroobróbki laserowej może być także zastosowana do wytworzenia na elementach silnika mikro- i nanostruktur w warstwie wierzchniej, poprzez oddziaływanie plazmy laserowej i wysokiego ciśnienia. Proces ablacji laserowej wymuszają szybkozmienne impulsy laserowe o częstotliwości repetycji np. od 1 do 500 kHz, powodujące rozdrobnienie mikrostruktury oraz ultraszybkie przemiany fazowe. W warstwie wierzchniej mogą zostać wytworzone cienkie mikrowarstwy amorficzne (szkliste) o prawdopodobnie bardzo wysokich walorach technologicznych, nieosiągalne innymi nowoczesnymi technologiami inżynierii powierzchni. Procesy modyfikacji laserowej pozwalają na precyzyjne kształtowanie mikrozasobników smarowych w newralgicznych strefach węzłów tribologicznych występujących w elementach maszyn [6], również silników spalinowych. Jedną z zalet tej technologii jest bardzo mała strefa wpływu ciepła, a zatem mały wpływ obróbki na deformację elementu maszyny – jego naprężenia własne.

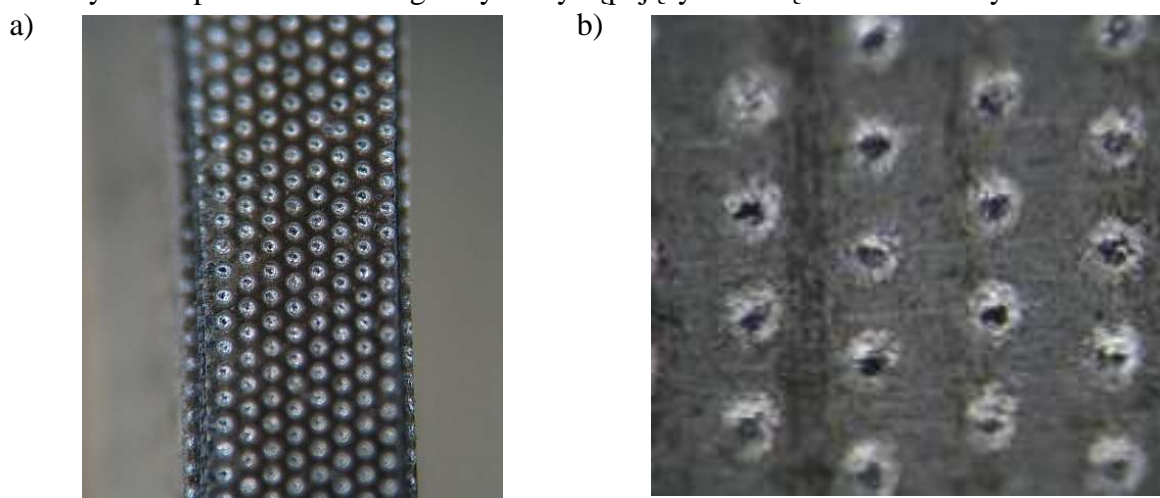
Aby wystąpiło zjawisko tzw. „zimnej ablacji” należy zastosować bardzo dużą gęstość mocy (MW/GW) oraz bardzo krótki czas naświetlania (ekspozycji promieniowania), np. piko- lub femtosekundowy. W takich warunkach warstwa wierzchnia materiału praktycznie przechodzi w stan pary (zjawisko sublimacji). Stosując bardzo dużą gęstość mocy oraz dłuższy czas naświetlania promieniowaniem laserowym warstwy wierzchniej (od nano- do milisekund) nie uzyskuje się „zimnej ablacji”, lecz „ablację z efektem termicznym”. W tym procesie w wyniku oddziaływania promieniowania laserowego następuje zjawisko absorpcji, następnie powstaje plazma laserowa z jednoczesnym nagrzewaniem materiału, jego topnienie i częściowe odparowanie. Generowana jest także fala ciśnienia, która powoduje m.in. ekstruzję ciekłego materiału wokół wytwarzanego mikrozasobnika smarowego (rys. 1).



Rys. 1. Ablacyjna mikroobróbka materiału za pomocą długich impulsów laserowych ($10^{-6} \div 10^{-8}$ s): a) schemat poglądowy, b) mikrozasobnik olejowy na gładzi tulei cylindrowej (stal 41CrAlMo7 azotowana jarzeniowo) [3]

Ablacyjne teksturowanie laserowe może być stosowane przed obróbką mechaniczną półwykańczającą (np. szlifowanie) lub przed ostateczną obróbką wykańczającą (np. polerowanie). Bardzo istotny jest układ mikrotekstur, tj. mikrozasobników smarowych

wytworzonych na powierzchni elementów maszyn, ponieważ wpływa decydująco na jakość i intensywność procesów tribologicznych występujących w węzłach tarcia – rys. 2.



