

EKSPLOATACYJNE ZUŻYCIE SILNIKA SPALINOWEGO O ZS

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań zużycia eksploatacyjnego tulei cylindrowych silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym. Badania prowadzono na próbie 5 – cio elementowej, silników o zapłonie samoczynnym, o znanym stanie początkowym zużycia, w warunkach badań nadzorowanych. Opracowano otrzymane w trakcie badań wyniki, pod kątem przebiegu procesu zużycia układu tłok-pierścienie tłokowe-tuleja cylindrowa (TPC).

WSTĘP

Z technicznego punktu widzenia miarami jakości wyrobu są jego niezawodność i trwałość. W odniesieniu do pojazdu samochodowego jego jakość ściśle wiązana jest z jego trwałością [6]. Przy projektowaniu współczesnych pojazdów podejmuje się próby uwzględniania między innymi wymogu zachowania jednakowej trwałości wszystkich jego zespołów. Jednak jak wskazuje praktyka w dalszym ciągu o trwałości pojazdu decyduje trwałość jego silnika [8].

Analiza literatury z zakresu trwałości silników spalinowych wskazuje również, że układem ją determinującym jest układ tłok-pierścienie-cylinder (TPC). Zużycie tego układu decyduje o osiągnięciu przez silnik stanu granicznego (SG) [5]. Zużycie układu TPC utożsamiane jest przede wszystkim ze wzrostem wewnętrznej średnicy tulei cylindrowej. W miarę jej wzrostu następuje nie tylko utrudniony rozruch czy spadek możliwej do uzyskania mocy silnika – kryteria techniczne SG – ale także wzrost zużycia paliwa i oleju silnikowego. Wzrost zużycia oleju, przy surowych normach dotyczących toksyczności spalin, powoduje, że dany silnik (pomimo spełnienia innych kryteriów) nie nadaje się już do dalszego użytkowania – kryteria ekonomiczne i ekologiczne SG.

Ograniczenie trwałości układu TPC w porównaniu z innymi układami silnika wynika przede wszystkim z jego budowy, wykonywanych zadań i warunków pracy. Zapewnienie dostatecznej szczelności układu, przy zmiennych w szerokim zakresie ciśnieniu, temperaturze i prędkości względnej jego elementów, wymusza stosowanie wąskich tolerancji wykonawczych oraz odpowiednich kształtów i struktury warstwy wierzchniej współpracujących elementów. Komplikuje to w znacznej mierze budowę części składowych jak i całego układu TPC. Dodatkowo intensywność procesów tribologicznych w tym układzie jest największa w porównaniu z zachodzącymi we wszystkich innych węzłach i układach silnika. Wynika to głównie z warunków pracy układu (duże obciążenia dynamiczne i kinematyczne przy zmiennej temperaturze otoczenia) jak i dążności do zminimalizowania oporów tarcia.

Optymalizacji warunków pracy tego węzła tarcowego dokonuje się poprzez wprowadzenie do układu dodatkowego elementu – środka smarowego – w postaci oleju silnikowego o odpowiednich cechach reologicznych. Pozwala to na zwiększenie udziału tarcia płynnego w ogólnym procesie tarcia w układzie. Jednak prowadząc działania optymalizacyjne należy mieć na uwadze następujące zagadnienia:

1. Czy wprowadzony do układu środek smarowy zmienia warunki jego pracy.
2. Czy tendencja występujących zmian jest korzystna (następuje zmniejszenie intensywności procesów tribologicznych).
3. Czy zmiana warunków pracy jest trwała (nie zależy od czasu).

Pełnej weryfikacji skuteczności podjętych działań optymalizacyjnych można dokonać przede wszystkim poddając zmodernizowany węzeł kinematyczny, w tym przypadku układ TPC, badaniom eksploatacyjnym w warunkach nadzorowanych. Są to badania czasowo- i kosztochłonne, stąd w badaniach weryfikacyjnych wykorzystywane stosunkowo rzadko. W artykule przedstawiono wyniki badań zużycia przeprowadzone w takich warunkach, dla silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym (ZS).

1. ZUŻYCIE TULEI CYLINDROWYCH SILNIKA SPALINOWEGO

Starzenie fizyczne to procesy zachodzące w materiałach części obiektu w wyniku wymuszeń wewnętrznych i zewnętrznych, skutkujące nieodwracalnymi zmianami własności użytkowych elementów [9]. Procesy starzenia i zużycie występują podczas eksploatacji obiektu technicznego, wpływają destrukcyjnie na ich stan techniczny i przyczyniają się do uszkodzeń. Rozróżnia się starzenie fizyczne i moralne.

Zmiana stanu technicznego silnika spalinowego jest wynikiem zużycia powierzchniowego i objętościowego oraz uszkodzeń. Intensywność zużycia zależy od czynników wymuszających jak: stałe lub zmienne obciążenie cieplne i mechaniczne, jakość rozpylania paliwa, tarcie zewnętrzne w poszczególnych układach tribologicznych. Tarcie zewnętrzne według normy PN-91/M-04301 dotyczy ciał znajdujących się w bezpośrednim styku powierzchniowym. Wpływ czynników wymuszających zależy od: zapotrzebowania przez odbiorniki mocy silnika spalinowego, własności fizykochemicznych mediów (paliwa, oleju smarującego, wody chłodzącej i powietrza), wymaganego czasu na wykonanie zadań.

Zmiana własności stereometrycznych i fizykochemicznych warstwy wierzchniej elementów maszyn powoduje zmianę ich własności użytkowych, tzn. tribologicznych, zmęczeniowych, antykorozyjnych, elektrycznych, cieplnych i innych. W materiałach przy wymuszeniach mechanicznych, cieplnych, chemicznych lub ich kombinacji powstają zmiany odwracalne i nieodwracalne powodujące występowanie w nich naprężeń [3].

1.1. Skutki procesów tribologicznych - zużycie

Warunki tarcia w układzie TPC silnika spalinowego należą do najtrudniejszych ze wszystkich układów tribologicznych silnika. Siła tarcia w takich układach uzależniona jest od obciążenia, prędkości pierścienia względem tulei cylindrowej oraz własności tribologicznych smaru [1]:

$$T = f(P, U, X_{ch}) \quad (1)$$

gdzie:

X_{ch} – własności tribologiczne smaru,
 U – prędkość pierścienia względem tulei,
 P – obciążenie.

Analizując warunki pracy układu (obciążenie, prędkość, stan cieplny, oddziaływanie otoczenia, struktura geometryczna) można przyjąć, że dominującymi w układzie rodzajami zużycia będą:

- zużycie ściernie Z_s ,
- zużycie adhezyjne Z_a ,
- zużycie zmęczeniowe Z_z ,
- zużycie korozyjne Z_k .

Ogólnie równanie zużycia układu przyjmuje postać:

$$Z = Z_s + Z_a + Z_z + Z_k \quad (2)$$

gdzie:

Z_s – zużycie ściernie,
 Z_a – zużycie adhezyjne,
 Z_z – zużycie zmęczeniowe,
 Z_k – zużycie korozyjne.

Efektom zużycia jest zmiana makro- i mikrogeometrii powierzchni styku, wzrost średnicy wewnętrznej tulei cylindrowej, zmniejszenie grubości pierścieni oraz wzrost luzu w zamku pierścienia. Wymienione zmiany intensyfikują proces zużycia układu zmniejszając skuteczność działania uszczelnienia i podwyższając temperaturę powierzchni tarcia. W rzeczywistym układzie tribologicznym wszystkie wymienione rodzaje zużycia występują jednocześnie, aczkolwiek udział każdego z nich jest różny i wzajemnie na siebie oddziałują, przy czym każdy z nich uwarunkowany jest dodatkowo oddziaływaniem wymuszeń występujących w układzie. Z uwagi na niepełny opis formalny związków pomiędzy wymuszeniami, a zużyciem, jak również oddziaływania jednego zużycia na drugi, budowa modelu zużycia takiego układu jest utrudniona. Utrudniona jest również analiza jednoczesnego wpływu wszystkich oddziaływań na intensywność procesu zużycia układu.

Obserwowane zużycie tulei cylindrowej w czasie uruchamiania silnika ZS jest sumą dwóch odrębnych, następujących po sobie procesów zużywania. Pierwszy proces stanowi zużycie elementów w trakcie postoju silnika po jego zatrzymaniu. Drugi proces związany jest z przejściem ze stanu spoczynku w stan ruchu.

Zużycie układu TPC w czasie postoju silnika jest spowodowane przede wszystkim zużyciem korozyjnym. Zużycie to pojawia się na powierzchni gładzi cylindrowej w miejscach przerwania się warstewki oleju pozostałej po ścięnięciu oleju do miski olejowej. Powstające produkty korozji, w przypadku ponownego uruchamiania silnika, są usuwane przez poruszające się pierścienie. Dostając się do stref tarcia mogą powodować, przy niedostatecznym smarowaniu, zużycie ściernie w układzie TPC w trakcie rozruchu.

W trakcie samego procesu rozruchu (przejście ze stanu spoczynku do stanu ruchu) obserwuje się przede wszystkim występowanie zużycia wywołanego procesami tarcia oraz korozji. Przy czym brak jest jednoznacznej oceny, który z mechanizmów zużycia ma dominujące znaczenie w warunkach rozruchu silnika ZS [1]. Analiza procesu zużywania się elementów układu TPC silnika ZS prowadzi do wniosku, że zużycie rozruchowe silnika jest wynikiem sumarycznego występowania i oddziaływania wielu rodzajów zużyć. Na proces zużycia tulei cylindrowej duży wpływ mają również warunki pracy silnika, a przede wszystkim temperatura otoczenia.

1.2. Miary zużycia układu TPC

Układem limitującym trwałość całego silnika jest stan techniczny zespołu tłok-pierścienie-cylinder. Osiągnięcie przez ten układ

zużycia granicznego z_m powoduje wycofanie z eksploatacji całego silnika. Jest to podyktowane głównie względami ekonomicznymi. Z jednej strony ulegają pogorszeniu wskaźniki techniczno – ekonomiczne silnika m.in.:

- jednostkowe zużycie paliwa g_e ,
 - moment obrotowy M_o ,
 - moc użyteczna N ,
- co skutkuje przede wszystkim podwyższonym zużyciem paliwa przez pojazd jak też niekorzystnie odbija się na parametrach trakcyjnych pojazdu (prędkość maksymalna, zdolność pokonywania wzniesień). Rosną zatem koszty związane z bieżącą eksploatacją pojazdu. Z drugiej strony wykonanie naprawy głównej również nie jest ekonomicznie opłacalne gdyż koszt naprawy zespołu TPC stanowi ponad 40% ceny nowego silnika.

Stan techniczny pojedynczego elementu zespołu TPC może być określany poprzez podanie rzeczywistych wymiarów elementu, chropowatości jego powierzchni i właściwości materiałów z jakich go wykonano. W przypadku całego zespołu TPC stan techniczny określany jest poprzez rzeczywiste różnice wymiarowe (luzy) i wzajemne położenie współpracujących powierzchni (geometryczną dokładność montażu).

Do geometrycznych parametrów stanu technicznego zespołu jako całości należą: luz tłok-cylinder, luzy pierścieni w rowkach tłoka, szczeliny na zamkach pierścieni, rzeczywiste zmiany położenia osi tłoka w stosunku do osi cylindra w czasie pracy silnika.

Parametry materiałowe stanu technicznego zespołu TPC obejmują własności materiałów, stan warstwy wierzchniej poszczególnych elementów złozenia. Parametry funkcjonalne stanu technicznego zespołu TPC to wielkości charakteryzujące jego szczelność. Mogą być określone np.: względnym spadkiem ciśnienia, wielkością przedmuchów do skrzyni korbowej, ciśnieniem sprężania.

Podstawowym parametrem ustalającym warunki wzajemnej współpracy wszystkich elementów złozenia jest luz pary kinematycznej tłok-tuleja cylindrowa. W celu kompleksowego scharakteryzowania tego parametru należy przeprowadzić pomiary:

- średnic wewnętrznych tulei,
- średnic tłoka,
- wzajemnego położenia osi tłoka i cylindra,
- zmian średnic elementów wywołanych obciążeniami mechanicznymi i cieplnymi.

Pełna kontrola luzu i jego zmian w trakcie eksploatacji jest w praktyce trudnym do zrealizowania zadaniem.

Zgodnie z Normą Branżową [7] zużycie cylindrów oblicza się, zestawiając wyniki pomiarów mikrometrycznych średnicy wewnętrznej cylindra wykonanych po obserwowanym okresie pracy silnika z górnym wymiarem tej średnicy podanym w dokumentacji konstrukcyjnej.

W statystycznych badaniach trwałości silników, zwłaszcza w warunkach eksploatacyjnych, dąży się do uproszczenia pomiarów. Zużycie cylindra traktuje się wtedy jako wskaźnik zużycia całego zespołu TPC. Upraszcza się również miarę zużycia cylindra [3].

Uproszczoną miarą zużycia cylindra jest różnica między wewnętrzną średnicą mierzoną na wysokości tzw. progu ogniowego, a wymiarem nominalnym [3]. Parametr funkcjonalny $z(t)$, opisujący przebieg zużycia w chwili t , można opisać zależnością:

$$z(t) = d(t) - d_{nom} \quad (3)$$

gdzie:

$d(t)$ – wewnętrzna średnica cylindra na wysokości progu ogniowego w chwili t ,

d_{nom} – nominalny wymiar wewnętrznej średnicy cylindra.

2. BADANIA EKSPLOATACYJNE

Objektem badań eksploatacyjnych były silniki typu 359M zamontowane w samochodach ciężarowych STAR 1142. Silnik 359M to silnik o zapłonie samoczynnym, o mocy 110 [kW], czterosurowy, górnozaworowy. Układ cylindrów rzędowy, pionowy. Silnik ten posiada bezpośredni wtrysk paliwa do komory otwartej, znajdującej się w denku tłoka. Wyposażony jest w obiegowy, mieszany układ smarowania (panewki wału korbowego i panewki wału rozrządu są smarowane olejem pod ciśnieniem $0,2 \pm 0,6$ [MPa], zaś gładź tulei cylindrowej smarowana jest rozbryzgowo).

Badania prowadzone były na 5-ciu silnikach o znanym stanie początkowym (przeprowadzono pomiary mikrometryczne wybranych elementów silnika, a w szczególności układu TPC). Silniki po dotarciu technologicznym zamontowano w samochodach STAR 1142 eksploatowanych przez Zakład Transportu Samochodowego Poczty Polskiej w Lublinie. Średnie obciążenie skrzyni ładunkowej wynosiło 5 000 [kg] i nigdy nie przekraczało dopuszczalnej ładowności pojazdu. Przebiegi dzienne samochodów wynosiły od 240 do 350 [km]. Samochody eksploatowano w warunkach jazdy miejskiej i na trasach pozamiejskich.

Docieranie technologiczne silników przeprowadzono przy wykorzystaniu oleju FALCO CD 15W/40. Następnie do układu smarowania silnika zalano olej mineralny JASOL 9 klasy jakościowej wg API CE/SF i klasy lepkościowej wg SAE 15W/40 produkowany przez Podkarpackie Zakłady Rafineryjne w Jaśle. Olej ten był używany w ciągu całego okresu badań. W układzie chłodzenia zastosowano szczególnie zalecany przez producenta płyn COOLELF SUPRA GF posiadający homologację jako płyn chłodzący „typ D” zgodnie z wymaganiami następujących norm: SAE J 1034, AFNOR NFR 15-601, BS 65 80, ASTM D 3306 oraz Renault Vehicules Industriels 41-01-001/P.

Po dotarciu technologicznym silniki poddano badaniom odbiorczym prowadzonym wg instrukcji „Warunki techniczne na wykonanie i odbiór silnika 359M” opracowanej przez producenta na podstawie norm i dokumentacji technologicznej. Badania odbiorcze silnika po dotarciu technologicznym obejmowały:

1. Wzrokowe sprawdzenie szczelności połączeń.
2. Sprawdzenie hałaśliwości pracy silnika.
3. Sprawdzenie minimalnej prędkości obrotowej biegu jałowego.
4. Sprawdzenie stopnia zadymienia spalin przy swobodnym przyspieszeniu.
5. Sprawdzenie ciśnienia oleju w wybranym punkcie magistrali olejowej.
6. Ocenę różnicy ciśnienia sprężania w poszczególnych cylindrach danego silnika.
7. Sprawdzenie mocy silnika na hamulcu.
8. Sprawdzenie szczelności skrzyni korbowej.
9. Sprawdzenie dokręcenia śrub i nakrętek w zakresie momentów określonych dokumentacją technologiczną.
10. Sprawdzenie oznaczeń fabrycznych silnika.
11. Sprawdzenie stanu gładzi cylindrowej po docieraniu technologicznym.

W ramach bieżącej kontroli nad przebiegiem procesu eksploatacji wykonywano następujące pomiary diagnostyczne:

1. Pomiar ciśnienia sprężania w cylindrach.
2. Pomiar spadku ciśnienia (szczelności przestrzeni roboczej cylindra).
3. Pomiar natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej silnika.
4. Pomiar zadymienia spalin.
5. Pomiar mocy na kołach.
6. Pomiar oporów przepływu na filtrze powietrza.
7. Oznaczenie zawartości żelaza w oleju silnikowym.

Dodatkowo kontrolowano:

1. Równomierność pracy silnika na biegu jałowym.
2. Wartość ciśnienia wtrysku i równomierność pracy na biegu jałowym.
3. Statyczną i dynamiczną wartość kąta wyprzedzenia wtrysku na wale korbowym.
4. Stan techniczny pompy wtryskowej poprzez pomiar dawkowania w wybranych punktach charakterystyki (pomiar przeprowadzono co 36 000 [km] przebiegu).

Kontrola stanu aparatury wtryskowej miała na celu uchronienie silnika przed niewłaściwym dawkowaniem oraz złym rozpyleniem paliwa prowadzącym do zmywania filmu olejowego z gładzi cylindrowej, a w konsekwencji do powodowanego tym wzrostu intensywności zużywania.

Wszystkie obsługi techniczne silników wykonywane były zgodnie z zaleceniami producenta. Okresowe przeglądy techniczne wykonywane były w Dziale Silników Zakładu Konstrukcyjno-Badawczego Samochodów Ciężarowych w Starachowicach i połączone były z badaniami diagnostycznymi stanu technicznego silników). Pozwoliło to zminimalizować zakłócenia w normalnej eksploatacji samochodów oraz ograniczyć ilość nie przewidzianych w instrukcji obsługi samochodu czynności wykonywanych przy silniku. Ponadto pomiary wykonywane były przez te same osoby, z wykorzystaniem tych samych przyrządów. Zapewniono tym samym dokładną realizację zaleceń producenta w zakresie warunków eksploatacji (dopuszczalne obciążenia) oraz warunków obsług technicznych. Opisana organizacja badań miała na celu zagwarantowanie powtarzalności warunków eksploatacji i obsług.

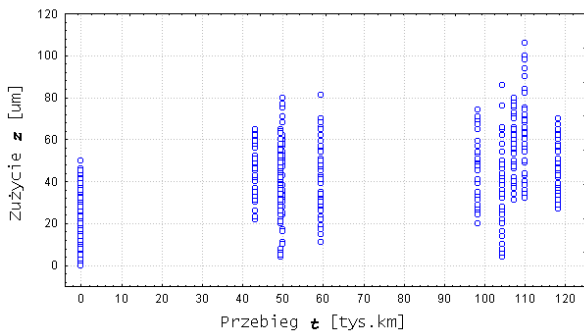
Zużycie tulei cylindrowej określono mierząc zmianę wymiaru tulei prostopadłe do powierzchni tarcia. Pomiary wykonano zgodnie z zaleceniami Normy Branżowej [7]. Ponieważ w trakcie badań nie dokonywano demontażu układu tłokowo – korbowego silnika zatem pomiary przeprowadzono w czterech płaszczyznach na głębokościach: 20, 35, 50, 95 [mm] (mierząc od płaszczyzny podgłowicowej) oraz w dwóch kierunkach: równoległym (A–A) do osi wału korbowego i prostopadłym (B–B) do osi wału korbowego. Najistotniejsze są wyniki pomiarów pochodzące z pierwszej głębokości pomiarowej (odpowiada ona środkowi górnego pierścienia uszczelniającego przy położeniu tłoka w GMP) ponieważ z reguły występują tu maksymalne zużycia, które decydują o żywotności cylindra. Mierząc zużycie w dwóch kierunkach zmniejszono błąd wynikający z ewentualnych deformacji cieplnych cylindra.

Do pomiarów wykorzystano średnicówkę mikrometryczną produkcji Zakładów Carl Zeiss Jena o działce elementarnej 0,002 [mm]. Taka dokładność przyrządu pomiarowego jest w zupełności wystarczająca wobec dużych, obserwowanych bezwzględnych wartości zużycia.

3. WYNIKI BADAŃ

Zużycie tulei cylindrowych określono z wykorzystaniem zależności (3) przy czym nie ograniczono się jedynie do tzw. proggu ogniowego (głębokość ~20 [mm]) lecz wykorzystano również wyniki pomiarów na głębokościach 35, 50 i 95 [mm]. Uzyskano w ten sposób pełny obraz zużycia tulei (w zakresie dostępnym bez demontażu układu korbowego).

Wyniki pomiarów (720 wyników) przedstawiono na rysunku 1, natomiast w tabeli 1 zestawiono parametry statystyczne obserwowanych wielkości zużycia.



Rys. 1. Wyniki pomiarów zużycia tulei cylindrowych

Tab. 1. Parametry statystyczne obserwowanych wielkości zużyc

Lp.	Nr silnika	Przebieg [tys.km]	Liczba obserwacji	Średnie zużycie [µm]	Odchylenie standardowe [µm]
1	I	0	48	12,917	3,827
2	II	0	48	14,229	4,170
3	III	0	48	15,083	4,629
4	IV	0	48	28,313	7,730
5	V	0	48	27,521	7,968
6	I	59,319	48	42,146	12,541
7	II	49,860	48	44,250	14,202
8	III	49,473	48	39,479	9,179
9	IV	43,174	48	45,896	11,084
10	V	49,436	48	39,771	11,927
11	I	104,336	48	46,938	14,574
12	II	109,918	48	62,479	16,375
13	III	118,170	48	48,396	11,553
14	IV	107,202	48	58,167	12,360
15	V	98,221	48	48,375	14,767

Na podstawie wyników pomiarów zużycia wyznaczono linie regresji według ogólnej zależności (4):

$$\bar{z} = f(t) \tag{4}$$

gdzie:

t – czas pracy silnika wyrażony w [km] przebiegu pojazdu,

\bar{z} – wartość średnia zużycia tulei cylindrowej [µm].

Linie regresji drugiego rodzaju – jako oszacowanie linii regresji pierwszego rodzaju na podstawie próbki – wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów za pomocą programu STATISTICA®. Współczynnik korelacji krzywoliniowej R wyznaczono ze wzoru (5):

$$R = \sqrt{1 - \varphi^2} \tag{5}$$

gdzie:

R – współczynnik korelacji krzywoliniowej,

φ – współczynnik zgodności określony wzorem (6)

$$\varphi^2 = \frac{\sum_1^n [y_i - f(x_i)]^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{6}$$

Zgodność wyznaczonej linii regresji jest tym lepsza im wartość współczynnika korelacji R jest większa.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń. Wyznaczone współczynniki korelacji są istotne.

Tab. 2. Wartości współczynnika korelacji dla różnych linii regresji

Lp.	Rodzaj regresji	Wartość współczynnika korelacji R	Punkt przegięcia [km]	Postać funkcyjna
1.	liniowa	0,629	-	$z = 0,000285 \cdot t + 22,586$
2.	potęgowa	0,656	-	$z = 19,279 + t^{0,295}$
3.	segmentowa	0,847	52 600	$z = 0,000623 \cdot t + 18,133$ dla $t < 52\,600$ $z = 0,000132 \cdot t + 43,961$ dla $t > 52\,600$

Biorąc pod uwagę wartość uzyskanego współczynnika korelacji krzywoliniowej R (jego wartość powinna być jak największa) oraz zjawiska fizyczne zachodzące w trakcie zużywania tulei cylindrowych (występujący okres docierania oraz czas ustabilizowanego zużywania, charakteryzujący się mniejszą intensywnością zużywania – mniejsza wartość współczynnika kierunkowego prostej), jako model procesu zużywania tulei cylindrowych w czasie przyjęto regresję segmentową. Zatem wartości oczekiwane zużycia (\bar{z}) tulei cylindrowych w czasie można opisać następującymi zależnościami (7):

$$\begin{aligned} \bar{z} &= (0,000623) \cdot t + 18,133 && [\mu\text{m}] && \text{dla } t \leq t_d \\ \bar{z} &= (0,000132) \cdot t + 43,961 && [\mu\text{m}] && \text{dla } t > t_d \end{aligned} \tag{7}$$

gdzie:

t – czas pracy silnika (przebieg) [km],

t_d – chwila zakończenia procesu docierania [km].

Wyznaczona wartość $t_d = 52\,600$ [km].

Opisano w ten sposób proces zużycia wężła kinematycznego silnika 359. Model matematyczny opracowano w oparciu o statystyczną analizę próby 720. elementowej i jest on zgodny z modelem zużycia W. F. Lorenca, opisującym proces zużycia tarcowego wężła kinematycznego w obecności środka smarowego.

PODSUMOWANIE

Zaprezentowane w pracy wyniki badań stanowią istotny wkład w obszarze badania procesów zużycia silników spalinowych o zapłonie samoczynnym. Wykorzystana metoda badawcza, nadzorowanych badań eksploatacyjnych, pozwala dokładnie oszacować proces zużycia wybranych par kinematycznych, w tym przypadku skojarzenia tŁok-pierścienie tŁokowe-tuleja cylindrowa, z uwzględnieniem szerokiego spektrum czynników, determinujących ten proces. Przyjęta metodyka badawcza uwzględnia m.in. wpływ zimnych rozruchów na proces zużycia silnika i jego elementów. Matematyczny model procesu zużycia, opracowany na podstawie badań nowych silników do przebiegu ok. 120 000 [km], zgodny jest z ogólnym modelem kinetyki procesu zużycia, opisującym proces tarcia pary kinematycznej w obecności środka smarowego. Wyodrębniony w modelu proces docierania, potwierdza konieczność zachowania szczególnych warunków eksploatacji silnika w początkowym okresie

użytkowania, pomimo zastosowania docierania technologicznego skojarzenia TPC w procesie produkcyjnym. Zaproponowany i wyrażony równaniem (7) model procesu zużycia tulei cylindrowej silnika może być zastosowany do oceny trwałości skojarzenia TPC lub oceny zużycia, dla wybranej chwili czasu t eksploatacji pojazdu.

BIBLIOGRAFIA

1. Chmielewski Z.: *Trwałość tulei cylindrowych silnika spalinowego jako funkcja stanu oleju smarowego podczas eksploatacji*. Rozprawa doktorska. Politechnika Radomska, Radom 2001.
2. Kordos P., Ignaciuk P.: *Analiza zużycia tulei cylindrowej silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym w trakcie długotrwałej eksploatacji*. Postępy Nauki i Techniki 2008, nr 2.
3. Monieta J.: *Badanie zużycia wybranych elementów okrętowych średnioobrotowych silników o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami pozostałościowymi*. Tribologia 2014, nr 2.
4. Niewczas A.: *Trwałość zespołu tłok–pierścienie tłokowe–cylinder silnika spalinowego*. WNT, Warszawa 1998.
5. Niewczas A., Czerniec M., Ignaciuk P.: *Badania trwałości elementów maszyn współpracujących tarciowo*. IZT Instytut Zastosowań Techniki, Lublin 2000.
6. Niewczas A., Rychter M., Chmielewski Z.: *Economical criteria of terminal condition evaluation*. 3-rd European Conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications TRANSCOM'99, Slovak Republik, Žilina 1999.
7. Norma BN-79/1374-04. *Silniki samochodowe. Badania stanowiskowe. Badania niezawodności*.
8. Piasecki S., Niewczas A., Drożdżel P., Krzywonos L.: *Wpływ trwałości silnika samochodu ciężarowego na ekonomiczną efektywność eksploatacji na przykładzie samochodu STAR 1142*. Journal of KONES. Internal Combustion Engines, Vol. 1, No 1, Warsaw-Lublin 1994.
9. Żółtowski B., Cempel C. (red.): *Inżynieria Diagnostyki Maszyn*. Praca zbiorowa. Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2004.

MAINTENANCE WEAR INTERNAL COMBUSTION ENGINE CI

Abstract

The article presents the results of wear and tear to the internal combustion engine cylinder liners for diesel. The study was conducted for a population of 5 - five diesel engines, a known initial state of wear, under the conditions of supervised research. Developed received in the course of research results in terms of the process wear of piston-rings piston-cylinder bore (TPC).

Autorzy:

dr inż. **Zbigniew Chmielewski** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu