

TRENDS OF DEVELOPMENT OF PISTONS OF TRACTION ENGINES

Wiesław Kozaczewski

Przemysłowy Instytut Motoryzacji
03-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 55
tel: +48(22) 6750556, fax: +48(22) 8116028
e-mail: w.kozaczewski@chello.pl

Abstract

Basic trends of development of pistons of traction engines were discussed in the report in the last period. Development of engines is being forced in the last period chiefly with aiming at fulfilling requirements in the field of the toxic emission. It didn't lose at the same time on meant aiming at raising the property of application engines that means of their specific output and of raising their efficiency. It is extracted by increasing of efficiency from internal combustion engines on the one hand with need to reduce expenses of their operating, from on the other hand with aiming at limiting the emission of the carbon dioxide.

NOWOCZESNE KONSTRUKCJE TŁOKÓW SILNIKÓW SAMOCHODOWYCH

Streszczenie

W referacie omówiono podstawowe kierunki rozwoju tłoków silników trakcyjnych w ostatnim okresie. Rozwój silników wymuszony jest w ostatnim okresie głównie dążeniem do spełnienia wymagań w zakresie dopuszczalnej emisji składników toksycznych spalin. Jednocześnie nie straciło na znaczeniu dążenie do podniesienia właściwości użytkowych silników to znaczy ich mocy jednostkowych jak i podnoszenia ich sprawności. Zwiększenie sprawności silników spalinowych wymuszone jest z jednej strony koniecznością zmniejszenia kosztów ich eksploatacji, z drugiej strony dążeniem do ograniczenia emisji dwutlenku węgla.

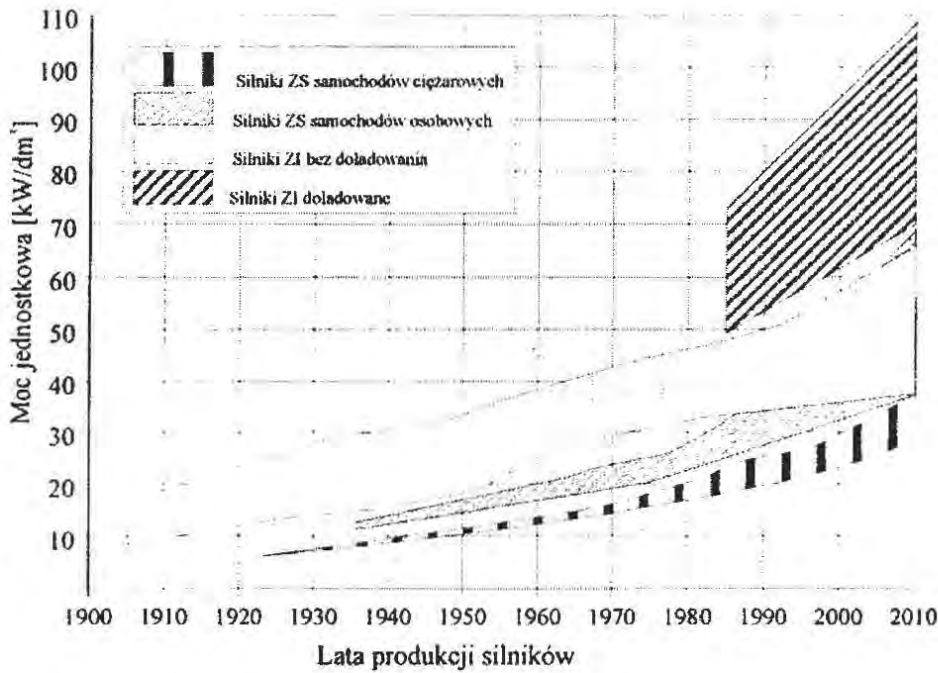
1. Warunki pracy

Tłok jest elementem silnika, który decyduje o możliwości zamiany energii cieplnej otrzymanej w procesie spalania paliwa we wnętrzu cylindra na pracę mechaniczną i podlega bardzo różnym obciążeniom pochodzącym z różnych źródeł.