Rys. 2. Układ mikrozasobników olejowych na powierzchni czołowej pierścienia tłokowego uszczelniającego: a) pow. 12x, b) pow. 150x [opracowanie własne]

Do ablacyjnego teksturowania laserowego WW należy właściwie dobrać rodzaj, gęstość mocy promieniowania, kształt impulsu, modowość wiązki, czas ekspozycji promieniowania, częstotliwość repetycji oraz stereometrię teksturowania (stopień przykrycia powierzchni przez impulsy laserowe lub wiązkę o działaniu ciągłym). Projektując proces technologiczny należy założyć, czy ma on być ostateczny, czy też nastąpi po nim powierzchniowa obróbka wykańczająca, np. szlifowanie, polerowanie. Jeśli zakładamy wariant pierwszy, w procesie nie powinny wystąpić mikrowypłytki wokół wytworzonych mikrozasobników. Jeśli zastosujemy pierwszą harmoniczną impulsowego promieniowania laserowego $\lambda = 1064$ nm oraz dłuższy czas naświetlania np. od kilku do kilkudziesięciu i więcej nanosekund, to praktycznie zawsze wystąpi wokół mikrozasobnika również mikrowypłytką. Jej wysokość może wynosić od kilku dziesiątych do nawet kilkudziesięciu i więcej mikrometrów.

Zastosowanie technologii ablacyjnej mikroobróbki laserowej węzłów tarcia pozwala na gromadzenie w mikrozasobnikach środka smarnego (oleju), skuteczniejsze rozdzielanie par trących, a tym samym istotne zmniejszenie sił tarcia. Skutkiem jest zwiększenie trwałości elementów maszyn oraz ich sprawności technicznej. Zastosowanie tej technologii w wielu węzłach tarcia w silniku spalinowym powinno być racjonalne i celowe. W ramach realizowanego przez autorów projektu badawczego [4] (i innych) uzyskano obiecujące wyniki technologiczne dla elementów silnika spalinowego pracujących w ruchu posuwisto-zwrotnym (np. tłoki, pierścienie tłokowe, zawory, popychacze), jak również w ruchu obrotowym, tj. czopy wałów korbowych i rozrządu – łożyska ślizgowe. Elementy te pracują przy dużych, zmiennych obciążeniach, co powoduje przyspieszone zużywanie. Modyfikacja warstwy wierzchniej skojarzenia T-P-C spowoduje, że olej silnikowy będzie smarował i uszczelniał skojarzenie od chwili rozruchu.

2. CHARAKTERYSTYKA ZUŻYCIA ROZRUCHOWEGO SILNIKÓW

Przy analizie właściwości rozruchowych silnika, ale także i jego procesów zużycia w przypadku modyfikacji laserowej skojarzenia T-P-C ważna jest znajomość czynników wpływających na wartość rozruchowego momentu oporu. Na moment oporu kompletnego silnika składają się straty tarcia powstające w głównych jego skojarzeniach tribologicznych, do których zalicza się [2]:

- układ korbowo-tłokowy: opory tarcia łożysk wału korbowego, korbowodów oraz tarcia tłoków i pierścieni tłokowych o powierzchnię cylindrów,
- układ rozrządu,
- urządzenia pomocnicze – układ zasilania paliwem, pompa oleju, pompa cieczy chłodzącej, wentylator, prądnica, sprężarka powietrza,
- pozostałe: np. opory przepływowe i sprężania ładunku.

Udziały oporów poszczególnych układów silnika w jego oporze całkowitym są istotnie zależne od prędkości obrotowej wału silnika, stopnia sprężania, temperatury (lepkości) oleju i cieczy chłodzącej, przy tym brak jest jednoznacznej oceny ich udziału. Dla silnika 359 w przedziale temperatury 253÷273 K udziały procentowe oporów rozruchu wynoszą [2]: udział oporów sprężania i napędu rozrządu zmienia się w zakresie 14÷28%, a tarcia pierścieni jest stała i wynosi około 25%. Przy zmianie warunków tarcia skojarzenia T-P-C należy oczekiwać zmiany udziału tych składowych, a także intensywności zużywania skojarzenia.

Bezspornie przyczyną zwiększonego rozruchowego zużycia zespołu tłok-cylinder jest niedostateczne lub brak smarowania cylindrów podczas rozruchu i w początkowej fazie nagrzewania. Trwałość pozostającej po poprzedniej pracy silnika warstewki jest równa około dwie doby. Dłuższa przerwa w pracy silnika powoduje procesy korozji na powierzchni cylindrów. Zużycie zespołu tłok-cylinder wzrasta wówczas zarówno w wyniku procesów korozji jak też ściernego działania jej produktów [7]. Na ogół nie obserwuje się zwiększonego zużycia łożysk i czopów wału korbowego. Najczęściej używanym miernikiem tego zużycia jest ekwiwalent zużycia powstającego w warunkach eksploatacji lub badań stanowiskowych silników. Najczęściej przyjmuje się, że jeden rozruch silnika w temperaturze 273 K do 253 K jest równoważny 150 ÷ 200 km przebiegu samochodu lub 2 ÷ 3 h pracy silnika. Oceny skrajne ekwiwalentu zużycia rozruchowego zawierają się od kilkunastu km do kilku tysięcy km przebiegu pojazdu. Można przy tym wyróżnić wiele czynników, od których wartość zużycia rozruchowego jest zależna. Należą do nich [7]:

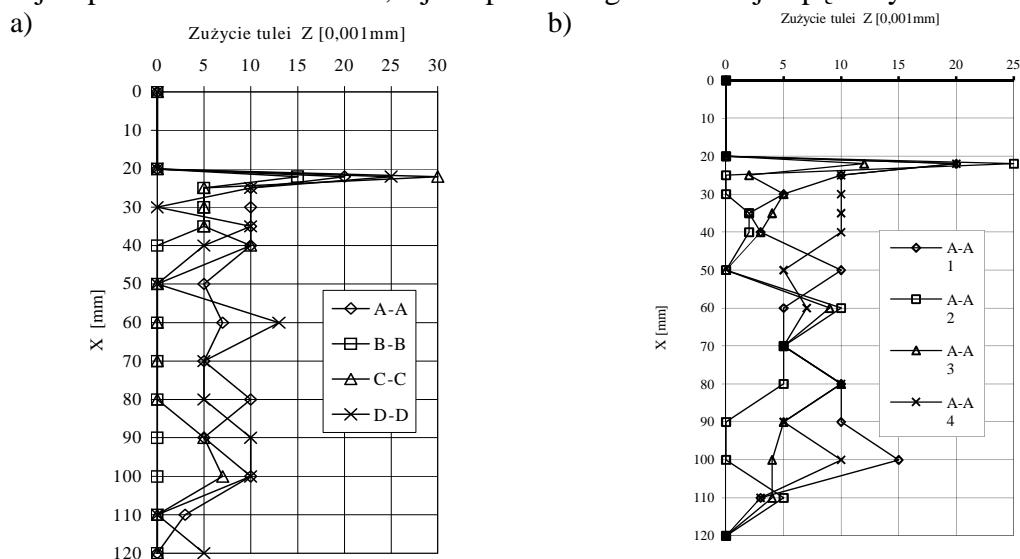
- warunki eksploatacyjne (realizacji rozruchu), m.in.: stan cieplny silnika, długotrwałość przerwy w pracy, grubość i wytrzymałość warstewki oleju, warunki wygrzewania,
- właściwości oleju i paliwa: lepkościowo-temperaturowe i przeciwzużyciowe właściwości oleju, skład frakcyjny i grupowy oraz zawartość siarki w paliwie,
- właściwości konstrukcyjne silnika: systemu rozruchu (determinujące czas rozruchu), układu smarowania, przeciwzużyciowe właściwości materiałów pary cylinder-tłok.

Brak jest jednoznacznej oceny, który z mechanizmów zużycia ma dominujące znaczenie w warunkach rozruchu. Szczególne znaczenie dla określenia mechanizmów zużycia jak też jego intensywności mają wyniki badań przedstawione w pracy [7]. Stwierdzono, że zużycie rozruchowe jest wynikiem mechanicznego oddziaływania powierzchni powodującego zwiększenie chropowatości. Dotarcie chropowatości jest możliwe podczas wygrzewania silnika. Przy jego niedostatecznym wygrzewaniu wielkości ekwiwalentnego zużycia rozruchowego, w zależności od temperatury, mogą być 5 ÷ 11 razy większe. Przyczyną uzyskiwania dużych wartości ekwiwalentnego zużycia rozruchowego może być realizacja badań według metodyki nie przewidującej docierania chropowatości. Badania metalograficzne powierzchni cylindrów pozwoliły na stwierdzenie, że w okresie rozruchu silnika dominuje zużycie ściernie, o czym świadczą charakterystyczne uszkodzenia powierzchni.

Występuje także pogląd, że istotne jest elektrochemiczne zużycie korozyjne. Rozwój procesów korozyjnych zależy od kondensacji pary wodnej na powierzchniach cylindrów i zawartości tlenków siarki w spalinach.

Na rys. 3 przedstawiono wyniki badań rozruchowego zużycia tulei cylindrowych silnika AD4.236 [5]. Przy użyciu tego silnika, po wstępnym jego dotarciu, przeprowadzono ok. 200 prób rozruchu w zakresie temperatury otoczenia od 0 do -25°C (głównie -10 do -15°C). Po uruchomieniu silnik nagrzewano przy stałej prędkości obrotowej 1800 obr./min podczas

pracy bez obciążenia przez okres ok. 0,5 h. W układzie smarowania silnika stosowano głównie olej Superol CC SAE 15W/40, a jako paliwo – głównie olej napędowy IZ 40.



Rys. 3. Charakterystyka zużycia rozruchowego cylindrów silnika A4.236: a) gładzi cylindra czwartego w czterech kierunkach, b) tulei kolejnych cylindrów w przekroju A–A (prostopadłym do osi wzdłużnej silnika) [5]

Dany rodzaj zużycia tribologicznego zachodzi w określonych warunkach i powoduje typowe zmiany stanu warstwy wierzchniej. Ruch posuwisto-zwrotny tłoka, jak też kształt powierzchni trących pierścieni, uniemożliwia utworzenie trwałego klina smarnego w rozpatrywanym skojarzeniu. W strefie zwrotu zewnętrznego wskutek zmniejszenia prędkości tarcia do zera zanika klin smarny. Występuje tarcie mieszane lub graniczne. W położeniu GMP tłoka występują więc odpowiednie warunki do wystąpienia głównie zużycia przez szepianie (adhezyjne I rodzaju). W niższych strefach tulei występują wyższe prędkości przemieszczania tłoka i niższe wartości temperatury cylindra (podczas nagrzewania), a więc może tutaj wystąpić smarowanie płynne (klin smarny) pomiędzy powierzchnią pierścieni i tłoka a tuleją cylindra – dlatego zużycia są mniejsze.

3. METODYKA BADAŃ SILNIKA Z MIKROZASOBNIKAMI OLEJU

Ustalenie metodyki badań wpływu modyfikacji laserowej powierzchni elementów skojarzenia T-P-C polegającej na wytworzeniu za pomocą promieniowania laserowego mikrozasobników olejowych nastąpiło na podstawie analizy:

- właściwości powierzchni z wytworzonymi mikrozasobnikami i ich roli w zakresie kształtowania warunków współpracy elementów w węźle tribologicznym,
- charakterystyki procesów i mechanizmów zużycia rozruchowego analizowanego skojarzenia,
- ogólnej metodyki badań rozruchowych silników ze szczególnym uwzględnieniem badań o charakterze trwałościowym w warunkach rozruchu,
- uzyskanych doświadczeń i wyników badań wstępnych przeprowadzonych w warunkach „zimnych rozruchów” silnika 126 A2.

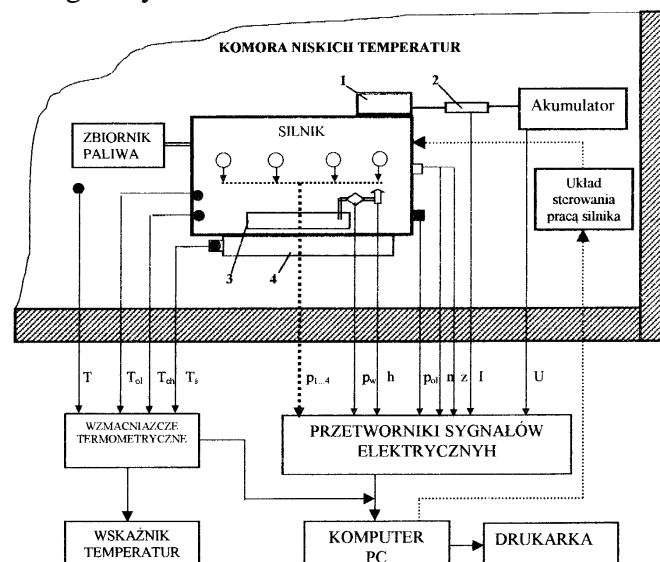
Istnieje szereg aspektów metodyki badania silnika w warunkach niskiej temperatury, których ustalenie może w istotny sposób wpływać zarówno na zakres możliwości wnioskowania, jak też na uzyskane wyniki. Badania będą realizowane w warunkach komory niskich temperatur. Podstawową zaletą umieszczenia silnika na stanowisku badawczym

w komorze jest możliwość skutecznego sterowania planem realizacji i warunkami badań, szczególnie ustalenia temperatury badania i utrzymywanie jej wartości z wymaganą dokładnością. Zapewniona też jest możliwość sterowania wieloma czynnikami i parametrami jego rozruchu, a przede wszystkim ich rejestracji i kontroli.

Kwestią zasadniczą jest wybór temperatury badania. Kryteria wyboru powinny być związane z wartościami temperatury rozruchu silników występujących na obszarze kraju. Jednak analiza dostępnych danych o wartości temperatury, zarówno w poszczególnych miesiącach okresu zimowego, w różnych latach jak też i regionach kraju nie daje podstawy do jednoznacznej oceny jej wartości. Ponadto dla rozruchu silnika jest istotna wartość dzienna, najniższa, na ogół po czasie nocnym, gdyż najczęściej silniki są uruchamiane w godzinach porannych i mają temperaturę bliską temperaturze otoczenia. Jednak ważniejszym kryterium powinny być właściwości rozruchowe badanego silnika – wartość temperatury należy tak wybrać, aby zapewniony był w miarę łatwy rozruch silnika. Przy tym ze względu na konieczność wytworzenia warunków zwiększających intensywność zużycia długość trwania fazy pierwszej rozruchu – bez występowania zapłonów wytwarzanej mieszanki – powinna być dostatecznie duża, ok. 15 s [5]. Zdolność rozruchowa akumulatora zasilającego rozrusznik silnika powinna być wystarczająca dla zapewnienia skutecznego rozruchu silnika. Ponadto należy rozważyć następujące aspekty metodyki badań:

- przygotowania stanowiska badawczego,
- stanu badanego silnika,
- sposobu przeprowadzenia próby rozruchowej,
- zasad oceny i analizy wyników badań zużycia silnika.

Stanowisko badawcze powinno być wyposażone w urządzenia pomiarowe i rejestrujące zapewniające jednoznaczne i dokładne określenie warunków badań oraz przebiegu próby rozruchowej. Dla realizacji badań w zakresie zużycia skojarzenia T-P-C wystarczający jest pomiar i rejestracja parametrów pracy rozrusznika (napięcia i natężenia prądu) oraz prędkości obrotowej wału korbowego – rys. 4.



Rys. 4. Schemat typowego stanowiska do badań rozruchowych silnika: 1 – rozrusznik, 2 – sonda do pomiaru natężenia prądu [5]

W przygotowanym do badań silniku należy wykonać wstępne badania wymiarów geometrycznych tulei, ciśnienia sprężania oraz spadku ciśnienia w cylindrze zarówno przed przeprowadzeniem obróbki, jak też i po niej, a także po zakończeniu cyklu badań. Dla oceny zużycia konieczne jest przeprowadzenie około 200 prób rozruchowych. Ze względu na cel badań, czasochłonność i ich koszt nie jest zasadna realizacja prób rozruchowych w dobowym

cyklu wychładzania, zgodnie z normami badań rozruchowych – nie jest konieczna długotrwała stabilizacja termiczna silnika. Podobnie nie jest konieczne wygrzewanie silnika do osiągnięcia temperatury eksploatacyjnej. Zwiększoną intensywność zużycia rozruchowego można osiągnąć stosując krótkotrwałe jego wygrzewanie w ciągu około 5 min. W ten sposób możliwe byłoby przeprowadzenie 3 prób badawczych rozruchu w ciągu doby. Kontrola zmian parametrów pracy układu rozruchowego pozwoli na bieżącą ocenę stanu badanego silnika. Okresowo należy przeprowadzać także ocenę przedmuchu spalin przez nieszczelności zespołu T-P-C, a także kontrolować stan oleju smarującego.

Ocena wpływu ablacyjnej obróbki laserowej na warunki współpracy omawianego węzła tribologicznego oraz intensywności zużycia będzie dokonywana zarówno podczas realizacji cyklu prób rozruchowych, jak też po jego zakończeniu. Zasadniczym zadaniem w zakresie doskonalenia technologii obróbki jest zapewnienie co najmniej takiego poziomu szczelności początkowej skojarzenia (ciśnienie sprężania, spadek ciśnienia w komorze spalania), jaki istnieje w skojarzeniu nie poddanemu obróbce. Miarą skuteczności działania mikrozasobników olejowych będzie wartość momentu oporów ruchu wału korbowego, co bezpośrednio przełoży się na wartość natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik oraz prędkości napędzanego wału korbowego. Końcowa ocena odporności na zużycie warstwy modyfikowanej dokonywana będzie poprzez określenie i porównanie wymiarów elementów (głównie cylindra). Podjęte zostaną także próby identyfikacji dominującego mechanizmu zużycia w analizowanym skojarzeniu.

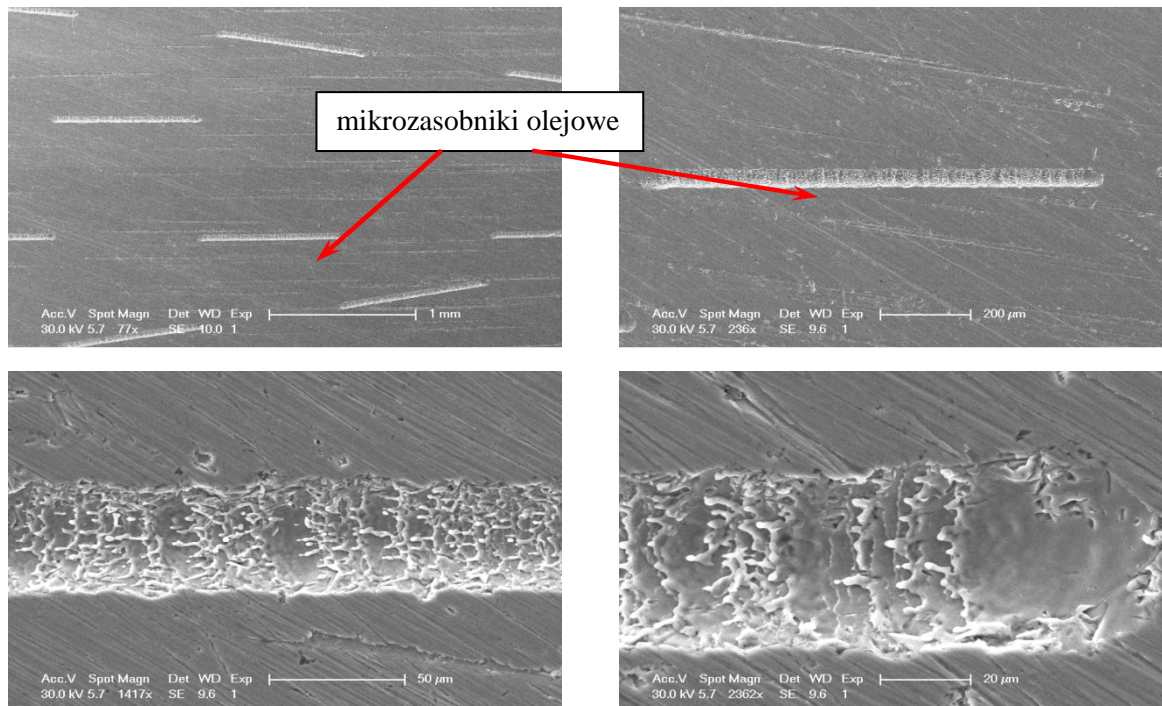
4. WYNIKI BADANIA WSTĘPNEGO SILNIKA 126 A2

Do przeprowadzenia badania wstępnego wykorzystano dwucylindrowy tłokowy silnik spalinowy firmy Fiat 126 A2 o zapłonie iskrowym chłodzony powietrzem o pojemności skokowej cylindrów 652 cm^3 . W silniku dokonano modyfikacji laserowej warstwy wierzchniej skojarzenia T-P-C. Ablacyjna mikroobrobka laserowa warstwy wierzchniej wykonana została na pomocą lasera Nd: YAG Allprint DN o następujących parametrach funkcjonalnych: $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $f = 100 \div 65000 \text{ Hz}$, $E = 50 \text{ J}$, $P = 100 \text{ W}$. Obróbce laserowej poddano powierzchnię boczną tłoka, powierzchnię czołową dwóch pierścieni uszczelniających oraz strefę o szerokości 20 mm w górnej części gładzi tulei cylindrowej, miejscu największego zużycia eksploatacyjnego. Na powierzchni czołowej pierścienia uszczelniającego wytworzono mikroczaśce olejowe o średnicy $70\div 80 \mu\text{m}$ oraz głębokości $7\div 15 \mu\text{m}$ (rys. 1), a w górnej strefie pierścieniowej tulei cylindrowej mikrokanaly o głębokości $12 \mu\text{m}$, szerokość ok. $50 \mu\text{m}$ i długości ok. 1 mm (rys. 5). Współczynnik wypełnienia powierzchni mikrozasobnikami olejowymi wynosił ok. 20%.

Zakres przeprowadzonych badań dotyczył podstawowej porównawczej diagnostyki silnika oraz pomiaru parametrów pracy układu rozruchowego. Analogiczne badania przeprowadzono przed modyfikacją laserową skojarzenia T-P-C oraz po jego modyfikacji. Silnik poddano próbie szczelności komory spalania, dokonano pomiaru ciśnienia sprężania oraz prądu rozruchowego w kilku stanach termicznych.

Wytworzenie mikrozasobników olejowych na powierzchni gładzi tulei cylindrowej spowodowało powstanie mikrowypływek materiału, które należało usunąć mechaniczną obróbką wykańczającą. Ręcznie przeprowadzona obróbka wykańczająca z wykorzystaniem papierów ściernych spowodowała wzrost średnicy tulei cylindrowej o ok. $5\div 10 \mu\text{m}$. Zwiększenie wymiarów tulei cylindrowej oraz odpowiednie zmniejszenie wymiarów pierścieni tłokowych przyczyniło się do wzrostu nieszczelności komory spalania, co miało także zasadniczy wpływ na uzyskane wyniki pomiarów i testów diagnostycznych.

Wyniki pomiarów ciśnienia sprężania (wartości średnie) w cylindrach silnika 126 A2 przy różnych wartościach temperatury silnika wykonanych przed modyfikacją laserową elementów skojarzenia T-P-C, jak też i po modyfikacji przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 5. Mikrozasobniki olejowe wytworzone w strefie pierścieniowej tulei cylindrowej [opracowanie własne]

Tab. 4. Ciśnienie sprężania w cylindrach silnika 126 A2 w jego różnych stanach termicznych

Temperatura	Ciśnienie sprężania przed modyfikacją i po modyfikacji laserowej elementów skojarzenia T-P-C	
	Przed modyfikacją	Po modyfikacji
-20 °C	0,80 MPa	0,78 MPa
-10 °C	0,83 MPa	0,80 MPa
0 °C	0,86 MPa	0,84 MPa
20 °C	0,88 MPa	0,86 MPa
80 °C	0,97 MPa	0,93 MPa

Źródło: [opracowanie własne]

Obserwowane różnice ciśnienia sprężania w okresie przed i po ablacyjnej mikroobróbce laserowej uzasadnia zwiększona w wyniku obróbki średnica cylindra. Obniżanie wartości ciśnienia wraz ze spadkiem temperatury wynika głównie ze zmiany prędkości napędzania wału korbowego (zwiększająca się lepkość oleju smarującego i moment oporu napędzania wału korbowego). Istotnie większa różnica ciśnienia przy zmianie temperatury silnika z 20 do 80°C wynika dodatkowo z braku równowagi termicznej otoczenia i silnika, gdy jest on w stanie podwyższonej temperatury. Zasysane z otoczenia powietrze przejmuje ciepło od gorących ścianek komory sprężania i jego ciśnienie w procesie sprężania wzrasta.

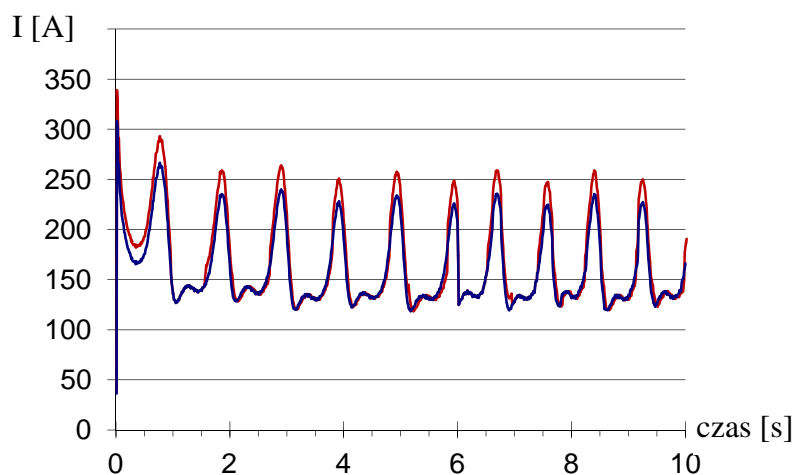
Pomiar spadku ciśnienia wykonano za pomocą testera szczelności cylindrów. Wyniki pomiarów (przy ustawieniu tłoka w położeniu GMP) zamieszczono w tabeli 2.

Relacje otrzymanych tu wyników są analogiczne do relacji wartości ciśnienia sprężania w odniesieniu do wpływu przeprowadzonej obróbki laserowej. Szczególnie duży jest wpływ temperatury silnika na uzyskiwane wartości spadku ciśnienia, co wskazuje na wzrost czułości metody wraz z obniżaniem jej wartości.

Pomiar natężenia prądu rozruchowego jest powszechnie stosowany do diagnostyki szczelności komory spalania. Na rys. 6 przedstawiono na jednym wykresie przebiegi natężenia prądu uzyskane podczas napędzania wału korbowego w temperaturze -20 °C, przed i po dokonaniu ablacyjnej mikroobróbki laserowej.

Tab. 2. Wyniki pomiarów szczelności cylindrów silnika 126 A2 w jego różnych stanach termicznych [opracowanie własne]

Temperatura	Spadek ciśnienie w cylindrach silnika przed modyfikacją i po modyfikacji laserowej elementów skojarzenia T-P-C	
	Przed modyfikacją	Po modyfikacji
-20 °C	80%	78 %
-10 °C	45%	48 %
0 °C	29%	32 %
20 °C	21%	25 %
80 °C	12%	14 %



Rys. 6. Przebieg natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego silnika 126 A2 w temperaturze -20°C: linia czerwona – przed modyfikacją laserową, linia niebieska – po modyfikacji laserowej elementów skojarzenia T-P-C [opracowanie własne]

Podczas rozruchu (napędzania wału korbowego) silnika w niskiej temperaturze -20°C układ rozruchowy pobiera prąd o znacznej wartości natężenia ze względu na duży wzrost lepkości oleju silnikowego i oporów ruchu wału korbowego. Maksymalna wartość natężenia prądu w suwie sprężania przed modyfikacją laserową elementów skojarzenia T-P-C wynosi około 250 ÷ 260 A, a po ich modyfikacji – 225 ÷ 235 A. Natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik jest proporcjonalne do momentu oporu napędzania wału korbowego. Zmniejszenie jego wartości po obróbce laserowej powierzchni może być skutkiem zmniejszenia sił tarcia w skojarzeniu T-P-C, jak też zmniejszenia wartości ciśnienia sprężania – dalsze modyfikacje technologii obróbki i próby badawcze powinny pozwolić na ocenę przyczyn takiego stanu.

Przy każdej wartości temperatury otoczenia przeprowadzono także próby rozruchu silnika w dwóch cyklach pracy rozrusznika, trwających po 15 sekund z przerwą między nimi wynoszącą również 15 sekund. Próby wykazały, że poziom właściwości rozruchowych silnika pozwoli na jego skuteczne uruchamianie przy wartości temperatury około -10°C.

PODSUMOWANIE

Laserowe wytwarzanie mikrozasobników olejowych na powierzchniach współpracujących elementów maszyn przyczynia się do zwiększenia wpływu warstwy olejowej na warunki tarcia tych skojarzeń. Istnienie warstwy olejowej zmniejsza opory tarcia, ale przede wszystkim intensywność zużycia i przyczynia się do zwiększenia ich trwałości. W przypadku modyfikacji laserowej elementów skojarzenia T-P-C wypełnione olejem zasobniki miałyby szczególnie istotną rolę do spełnienia w okresie rozruchu silnika i wygrzewania zimnego silnika. Przyjęta metoda weryfikacji skuteczności działania mikrozasobników oleju poprzez sprawdzenie odporności skojarzenia na zużycie w warunkach rozruchu silnika w niskiej

temperaturze jest względnie łatwa do zrealizowania i zapewni możliwość wieloaspektowego wnioskowania, m. in. w kwestii wyboru elementów modyfikowanych laserowo i ich obróbki.

Przeprowadzone wstępne próby tzw. „zimnych rozruchów” pozwoliły na stwierdzenie spadku natężenia prądu rozruchowego. Może to być związane ze zmniejszeniem oporów ruchu elementów skojarzenia T-P-C, lecz również może być wynikiem zmniejszenia ciśnienia sprężania ładunku w cylindrach wskutek utraty ich szczelności. W wyniku przeprowadzenia oględzin zdemontowanych tulei cylindrowych silnika (w tym przy użyciu mikroskopu optycznego stereoskopowego) stwierdzono obecność oleju w mikrozasobnikach, co świadczy o możliwości korzystnego wpływu mikrozasobników olejowych na warunki pracy silnika – opory ruchu w skojarzeniu, przy zapewnieniu jego odpowiedniej szczelności.

„Praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki – nr projektu N508 054 32/3758”.

BIBLIOGRAFIA

1. Lewicki J., *Opory tarcia i zużycie silników z zapłonem samoczynnym przy rozruchu w niskich temperaturach*. Prace Naukowe Polit. Szczecińskiej Nr 353. Szczecin, 1988.
2. Mysłowski J., *Rozruch silników samochodowych z zapłonem samoczynnym*, WNT, Warszawa, 1996.
3. Napadłek W., *Laser ablation microprocessing of elements of internal combustion engine*. Journal of Kones Powertrain and Transport vol. 14, No. 4, 2007.
4. Napadłek W., Woźniak A., Burakowski T., i inni, *Opracowanie podstaw technologii teksturowania laserowego elementów silnika spalinowego dla zwiększenia ich odporności na zużycie w warunkach tarcia*. Projekt badawczy własny Nr 5102/B/T02/2011/40, WAT, Warszawa, 2011.
5. Pszczołkowski J., *Analiza i modelowanie procesu rozruchu silników o zapłonie samoczynnym*. Wydawnictwo WAT. Warszawa. 2009.
6. Soveja A., Jouvard J. M., Grevey D., *Metal surface laser texturing multiphysics modelling of a single impact effect*. Except from the proceedings of the COMSOL Users Conference, Grenoble, 2007.
7. Сорокин Л. А., *О кинетике изнашивания цилиндра-поршневой группы двигателя при пуске*. Автоомобильная промышленность. 1974, Но 7.

WEAR RESISTANCE EVALUATION METHOD OF ENGINE ELEMENTS MODIFIED WITH LASER

Abstract

The research and evaluation method of durability (wear resistance) with laser modified elements of 126p car engine elements. Engine laser modification consisted in creating on piston-piston rings-cylinder set oil microreserves providing constant oil influence on friction conditions in this set. There was accomplished wear research method during engine start-up in low ambient temperature conditions. There is characterized the research stand in low temperature chamber and research carrying out conditions. There are also presented the initial tests results and conclusions.

Autorzy: dr inż. Wojciech Napadłek, dr hab. inż. Józef Pszczołkowski, prof. WAT, dr inż. Adam Woźniak – Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa.