

DOES „DOWNSIZING” LIMIT THE DURABILITY OF PISTON-CYLINDER ASSEMBLY?

Antoni Iskra

Poznan University of Technology
Piotrowo Street 3, 60-965 Poznań
tel.: +48 61 6652511, fax: +48 61 6652514
E-mail: antoni.iskra@put.poznan.pl

Abstract

Internal combustion engines purposed for passenger car drive are not perfect but there is no alternative drive yet that could replace IC engine in noticeable percentage. However, among IC engines there is a tough competition between two kinds of ignition. At present, a gasoline engine subjected to the „downsizing” [4] is the only alternative to very popular diesels. Such engine shows a specific fuel consumption similar to diesel maintaining the principal advantages of spark engine. The fundamental advantage is generating the maximum torque at about 1500 rpm and keeping it up to 3500 rpm for an engine operating within 850 to 5000 rpm range. However, such advantageous characteristics of torque can cause a limited durability of the piston-cylinder assembly. High torque at low speed creates an unfavorable conditions of collaboration between the upper compression ring and cylinder surface.

Presented paper analyzes the oil film parameters between the upper compression ring and cylinder liner of „downsized” engine and compares these parameters with analogue ones of a regular gasoline engine of comparable power. High ring to cylinder pressure caused by gaseous forces at low piston speed leads to two disadvantageous phenomena, namely the drop in oil film minimum thickness and an increase in friction force. The paper presents an analysis of both parameters and the assessment of their scale. A minor effect of „downsizing” on ring-cylinder friction power has been established, which is confirmed by the producers’ data concerning fuel consumption [4].

Keywords: combustion engines, engine pistons, oil film, „downsizing”

CZY „DOWNSIZING” OGRANICZA TRWAŁOŚĆ ZESPOŁU TŁOK – CYLINDER?

Streszczenie

Tłokowe silniki spalinowe napędzające samochody osobowe nie są rozwiązaniami idealnymi ale jak na razie nie istnieje konkurencyjny silnik, który mógłby zastąpić w zauważalnym procencie ten - nie pozbawiony wad - rodzaj napędu. Istnieje natomiast ostra konkurencja między dwoma rodzajami zapłonu w tłokowych silnikach spalinowych. Aktualnie może ograniczyć ekspansję silników o zapłonie samoczynnym (ZS) silnik o zapłonie iskrowym (ZI) poddany procesowi tzw. „downsizing’u” [4]. Taki silnik wykazuje jednostkowe zużycie paliwa zbliżone do silnika ZS zachowując podstawowe zalety silnika ZI. Podstawowa zaleta to generowanie maksymalnego momentu obrotowego już od prędkości obrotowej ok. 1500 [obr/min] i utrzymywanie tego momentu do 3500 [obr/min] dla silnika pracującego w zakreśi 850-5000 [obr/min]. Taka, bardzo korzystna charakterystyka momentu silnika wykorzystywanego do napędu samochodu, może jednak prowadzić do ograniczenia trwałości zespołu tłok cylinder. Duża wartość momentu przy niewielkiej prędkości obrotowej stwarza niekorzystne warunki współpracy górnego pierścienia uszczelniającego z gładzią cylindra.

W artykule przeanalizowano parametry filmu olejowego między górnym pierścieniem uszczelniającym a gładzią cylindra silnika „downsizing’owanego” oraz porównano te parametry z analogicznymi parametrami klasycznego silnika ZI o zbliżonej mocy znamionowej. Duży nacisk pierścienia na gładź cylindra wywołany siłami gazowymi przy niewielkiej prędkości ruchu tłoka powoduje dwa niekorzystne zjawiska, a mianowicie zmniejsza się minimalna grubość filmu olejowego oraz zwiększa się siła tarcia. W artykule przeanalizowano oba parametry a zarazem oceniono skalę przytoczonych zjawisk. Potwierdzono niewielki wpływ „downsizing,u” na moc tarcia pierścieni o gładź cylindra, co potwierdzają dane producentów dotyczące zużycia paliwa [4].

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, tłok, film olejowy, „downsizing”

1. Specyfika parametrów pracy silnika w warunkach „downsizing’u”

Określenie „downsizing” weszło na trwałe do terminologii silników spalinowych, przy czym, jak dotychczas nie została przyjęta jednoznaczna definicja silnika, w którym reguły „redukcji wymiarowej” zastosowano. Wydaje się jednak, że nie budzi większych zastrzeżeń definicja zaproponowana przez zespół firmy MAHLE [2], która w dużym skrócie określa „downsizing” jako połączenie tendencji jednoczesnego zmniejszania pojemności skokowej silnika z redukcją zużycia paliwa i emisji CO₂ przy równoczesnej poprawie dynamiki silnika. Dynamika zawiera się przede wszystkim w uzyskaniu przebiegu momentu gwarantującego stałą moc rozwijaną przez silnik. Ponieważ przy stałej prędkości obrotowej moment jest proporcjonalny do odwrotności prędkości obrotowej przebieg krzywej momentu na charakterystyce zewnętrznej silnika zaprojektowanego zgodnie z regułami „downsizing’u” jest hiperboliczny. Oczywiście takiego przebiegu nie można uzyskać w całym zakresie użytkowych prędkości obrotowych. Aby jednak uniknąć spadku momentu obrotowego wraz ze zmniejszaniem prędkości obrotowej przyjmuje się takie działanie silnika, które daje stały moment w szerokim przedziale jego pracy - Rys. 1 [3].



Rys. 1. Charakterystyka zewnętrzna silnika TSI doładowanego sprężarką mechaniczną i turbosprężarką
 Fig. 1. Full power characteristics of the TSI engine supercharged with compressor and turbocharger

Uzyskiwanie dużego momentu już dla niewielkich prędkości obrotowych prowadzi do znacznego docisku pierścieni do gładzi cylindra przy ograniczonym efekcie poślizgu wywołującym zjawisko filmu olejowego. Z drugiej strony istotą „downsizing’u” jest użytkowanie silnika właśnie w obszarze niskich prędkości obrotowych i zarazem przy dużych wartościach momentu obrotowego, co pozwala przekazywać na koła pojazdu moc wymaganą dla uzyskania odpowiedniej dynamiki jazdy.

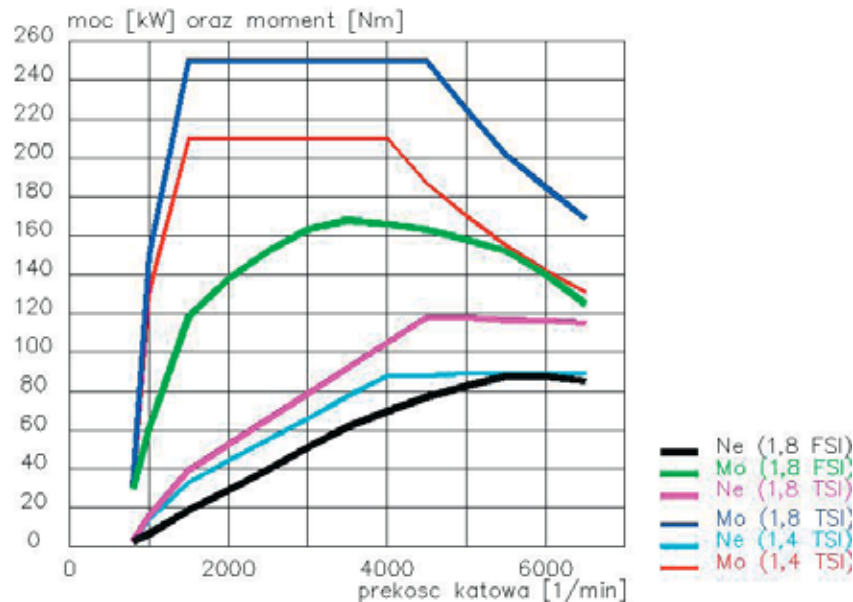
2. Przebieg zmian ciśnienia w cylindrze w warunkach „downsizing’u”

Ciśnienie w cylindrze uwarunkowane jest w dużym stopniu specyfiką „downsizing’u”, jednak dla określenia sił gazowych dociskających pierścieni do gładzi cylindrowej nie jest wymagana znajomość szczegółów dotyczących procesu formowania ładunku. Wystarczy zatem określenie parametrów głównych obiegu tj.: stopnia sprężania ϵ , stopnia przyrostu ciśnienia ϕ , stopnia przyrostu objętości ρ wykładników politrop n_1 i n_2 , oraz ciśnienia ładowania p_d i wylotu p_w .

Powyższe parametry zostały dobrane w ten sposób aby uzyskać moce odczytane z charakterystyki zewnętrznej przedstawionej na Rys. 2.

W celach porównawczych na Rys. 2 zamieszczono również charakterystykę silnika FSI o mocy maksymalnej równej 88 kW tj. w przybliżeniu takiej jaką rozwija silnik TSI-1.4 oraz charakterystykę silnika TSI-1.8, czyli o pojemności takiej jaką przyjęto dla silnika FSI. Jako punkty krytyczne przyjmuje się momenty rozwijane przez wszystkie analizowane silniki przy

prędkości obrotowej równej 1500 [1/min]. Silniki TSI rozwijają już przy prędkości obrotowej 1500 [1/min] maksymalne wartości momentu obrotowego, tj.: silnik TSI1.4 - moment 210 [Nm] a silnik TSI-1.8 - moment 250 [Nm]. Dla tak niskiej prędkości obrotowej porównawczy silnik FSI rozwija moment 120 [Nm]. Wymienione momenty obrotowe w przeliczeniu na moc silnika dają odpowiednio wartości 40, 33 i 20 [kW]. W dalszej części opracowania przeprowadzono analizę głównych parametrów filmu olejowego na gładzi cylindrowej mogące mieć wpływ na trwałość i niezawodność silnika spalinowego w kontekście jego doładowania związanego z „downsizing’iem”.



Rys. 2. Charakterystyki zewnętrzne silników 1.4-TSI, 1.8-TSI oraz 1.8 FSI
Fig. 2. Full power characteristics of the 1.4-TSI, 1.8-TSI and 1.8-FSI engines

3. Analiza parametrów filmu olejowego w silnikach ZI doładowanych i wolnossących

W zasadzie nie można określić zmian wszystkich parametrów pracy silnika wynikających z jego doładowania. Zwykle na trwałość i niezawodność silnika wpływa minimalna grubość filmu olejowego występująca po GMP w suwie rozprężania. Od minimalnej grubości filmu olejowego w tym punkcie w dużym stopniu zależy siła tarcia pierścieni o gładź cylindra. Pośrednio doładowanie silnika wpływa też na średnią moc tarcia N_R w całym cyklu pracy silnika a także na jednostkowe zużycie oleju g_{ol} .

Wymienione parametry przeanalizowano dla różnego stopnia doładowania silnika o pojemności 1.4 dm³ oraz 1.8 dm³. Porównanie parametrów pracy silnika dla wymienionych pojemności wynika z podobnej mocy maksymalnej uzyskiwanej z silnika 1.4 ZI doładowanego i 1.8 ZI wolnossącego. Wyniki zestawiono w Tab. 1.

Wszystkie symulacje zestawione w Tab. 1 przeprowadzono dla prędkości obrotowej równej 1500 [obr/min].

Przed przeprowadzeniem analizy wyników zestawionych w powyższej tabelicy zostanie w zarysie wyjaśniona zasada oszacowania wybranych parametrów. Szerszy opis przeprowadzonych symulacji komputerowych opisany jest w literaturze [1].

W tłokowym silniku spalinowym występuje istotna współzależność parametrów filmu olejowego tworzonego kolejno przez: powierzchnię boczną tłoka, pierścień zgarniający, dolny pierścień uszczelniający oraz ostatecznie - górny pierścień uszczelniający. Najbardziej wrażliwy na doładowanie silnika jest górny pierścień uszczelniający, co wynika z bezpośredniego oddziaływania ciśnienia w komorze spalania na ten pierścień. W przypadku skutecznego działania uszczelniającego górnego pierścienia w zasadzie dolny pierścień tworzy film olejowy

w niewielkim stopniu zależny od ciśnienia w komorze spalania a więc również od stopnia doładowania silnika. Na Rys. 3 przedstawiono przebieg głównych parametrów filmu olejowego tworzonego przez górny pierścień uszczelniający w silniku 1.4 FSI, a więc niedoładowanym, a na Rys. 4 te same przebiegi uzyskane w silniku doładowanym TSI - punkt 1 i 3 Tab. 1.

Tab. 1. Zestawienie głównych parametrów filmu olejowego oraz parametrów pochodnych
Tab. 1. Comparison of oil film principal parameters and derived ones

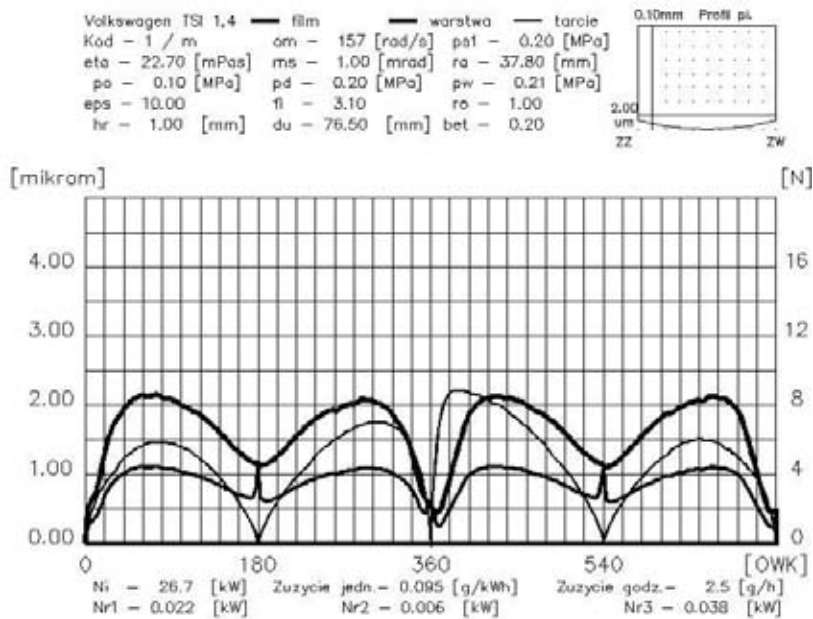
	Rodzaj silnika	φ	Z[365]	g_{ol}	N_{Rp1}	V2/V4	R[380]
	2	3	4	5	6	7	8
		-	[μm .]	[g/kWh]	[W]	[mm^3]	[N]
1	1.4 FSI 27 kW	3.1	0.448	0.10	22	0.008 0.007	8.7
2	1.4 TSI 34 kW	3.7	0.425	0.07	22	0.008 0.008	9.5
3	1.4 TSI 44 kW	4.4	0.397	0.06	22	0.007 0.009	10.3
4	1.8 FSI 27 kW	2.7	0.463	0.10	24	0.009 0.008	9.3
5	1.8 TSI 34 kW	3.5	0.431	0.07	25	0.009 0.009	10.4
6	1.8 TSI 54 kW	4.3	0.398	0.06	25	0.008 0.010	11.5

Porównując przebiegi na Rys. 3-4 można zauważyć duże podobieństwo charakteru krzywych. Jedyne siła tarcia w obszarze tuż po GMP w suwie rozprężania jest istotnie większa dla silnika doładowanego - Rys. 4. Doładowanie prowadzi również do zmniejszenia grubości filmu olejowego w analizowanym obszarze. Pełne wyniki analiz przedstawiono w Tab. 1. W kolumnie 2 zestawiono silniki oraz uzyskiwane moce indykowane a w kolumnie 3 przedstawiono wartości stopnia przyrostu ciśnienia. Wyniki symulacji komputerowej przedstawiono w kolejnych kolumnach, a mianowicie:

- w kolumnie 4 - grubość filmu olejowego 5° po GMP w suwie rozprężania,
- w kolumnie 5 - jednostkowe zużycie oleju wynikające z wyciskania oleju przez górny pierścień uszczelniający w kierunku komory spalania,
- w kolumnie 6 - moc tarcia górnego pierścienia o gładź cylindra,
- w kolumnie 7 - objętości oleju wyciśniętego w kierunku komory spalania w GMP,
- w kolumnie 8 - wartość siły tarcia 10° po GMP w suwie rozprężania.

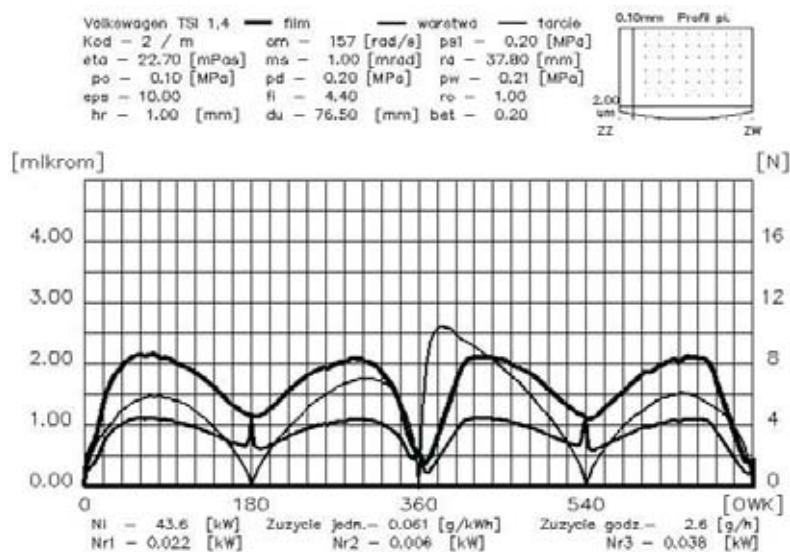
Chcąc ocenić skutki „downsizing’u” na trwałość i niezawodność pracy silnika należałoby w zasadzie porównać parametry filmu olejowego w poz. 3 i 4 Tab. 1. Silnik FSI 1.8 niedoładowany rozwija przy prędkości obrotowej 1500 [obr/min] znacznie mniejszą moc maksymalną niż silnik TSI 1.4 - doładowany, ale przy większych prędkościach można uzyskać w przypadku obu silników podobną moc około 90 kW.

Z kolumny 4 Tab. 1 wynika, że „downsizing” prowadzi do wyraźnego zmniejszenia minimalnej grubości filmu olejowego osiąganego około 5° po GMP. Zmniejszenie grubości filmu olejowego z wartości 0,463 do wartości 0,397 to spadek o 15%. Bez długotrwałych badań zużyciowych trudno jednoznacznie określić, czy najmniejsza grubość filmu olejowego w cyklu pracy silnika wynosząca około 0,4 μm jest już wartością krytyczną, ale w połączeniu z dużymi obciążeniami cieplnymi silnika można się spodziewać wzmożonego zużycia gładzi w pobliżu GMP górnego pierścienia uszczelniającego w silniku poddanym „downsizing’owi”.



Rys. 3. Przebiegi: grubości filmu olejowego - linia najgrubsza, grubości warstwy oleju pozostawianego na gładzi cylindrowej - linia o pośredniej grubości oraz siły tarcia - linia najcieńsza; symulację komputerową przeprowadzono dla górnego pierścienia uszczelniającego w silniku niedoładowanym przy prędkości obrotowej 1500 [obr/min]

Fig.3. Courses of oil film thickness - bold line, thickness of oil layer left on cylinder surface - medium line, friction force - thin line; computer simulation carried out for upper compression ring of naturally aspirated engine, 1500 rpm



Rys. 4. Przebiegi: grubości filmu olejowego - linia najgrubsza, grubości warstwy oleju pozostawianego na gładzi cylindrowej - linia o pośredniej grubości oraz siły tarcia - linia najcieńsza; symulację komputerową przeprowadzono dla górnego pierścienia uszczelniającego w silniku doładowanym przy prędkości obrotowej 1500 [obr/min]

Fig. 4. Courses of oil film thickness - bold line, thickness of oil layer left on cylinder surface - medium line, friction force - thin line; computer simulation carried out for upper compression ring of supercharged engine, 1500 rpm

Zmniejszenie grubości filmu olejowego w pobliżu GMP prowadzi do zwiększenia siły tarcia pierścienia o gładź cylindra. Jak wynika z wartości zestawionych w kolumnie 8 Tab. 1 w silniku FSI - 1.8 wartość siły tarcia wynosi 9,3 N a w silniku TSI-1.4 – 10,3 N. Moc tarcia w wyniku „downsizing’u” zwiększa się zatem o 10%. Ponieważ jedna obszar zwiększonej siły tarcia jest niewielki to moc tarcia w całym cyklu pracy praktycznie nie zależy od stopnia doładowania. To

sposrozezenie wyniku z porownania wartosci w 6 kolumnie Tab. 1 dla silnika 1.4 - poz. 1 do 3 oraz dla silnika 1.8 - poz. 4 do 6.

Istotnym skutkiem dociskania gornego pierścienia uszczelniajacego do gladzi cylindra silami gazowymi jest wyciskanie oleju w kierunku komory spalania, objawiajace sie jego zużyciem. Objętości oleju wycisniete w GMP zestawiono w kolumnie 7. Po przeliczeniu tych objętości na jednostkowe zużycia oleju otrzymuje sie wartosci zestawione w kolumnie 5. Analizujac uzyskane wyniki mozna dojsc do wniosku, ze wzrost stopnia doładowania powoduje zmniejszenie zużycia oleju. Jest to jednak wniosek nieuzasadniony gdyz zmniejszenie g_{ol} wynika ze wzrostu mocy silnika. Godzinowe zużycia oleju będace proporcjonalne do sumy objętości oleju V2 i V4 zmieniaja sie w sposob nieistotny a to oznacza, ze doładowanie silnika w niewielkim stopniu wplynie na godzinowe zużycie oleju przez silnik. Z prostego rozumowania wynika, ze „downsizing” silnika samochodowego nie spowoduje istotnej zmiany zużycia oleju smarujacego określonego dla przejechanego dystansu np. 10000 km.

4. Wnioski

1. Dość powszechne oferowanie przez renomowanych producentów samochodów osobowych doładowanych silników ZI w kontekście „downsizing’u” może skutkować zmniejszeniem żywotności jednostki napędzającej w takim pojeździe.
2. Silniki poddane „downsizing’owi” nie będą wykazywały istotnego zwiększenia zarówno zużycia oleju smarujacego jak i zwiększenia strat tarcia wyrażonych mocą pochłanianą na pokonanie tarcia wewnętrznego w filmie olejowym.

Literatura

- [1] Iskra, A., *Studium konstrukcji i funkcjonalności pierścieni w grupie tłokowo-cylindrowej*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej - Poznań 1966.
- [2] Korte, V., et al., *Downsizing-Motor von Mahle als Technologiedemonstrator*, Konzept, Auslegung und Konstruktion, MTZ 01/2008.
- [3] Krebs, R., et al., *Neuer Ottomotor mit Direkteinspritzung und Doppelaufladung von Volkswagen*, MTZ 11/2005.
- [4] Szengel, R., et al., *Der TSI-Motor mit 90 kW - Erweiterung der verbrauchsgünstigen Ottomotoren-Baureihe von Volkswagen*, MTZ 07-08/2007.