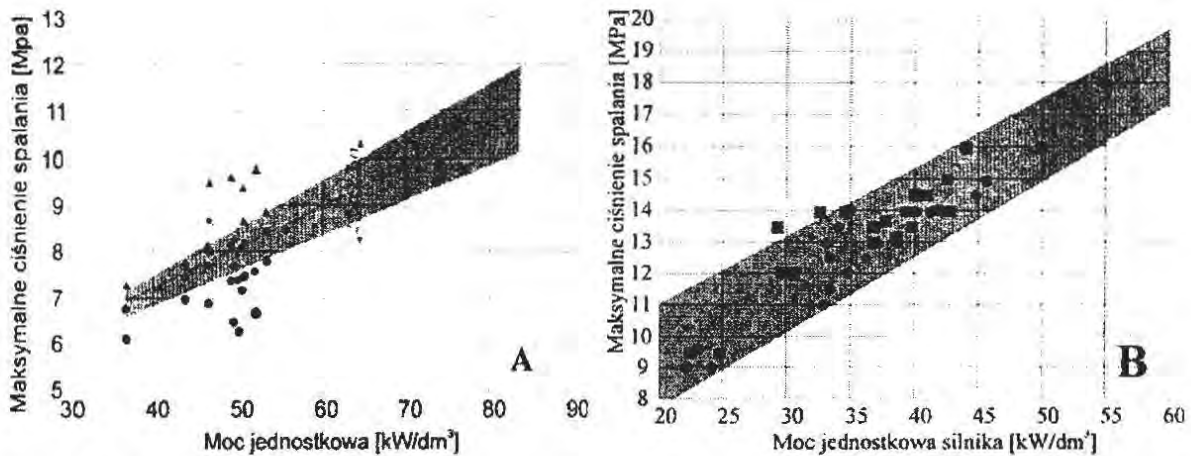
Spalanie realizowane w przestrzeni nad tłokiem generuje ciśnienie, które zmienia się podczas każdego cyklu pracy, obciążające bezpośrednio denko tłoka. Te zmienności obciążenia powtarzają się przez cały okres życia silnika. Spalanie jest również przyczyną powstawania naprężeń cieplnych w materiale tłoka. Również ruch posuwisto-zwrotny tłoka jest przyczyną powstawania obciążeń wywołanych zmiennością sił bezwładności. Generalnie można stwierdzić, że tłok jest obciążony mechanicznie i termicznie naprężeniami zmieniającymi się z częstotliwością związaną z powtarzalnością cykli jego pracy i można przyjąć iż są to obciążenia szybkozmienne. Poza tym obciążenia zarówno mechaniczne jak i termiczne tłoków zmieniają się w związku ze obciążeniami silnika, to znaczy w związku ze zmianą prędkości obrotowej wału korbowego silnika i momentu obrotowego generowanych przez silnik. Te zmiany obciążeń tłoka można uznać jako wolno zmienne.

Wymagania rynku powodują iż trwałość silników, o której w pierwszym rzędzie decyduje trwałość tłoka i gładzi cylindrowej, musi stale wzrastać mimo stałego wzrostu wymagań w zakresie mocy jednostkowej silnika, zmniejszania jednostkowego zużycia paliwa i stałego zmniejszania emisji składników toksycznych spalin. Powoduje to iż w konstrukcji tłoków konieczne jest uwzględnianie coraz większej liczby uwarunkowań. Prowadzi to do po-

wszechnego korzystania w procesie konstrukcji tłoków najnowszych metod i programów pozwalających na analizę zarówno zjawisk cieplnych jak i obciążeń mechanicznych tłoków w warunkach ich pracy.



Rys. 1. Wzrost mocy jednostkowej silników trakcyjnych na przestrzeni XX w.
Fig. 1. Growing of engine specific output in XX century



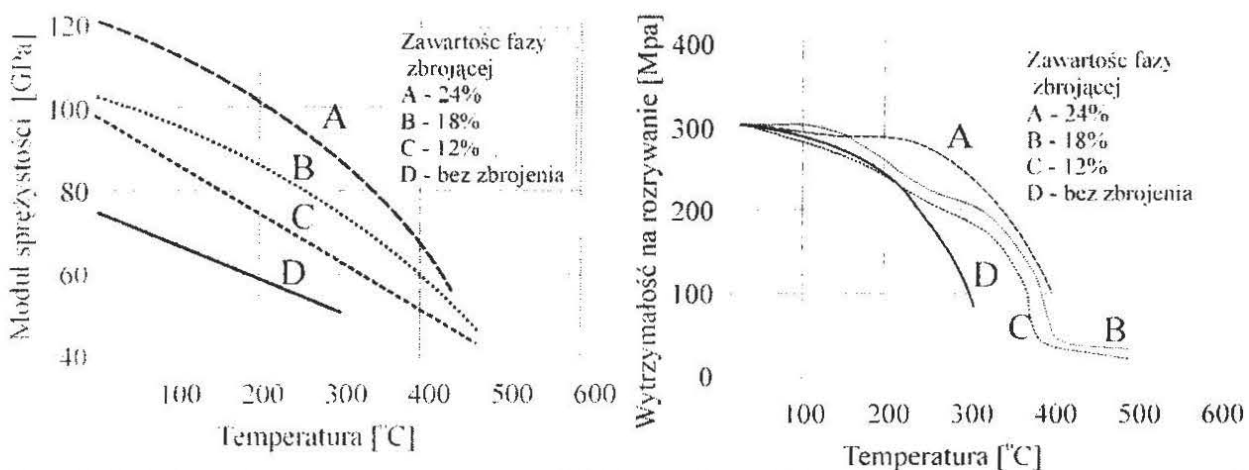
Rys. 2. Zależność maksymalnego ciśnienia spalania od mocy jednostkowej silnika o zapłonie iskrowym (A) i dla o zapłonie samoczynnym (B)
Fig. 2. Maximum combustion pressure versus specific power output of spark ignition engines (A) and diesel engines (B)

W ostatnim okresie rozwoju trakcyjnych silników tłokowych nastąpił znaczny wzrost ich mocy jednostkowych i to zarówno silników o zapłonie iskrowym jak i silników o zapłonie samoczynnym. Przykładowy wzrost mocy jednostkowej silników przedstawiony jest na rys. 1. Ten wzrost mocy jednostkowej silników związany był zarówno ze wzrostem prędkości obrotowych wału korbowego przy pracy z mocą znamionową, a więc i średnimi prędkościami tłoków, jak i ze wzrostem maksymalnych ciśnień występujących w procesie spalania. Przykładową zależność maksymalnego ciśnienia spalania od mocy jednostkowej silników o za-

plonie iskrowym i o zaplonie samoczynnym przedstawiono na rysunku 2. W samochodowych silnikach o zaplonie samoczynnym wzrost mocy jednostkowych wystapil zarowno na skutek powszechnego wprowadzenia systemu wtrysku bezposredniego, a w ostatnim okresie rowniez systemu Common Rail (CR), jak i znacznego wzrostu prędkości obrotowych przy mocach znamionowych tych silników. Maksymalne ciśnienia spalania silników o zaplonie samoczynnym są znacznie wyższe niż dla silników o zaplonie iskrowym. Najwyższe ciśnienia maksymalne spalania występują w silnikach stanowiących główne źródło napędu statków lub dużych agregatów prądowców. Spełnienie wymagań odnośnie trwałości tłoków oraz jednocześnie spełnienie oczekiwań użytkowników w zakresie ekonomii i komfortu eksploatacji silników oraz spełnienie wymagań ustawodawców w zakresie właściwości ekologicznych silników wymagało w ostatnim okresie zmian zarówno w zakresie konstrukcji tłoków jak i stosowanych do ich wykonania materiałów.

2. Materiały

W silnikach o zaplonie iskrowym stosowanych powszechnie jako źródła napędu samochodów osobowych dzięki stosowaniu elektronicznie sterowanych układów zasilania i zaplonu możliwe jest takie regulowanie silników aby pracowały one większość czasu na granicy spalania detonacyjnego, co jest korzystne z punktu widzenia sprawności silnika. Związane jest to jednak z występowaniem ekstremalnie wysokich ciśnień spalania jakie nie występowały poprzednio. Takie wysokie ciśnienia spalania i duża dynamika jego narastania powoduje bardzo znaczne zużycia ścian rowków, w których osadzany jest pierwszy pierścień uszczelniający. Należy również zwrócić uwagę, że w uszczelnieniu pierścieniowym, które obecnie składa się w silnikach samochodowych z dwóch pierścieni uszczelniających spadek ciśnienia na pierwszym pierścieniu stanowi około 75% ciśnienia panującego nad tłokiem. W związku z tym oprócz siły własnej sprężystości pierścień dociskany jest do gładzi cylindra ciśnieniem stanowiącym różnicę ciśnień panujących nad i pod nim.

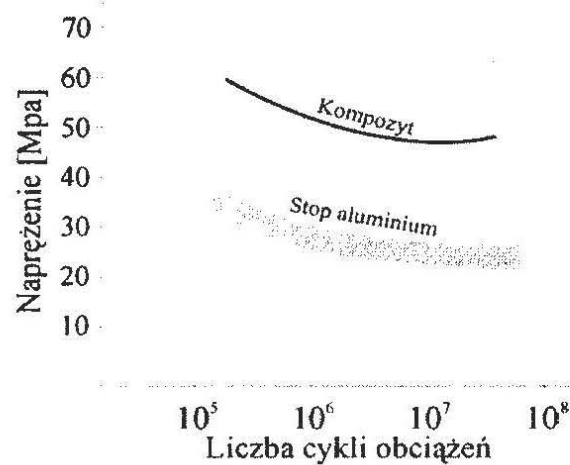


Rys. 3. Zależność modułu sprężystości i wytrzymałości na rozciąganie kompozytu ze stopu aluminium wzmocnionego włóknami Saffil

Fig. 3. Young's modulus and tensile strength versus temperature of composite made from Saffil fibre in aluminium alloy.

Ze względu na dążenie do zmniejszenia objętości pomiędzy boczną powierzchnią części pierścieniowej tłoka położoną nad pierwszym pierścieniem, a gładzi cylindra, co jest podyktowane dążeniem do zmniejszenia emisji niespalonych węglowodorów, pierwszy pierścień uszczelniający jest umieszczany znacznie wyżej co skutkuje jego większym obciążeniem mechanicznym i cieplnym. Powoduje to znaczne przyspieszenie zużycia rowków

pierwszych pierścieni uszczelniających. Powiększające się zużycie rowków pierścienia powoduje powstawanie zarówno w pierścieniu, jak i półce podpierającej pierścień, wzrost obcią-



Rys. 4. Wyniki pomiarów wytrzymałości zmęczeniowej kompozytu na bazie stopu aluminium wzmocnionego 20% włóknami Satiff
 Fig. 4. Fatigue test data aluminium alloy with 20% Satiff fibre.

żeń dynamicznych wywołanych siłami bezwładności pierścieni, jak i od zmian ciśnienia, co w szybkim czasie może doprowadzić do pęknięcia pierścienia lub półki podpierającej go.

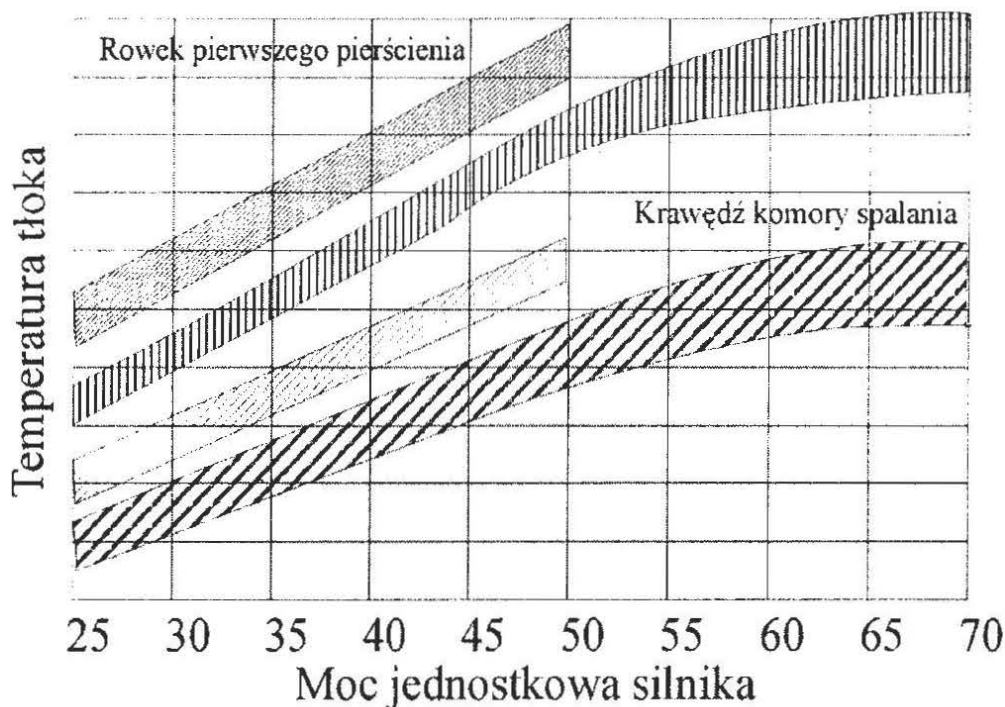
Wzrost ciśnień działających na pierwsze pierścienie uszczelniające oraz temperatur w ich rowkach powoduje w silnikach o zapłonie iskrowym występowanie zjawiska „mikro zgrzewania” pomiędzy powierzchniami bocznymi pierścienia a półka podpierająca pierścień. Zjawisko to polega na przenoszeniu materiału półki podpierającej pierścień na pierścień. Może to dotyczyć również drugich opierścieni uszczelniających silników o zapłonie samoczynnym jeśli jedynie rowek pierwszego pierścienia uszczelniającego wykonany jest we wkładce z żeliwa niklowego. Zmniejszenie zjawiska „mikrozgrzewania” można osiągnąć przez stosowanie nadeutektycznych stopów aluminium w miejsce stopów eutektycznych. Stosowanie stopów nadeutektycznych jest również korzystne ponieważ stopy te posiadają mniejszą gęstość przez co tłoki o takiej samej konstrukcji z tych stopów posiadają mniejszą masę niż tłoki wykonane ze stopów eutektycznych. Wadą stopów nadeutektycznych w odniesieniu dla silników o zapłonie iskrowym jest ich niższa przewodność cieplna przez co powoduje, że przy takiej samej konstrukcji, temperatury denka tłoka będą wyższe przez co wymagania silnika w zakresie liczby oktanowej paliwa wzrosną lub wymagane będzie opóźnienie kąta wyprzedzenia zapłonu co wiąże się ze wzrostem jednostkowego zużycia paliwa. Należy również wziąć pod uwagę fakt gorszej obrabialności stopów nadeutektycznych oraz trudności związane z ich gorszymi właściwościami odlewniczymi.

Cechą charakterystyczną stopów aluminium, stanowiących podstawowy materiał tłoków silników trakcyjnych, jest spadek ich właściwości mechanicznych wraz ze wzrostem temperatury. Powyżej temperatury około 350°C następuje szybki spadek wytrzymałości. Wraz ze wzrostem obciążeń silników wzrasta ilość ciepła wywiązywanego w cylindrze. Przy określonych współczynnikach przewodzenia ciepła materiałów tłoków powoduje to wzrost ich temperatur. W związku z tym następuje wyczerpanie możliwości wytrzymałościowych stopów aluminium jako tworzywa na tłoki silników. Na obecnym etapie rozwoju silników trakcyjnych, trudno jest zrezygnować ze stopów aluminium, których niska gęstość i wysoka przewodność cieplna stanowią bardzo cenne zalety. Podniesienie właściwości wytrzymało-

ściowych stopów aluminium, można uzyskać poprzez stworzenie na ich bazie materiałów kompozytowych. Jako zbrojenie stopów aluminium można stosować proszki ceramiczne, wiskery, włókna, krótkie lub długie na bazie grafitu węgla, boru oraz tlenków takich jak Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , węglików SiC , TiC , B_4C lub azotków Si_3N_4 . Zbrojenie może dotyczyć całej objętości (dyspersyjnie) lub miejscowo przez zastosowanie preformy wykonanej z włókien lub wiskerów.

Wpływ zbrojenia kompozytu na bazie stopów aluminium na moduł sprężystości, wytrzymałość na zginanie oraz na wytrzymałość zmęczeniową w funkcji temperatury pokazują rysunki 3, 4 i 5. Tłoki z materiałów kompozytowych wykonuje się z reguły metodą prasowania płynnego metalu.

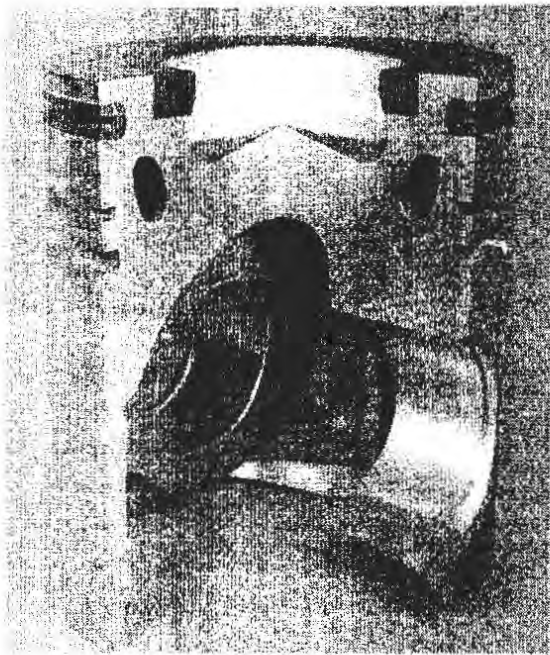
3. Konstrukcja



Rys. 5. Zależność temperatury krawędzi komory spalania oraz rowka pierwszego pierścienia od mocy jednostkowej silnika

Fig. 5. Depending temperatures of bowl edge and first groove of the specific engine power output.

Najbardziej obciążonymi obszarami tłoków silników o zapłonie samoczynnym jest krawędź komory spalania oraz rowek pierwszego pierścienia uszczelniającego. Zależność temperatury tych rejonów tłoka w funkcji mocy jednostkowej silnika pokazany jest na rysunku 5. Dotychczas wzmacniano te miejsca tłoków przez zalewanie wkładek z żeliwa niklowego metodą Al-Fin. Obecnie możliwe jest wzmocnienie tłoków wstawianymi w kokilę preformami ceramicznymi. Przykład tak wzmocnionych tłoków pokazano na rysunku 6. Szczególnie istotne jest wzmocnienie krawędzi komory spalania umieszczonej w tłoku silników z wtryskiem bezpośrednim. Ze względu na bardzo wysokie temperatury występujące w tych częściach tłoków oraz istotne zmiany temperatury krawędzi w obszarze jednego cyklu roboczego, krawędź ta jest szczególnie narażona na pęknięcie zmęczeniowe wywołane zmiennością naprężeń termicznych. Ze względu na bardzo wysoką twardość fazy zbrojącej materiały kompozytowe wykazują również wysoką odporność zużyciową. Niestety ta wysoka twardość fazy zbrojącej powoduje bardzo złą obrabialność materiałów kompozytowych co stanowi istotną barierę w ich rozpowszechnieniu.



Rys. 6. Tłok ze krawędzią komory spalania i rowkiem pierwszego pierścienia wzmocnioną kompozytem
 Fig. 6. Piston with bowl edge and groove first ring reinforced by metal matrix composites

Zmniejszenie temperatur występujących na krawędziach komór spalania silników o zapłonie samoczynnym z wtryskiem bezpośrednim można również uzyskać przez wykorzystanie chłodzenia tłoków poprzez natrysk oleju na wewnętrzną powierzchnię denka tłoka z dyszy umieszczonych w dolnej części komory korbowej. Dla pełnego wykorzystania tej metody chłodzenia, konieczne jest wykonanie w tłoku kanału olejowego do którego będzie wtryskiwany olej. Przykład konstrukcji takiego tłoka pokazany jest na rysunku 6. Kanał taki formowany jest w odlewie tłoka rdzeniem solnym wypłukiwanym po ostygnięciu odlewu. Dzięki temu, że nie cała objętość kanału wypełniona jest olejem intensywność przejmowania ciepła jest znacznie większa niż w przypadku wypełnienia kanału całkowicie. Przez optymalizację przekrojów kanału chłodzącego na obwodzie można uzyskać obniżenie temperatury krawędzi komory spalania nawet do 10°C a rowka pierwszego pierścienia uszczelniającego nawet o 15°C w stosunku temperatur uzyskiwanych przy kanale o stałym przekroju.

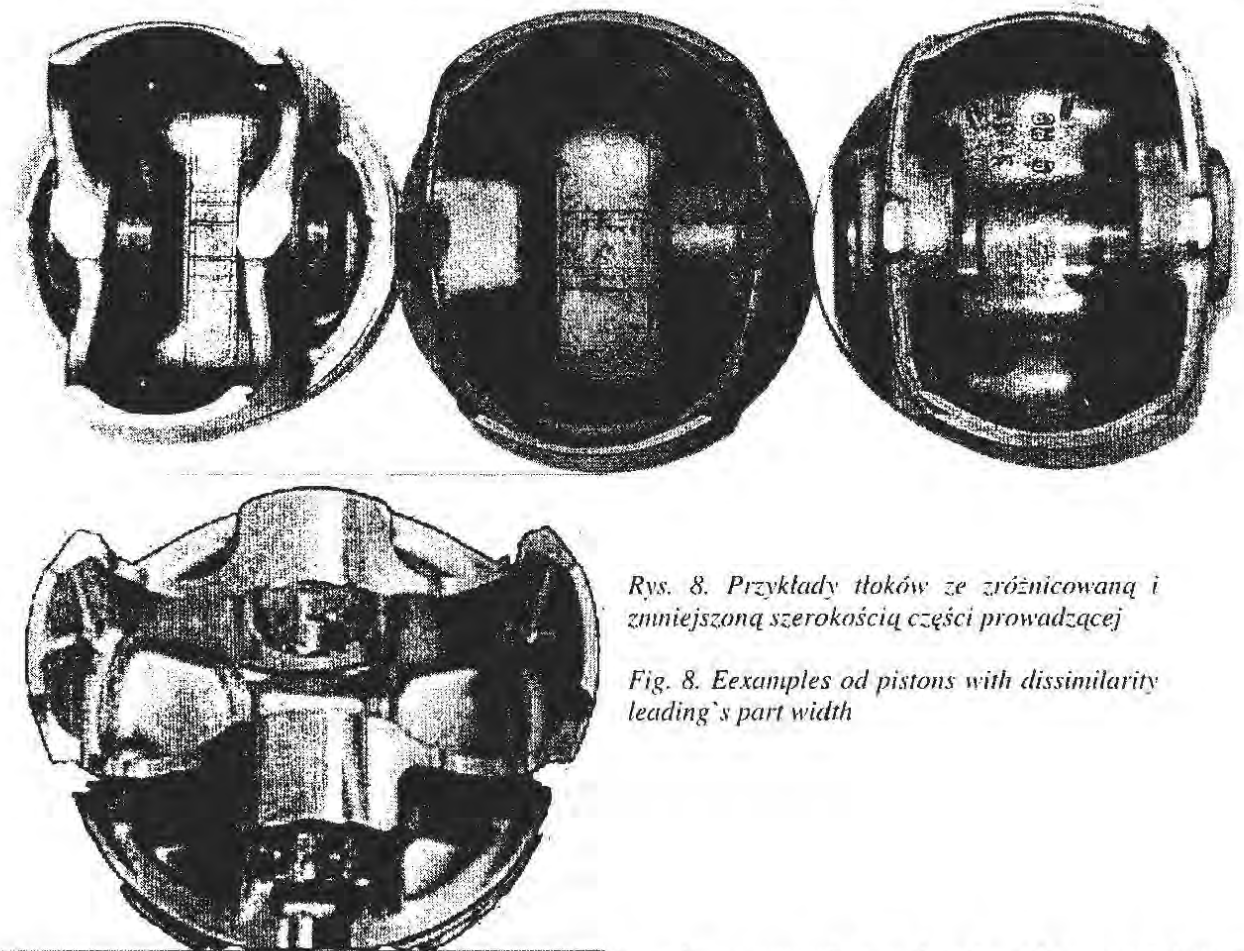


Rys. 7. Względna gęstość tłoka w zależności od stosunku wysokości części uszczelniającej tłoka do jego średnicy.
 Fig. 7. Apparent density of the piston in relation to relative compression height

Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wału korbowego silnika rosną siły bezwładności działające na układ korbowo-tłokowy. Szczególnie w przypadku silników o zapłonie iskrowym, które moc znamionową osiągają przy prędkościach obrotowych wału korbowego nawet powyżej 6000 obr/min siły bezwładności tłoków są szczególnie istotne. Z jednej strony zmniejszenie masy tłoka pozwala na zmniejszenie przeciwcieżarów wału korbowego, ale jednocześnie zmniejszają siły bezwładności działające na sworzeń tłokowy i jego łożyskowanie jak i na korbowód. Tak więc dążenie do zmniejszanie masy tłoka jest jednym z podstawowych kierunków decydujących o jego konstrukcji, w odniesieniu do silników o zapłonie iskrowym. Masa tłoka uzależniona jest od wysokości jego części pierścieniowej. Wskaźnikiem charakteryzującym masę jednostkową tłoka przyjmuje się stosunek jego masy do trzeciej potęgi średnicy cylindra w centymetrach. Zależność tego wskaźnika dla różnych rodzajów silników o zapłonie iskrowym od stosunku wysokości części uszczelniającej tłoka do jego średnicy według firmy KOLBENSCHMIDT przedstawiono na rysunku 7.

Ze względu na znaczny postęp w technologii wykonania gładzi cylindrowej oraz poprawą właściwości olejów smarnych możliwe jest znaczne skrócenie długości części prowadzącej tłoka oraz szerokości części bocznych części prowadzącej przenoszących siły boczne tłoka na gładź cylindra. Powszechnie obecnie stosowane jest różnicowanie szerokości części prowadzącej tłoka po obu jego stronach (rys 8).

Z przedstawionego powyżej przeglądu wynika, że postęp w konstrukcji silników trakcyjnych następuje zarówno w zakresie ich parametrów użytkowych jak i ekologicznych. Uzyskanie znacznego podwyższenia mocy jednostkowej silników podwyższenia ich spawno-



Rys. 8. Przykłady tłoków ze zróżnicowaną i zmniejszoną szerokością części prowadzącej

Fig. 8. Examples of pistons with dissimilarity leading's part width

ści przy spełnieniu jednocześnie coraz ostrzejszych wymagań w zakresie toksyczności emitowanych spalin wymaga znacznego postępu technologicznego i konstrukcyjnego w zakresie elementów decydujących zarówno o właściwościach jak i o trwałości silników.

4. Podsumowanie

Dokonany powyżej przegląd tendencji w konstrukcji tłoków silników samochodowych dowodzi, że dla sprostania coraz większym wymaganiom stawianym silnikom samochodowym w zakresie w szczególności obniżenia emisji składników toksycznych spalin oraz stałego dążenia do zmniejszenia zużycia paliwa zarówno ze względu na dążenie do obniżania kosztów eksploatacji jak co w ostatnich okresach ważniejsze dla zmniejszenia emisji dwutlenku węgla konieczne są działania wielokierunkowe.

Obserwowany znaczny postęp technologiczny w ostatnim okresie pozwala mieć nadzieję iż silnik spalinowy w obecnej postaci posiada jeszcze pewien zapas możliwości rozwojowych co pozwoli na stosowanie go jako źródła napędu samochodów przez najbliższe dziesięciolecie.

Postęp w zakresie inżynierii materiałowej pozwala mieć uzasadnione nadzieje na dalsze doskonalenie silników zarówno pod względem ich sprawności jak i niezawodności i żywotności.

Literatura

- [1] Raumo Turunen : Extreme value of the Piston Engine, test Engine for Extreme Value Research. Helsinki University of Technology, Internal Combustion Engine Laboratory, Espoo. Finland
- [2] Jose Valentin, L. Sarabanda, Everthon Rosas, Gustavo Ferra : Piston designn . Automotive Engineering June 1993.
- [3] Materiały firmowe KOKBESCHMIDT
- [4] Materiały firmowe MAHLE