

## INVESTIGATIONS OF NOVEL PISTON MATERIALS WITH CONTROLLED THERMAL EXPANSION AND HYSTERESIS

**Barbara Siemińska-Jankowska**

*Institute of Aeronautics*

02-256 Warszawa, Al. Krakowska 110/114,

tel. +48 22 8460801 w 618, fax +48 22 8464432

e-mail: ajank@ilot.edu.pl

### **Abstract**

*Comparison combustion test results for novel pistons manufactured from alloy on silumin base and together with alloy additives. The pistons were manufactured according to original technological process. Novel pistons have minimum hysteresis of thermal expansion coefficient, which allows on real decreasing working gaps between piston and cylinder in whole range of engine speed and loads. In the end of novel piston applying it is possible to obtain some both economical and ecological effects as well functional quality one. Main effects contain oil consumption decreasing, toxic compounds in exhaust gases and noise level, as well mechanical and thermal loads decreasing for piston set. Fundamental research methods run on a course results obtaining were dilatometric researches worked out in straight and differential modes, which allow obtaining novel heat treatment and precise temperature and time ranges as well dimension changes versus temperature and essential singularity points.*

*Keywords: combustion engines, piston, piston alloys, thermal expansion, hysteresis, ecology*

## BADANIA NOWYCH MATERIAŁÓW NA TŁOKI O KONTROLOWANEJ ROZSZERZALNOŚCI TERMICZNEJ I HISTEREZIE

### **Streszczenie**

*W artykule przedstawiono porównawcze wyniki badań silnikowych nowych tłoków wykonanych z materiału stopowego na bazie siluminu z pierwiastkami stopowymi. Tłoki wykonano według oryginalnego procesu technologicznego. Nowe tłoki charakteryzowały się minimalną histerezą współczynnika rozszerzalności termicznej, co pozwala na istotne zmniejszenie luzów roboczych między tłokiem a cylindrem w całym zakresie prędkości obrotowych i obciążeń silnika. W rezultacie zastosowania nowych materiałów na tłoki można uzyskać korzystne efekty zarówno ekonomiczne, jak i ekologiczne, a także użytkowe. Główne efekty odzwierciedlają się w zmniejszeniu zużycia oleju, zmniejszeniu poziomu emisji toksycznych składników spalin, zmniejszeniu poziomu emisji hałasu, a także zmniejszeniu obciążeń mechanicznych i termicznych węzła tłokowego. Główne oryginalne metody badawcze prowadzące do uzyskania efektów były badania dylatometryczne prowadzone w trybie prostym i różnicowym, które pozwoliły na opracowanie nowej obróbki termicznej oraz dokładne ustalenie zakresu temperatury i czasu, a także zmian wymiarów w funkcji temperatury i punktów osobliwych..*

*Słowa kluczowe: silniki spalinowe, tłoki, stopy tłokowe, rozszerzalność termiczna, histereza, ekologia*

### **1. Wstęp**

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat rozwój silników spalinowych został zdominowany przez rozwiązywanie szeroko pojętych problemów ekologicznych stosowania silników spalinowych. Z jednej strony dotyczy to toksyczności spalin emitowanych przez silniki spalinowe, a z drugiej strony oszczędności energii, przy czym ten ostatni problem należy rozpatrywać w pełnym cyklu, tzn. dotyczy on zarówno energii zużywanej w trakcie eksploatacji silnika, a więc przede wszystkim zużycia paliwa, jak i zużycia energii w procesie

produkcji silników. Powinno się więc dążyć do jak najmniejszego zużycia energii w procesie produkcyjnym, ale o zużyciu energii w pełnym cyklu będą decydowały także trwałość i niezawodność silników. Stąd dążenie producentów, aby wyprodukować silniki spełniające coraz ostrzejsze wymagania dotyczące poziomu emisji składników spalin, przy zapewnieniu dużej trwałości i niezawodności silników.

Tłoki silników spalinowych należą do tych elementów specjalistycznych, które mają istotny wpływ na ekologiczne właściwości silników, jak i ich trwałość i niezawodność. Materiały na tłoki powinny charakteryzować się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi i małą histerezą współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$  w całym zakresie wartości temperatury pracy, dużą odpornością na zatarcia, małym zużyciem ściernym, małym współczynnikiem tarcia, dobrymi właściwościami funkcjonalnymi. Zapewnienie odpowiednich właściwości materiału pozwoli wykonać tłoki, których praca w silniku może zapewnić małą toksyczność emitowanych spalin oraz małe zużycie paliwa, które zalicza się do parametrów decydujących o ekologicznych właściwościach silników spalinowych. Ponadto tłoki mają istotny wpływ na poziom emisji hałasu

Mała zawartość toksycznych składników spalin jest determinowana różnymi czynnikami, m. in. temperaturą w komorze spalania (od czego zależy głównie obecność tlenków azotu i obecność sadzy w spalinach), luzu w zespole tłokowo-cylindrowym i ukształtowanie górnej części korony tłoka, od czego zależy przede wszystkim ilość emitowanych węglowodorów. Źródłem węglowodorów mogą być przestrzenie o bardzo małych wymiarach, do których ma dostęp mieszanka paliwowo-powietrzna, gdzie jednak nie może dojść do wypalenia całego paliwa z powodu małej odległości gaszenia. Luzu w zespole tłok-cylinder mogą być powodem nie tylko wzrostu toksyczności spalin, ale także hałaśliwości pracy silnika, przede wszystkim w wyniku ruchów bocznych tłoków. Siły występujące przy ruchach bocznych zależą od wielkości luzu. Tak więc luz tłoka jest w istotnym stopniu odpowiedzialny za emisję węglowodorów, w tym przede wszystkim węglowodorów ciężkich pochodzących z oleju smarującego oraz emisję hałasu. Dlatego należy dążyć do zmniejszenia luzów w zespole tłok-cylinder, jednakże w takim stopniu, aby możliwa była poprawna praca silnika w całym zakresie prędkości obrotowych i obciążeń.

Na luz tłoka w cylindrze decydujący wpływ ma współczynnik rozszerzalności termicznej  $\alpha$  i jego histereza. Tłoki są na ogół wytwarzane ze stopów aluminium, natomiast cylindry z żeliwa, którego współczynnik rozszerzalności termicznej jest około dwukrotnie mniejszy niż współczynnik rozszerzalności termicznej stopów aluminium. Ponadto temperatura w poszczególnych punktach tłoka podczas pracy silnika jest znacznie wyższa niż cylindra. Jeżeli rośnie więc temperatura tłoka, to następuje zmniejszanie luzu w zespole tłok-cylinder proporcjonalnie do współczynnika rozszerzalności termicznej materiałów, z których jest wykonany tłok i cylinder.

$$D_t = D_o(1 + \alpha_a \Delta t_o) \text{ średnica tłoka po nagraniu;}$$

$$D_{tc} = D_{o1}(1 + \alpha_z \Delta t_1) \text{ średnica cylindra po nagraniu;}$$

$$\Delta D_q = D_{tc} - D_t = D_{o1}(1 + \alpha_z \Delta t_1) - D_o(1 + \alpha_a \Delta t_o) \text{ luz w zespole tłok-cylinder na gorąco;}$$

$$\Delta D_z = D_{o1} - D_o \text{ luz w zespole tłok-cylinder na zimno;}$$

$$\Delta D_g = \Delta D_z + (\alpha_z \Delta t_1 - \alpha_a \Delta t_o) \text{ przyrost luzu w zespole tłok-cylinder;}$$

gdzie  $\alpha_z$  i  $\alpha_a$  są współczynnikami rozszerzalności termicznej odpowiednio materiału cylindra i materiału tłoka.

Jeżeli współczynnik rozszerzalności termicznej materiału tłoka jest większy od współczynnika rozszerzalności termicznej materiału cylindra, to luz w zespole tłok-cylinder wraz ze wzrostem temperatury maleje i odwrotnie.  $\Delta t_1$  i  $\Delta t_o$  są różnicą temperatury między temperaturą na gorąco i temperaturą odniesienia odpowiednio dla cylindra i tłoka. Przyrosty

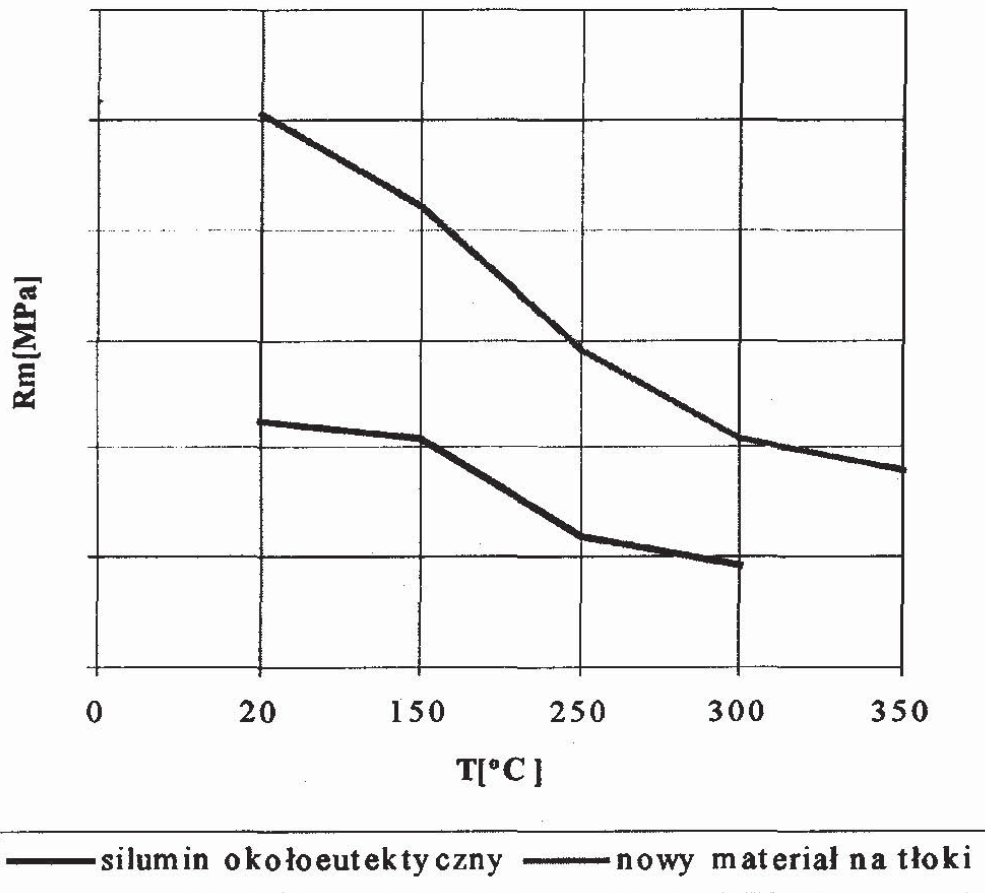
temperatury w tłoku są na ogół większe niż w cylindrze, a więc udział materiału tłoka w zmniejszeniu luzu między tłokiem a cylindrem jest większy niż materiału cylindra. Z powodu skomplikowanego kształtu tłoka oraz dużych i różnych gradientów temperatury w poszczególnych elementach tłoka powstają naprężenia, które mogą powodować nierównomierne odkształcenia tłoka, prowadzące do deformacji, które mogą spowodować lokalne lub całkowite zmniejszanie luzów a nawet mogą prowadzić do zatarcia. Wartość luzu pomiędzy tłokiem a cylindrem powinna więc podlegać optymalizacji, tak aby z jednej strony luz ten był wystarczający dla swobodnych odkształceń zespołu tłok-cylinder w całym zakresie odkształceń termicznych i mechanicznych (w tym deformacji kształtu tłoka), a z drugiej strony, aby nie był zbyt duży, co mogłoby niekorzystnie wpłynąć na ekologiczne parametry pracy silnika, takie jak toksyczność spalin (głównie węglowodorów), hałaśliwość pracy, zużycie oleju i związane z tym dodatkowa emisja węglowodorów oraz zużycie paliwa. Deformacje tłoka, przez które, w tym przypadku należy rozumieć odkształcenie spowodowane nierównym i niesymetrycznym rozkładem naprężeń termicznych i mechanicznych oraz występowaniem histerezy materiału tłoka, w wyniku ciągłego nagrzewania i chłodzenia tłoków, co szczególnie ujawnia się w stanach przejściowych obciążeń i prędkości obrotowej silników. Deformacjom można zapobiegać poprzez zapewnienie odpowiedniego składu chemicznego materiałów oraz zaprojektowanie odpowiedniego procesu technologicznego zarówno materiałów, jak i samych tłoków.

## 2. Badania wstępne nowych materiałów tłoków

Badania wstępne miały na celu wytypowanie materiału na tłoki o kontrolowanych charakterystykach i obejmowały badania technologiczne nad doбором najbardziej korzystnego procesu technologicznego wykonania tłoków, w tym obróbki termicznej, badania silnikowe dla wstępnej oceny jakości nowych tłoków, w tym badania charakterystyk silnika z punktu widzenia osiąganey mocy, zużycia paliwa, toksyczności spalin, zużycia oleju oraz deformacji tłoków po próbach i ich odporność na zatarcia. W rezultacie opracowano materiał, charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi, zwłaszcza termicznymi, a wykonane z niego tłoki charakteryzowały się o wiele korzystniejszymi właściwościami niż tłoki wykonane ze standardowych siluminów tłokowych.

Na podstawie badań próbek materiałów o różnym składzie chemicznym określono właściwości wytrzymałościowe w funkcji składu chemicznego materiałów oraz w funkcji temperatury w zakresie od 20°C do 350°C, a więc w zakresie temperatury pracy tłoków. Badania właściwości wytrzymałościowych w funkcji zawartości pierwiastków stopowych wykazały, że w miarę zwiększania do pewnej wartości zawartości badanych dodatków stopowych (chromu, kobaltu, molibdenu, wolframu, przy zwiększonych zawartościach miedzi i niklu) następował wzrost wytrzymałości materiału a po przekroczeniu wartości granicznej wytrzymałość na rozciąganie malała i malało aż do zera wydłużenie względne. Ustalono więc maksymalne dopuszczalne zawartości chromu, kobaltu, molibdenu i wolframu w siluminie tłokowym. Badania wytrzymałości w funkcji temperatury wykazały, że siluminy zawierające nowe pierwiastki stopowe wykazują mniejszy spadek właściwości wytrzymałościowych niż siluminy standardowe. Najlepsze siluminy zawierające nowe dodatki stopowe miały wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze 350°C zbliżoną do tej, jaką siluminy standardowe mają w temperaturze normalnej. Na Rys. 1 porównano wytrzymałość na rozciąganie siluminów okołoeutektycznych, standardowego i nowego w funkcji temperatury, a na Rys. 2 porównano twardość siluminu standardowego i nowego w funkcji temperatury. Lepsze właściwości wytrzymałościowe nowego siluminu w porównaniu z siluminem standardowym umożliwiają wykonanie tłoków o mniejszych wymiarach a więc umożliwiające zwiększenie szybkobieżności silnika, lub zmniejszenie obciążeń

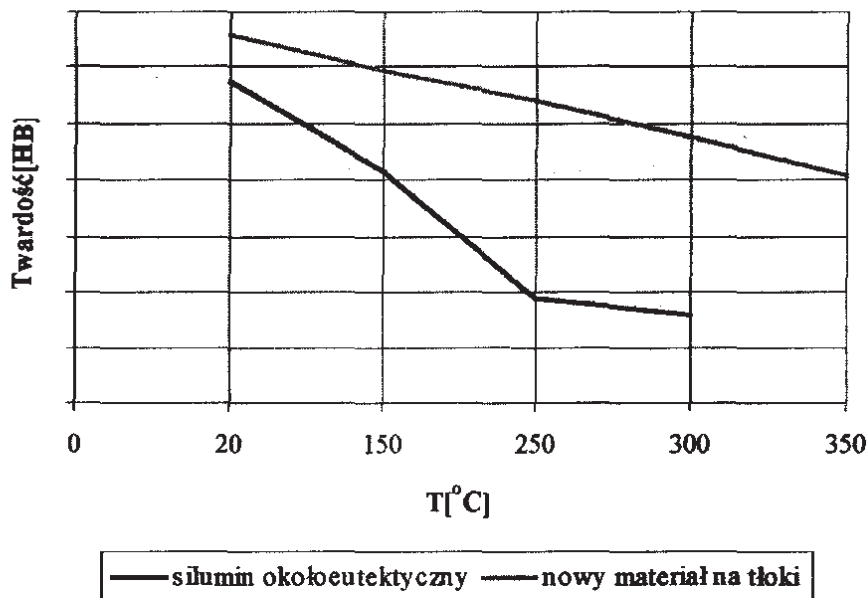
mechanizmu korbowego a więc z możliwością zwiększenia trwałości silników. Porównując wyniki badań siluminów okołoeutektycznych i nadeutektycznych z nowymi dodatkami stopowymi w temperaturze normalnej należy stwierdzić, że stopy nadeutektyczne charakteryzowały się mniejszą wytrzymałością na rozciąganie i większą twardością niż siluminy okołoeutektyczne. W miarę zwiększania temperatury spadek wytrzymałości i twardości siluminów nadeutektycznych był jednak mniejszy niż siluminów okołoeutektycznych.



Rys. 1. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie okołoeutektycznego siluminu nowo opracowanego oraz standardowego w funkcji temperatury

Fig. 1. Comparison of tensile strength for standard close eutectic silumin and novel alloys versus temperature

Siluminy z nowymi dodatkami stopowymi charakteryzowały się także małą histerezą współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$ , który ma istotny wpływ na deformacje tłoków po pracy w silniku. Na Rys. 3 przedstawiono przebieg zmian współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$  w funkcji temperatury podczas grzania i chłodzenia materiału standardowego. Na Rys. 4 przedstawiono przebieg zmian współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$  w funkcji temperatury podczas grzania i chłodzenia materiału. Materiał ten charakteryzuje się stosunkowo dużą histerezą współczynnika rozszerzalności termicznej. Na Rys. 4 przedstawiono przebieg zmian współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$  w funkcji temperatury podczas grzania i chłodzenia materiału nowego. Przebieg zmian współczynnika rozszerzalności termicznej podczas nagrzewania i chłodzenia tego materiału praktycznie jest jednakowy, co świadczy o bardzo małej histerezie współczynnika rozszerzalności termicznej.



Rys. 2. Porównanie twardości Brinella okołoeutektycznego siluminu nowo opracowanego oraz standardowego w funkcji temperatury

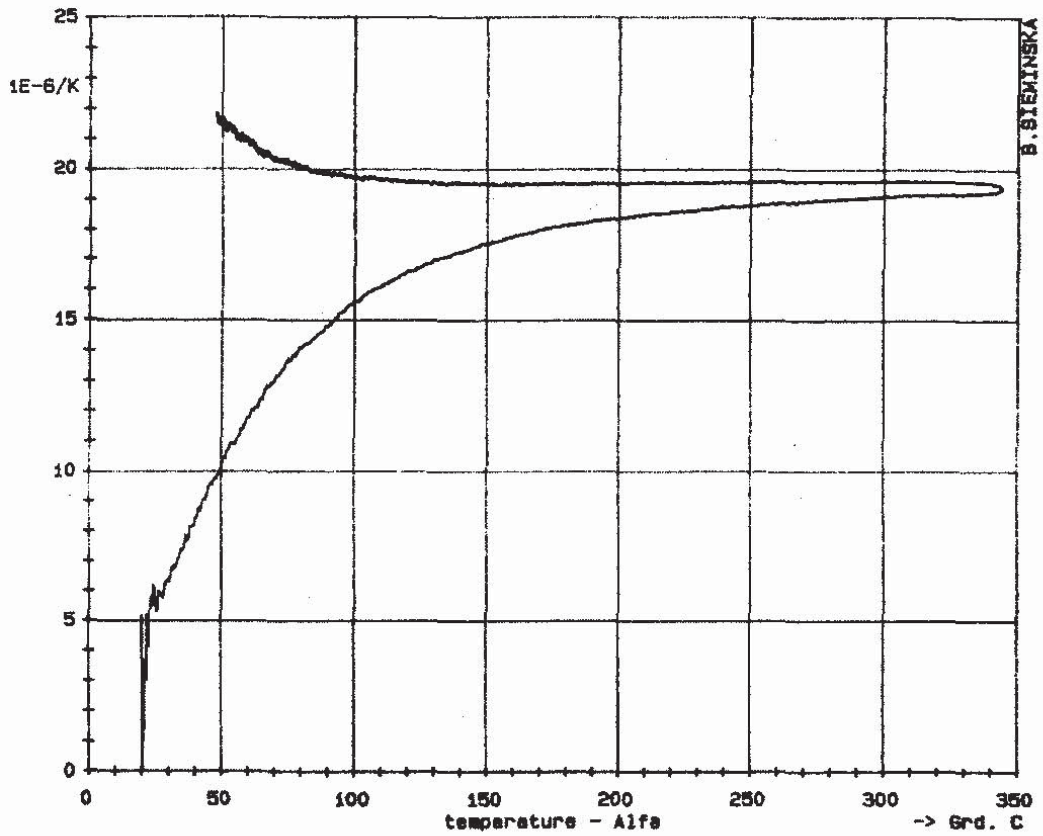
Fig. 2. Comparison of Brinell hardness for standard close eutectic silumin and novel alloys versus temperature

Siluminy z nowymi dodatkami stopowymi charakteryzowały się także małą histerezą współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$ , który ma istotny wpływ na deformacje tłoków po pracy w silniku. Na Rys. 3 przedstawiono przebieg zmian współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$  w funkcji temperatury podczas grzania i chłodzenia materiału standardowego. Na Rys. 4 przedstawiono przebieg zmian współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$  w funkcji temperatury podczas grzania i chłodzenia materiału. Materiał ten charakteryzuje się stosunkowo dużą histerezą współczynnika rozszerzalności termicznej. Na Rys. 4 przedstawiono przebieg zmian współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$  w funkcji temperatury podczas grzania i chłodzenia materiału nowego. Przebieg zmian współczynnika rozszerzalności termicznej podczas nagrzewania i chłodzenia tego materiału praktycznie jest jednakowy, co świadczy o bardzo małej histerezie współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$ .

Badania te zostały przeprowadzone przy użyciu precyzyjnego dylatometru firmy BHR 802/801. Urządzenie umożliwia rejestrację zmian wymiarów próbki w funkcji temperatury. Możliwe są pomiary w układzie prostym i różnicowym. Wyniki pomiarów są bardzo dokładne, ponieważ są one uzyskiwane na zasadzie porównań materiału badanego z materiałem referencyjnym, którym jest platyna. Próby materiałów badanych i referencyjnych odbywają się w tych samych temperaturach. Ogrzewanie i chłodzenie odbywa się w specjalnym urządzeniu, które może realizować program temperaturowy, sterowanym przy wykorzystaniu komputera. Zmiany wymiarów były mierzone czujnikiem indukcyjnym. Próbkę umieszczano w rurze kwarcowej a zmiany ich długości były przenoszone przez pręty kwarcowe. Temperaturę testowanego materiału mierzono za pomocą termopary Pt-PtRh. Dylatometr umożliwia pomiary i rejestrację następujących parametrów:

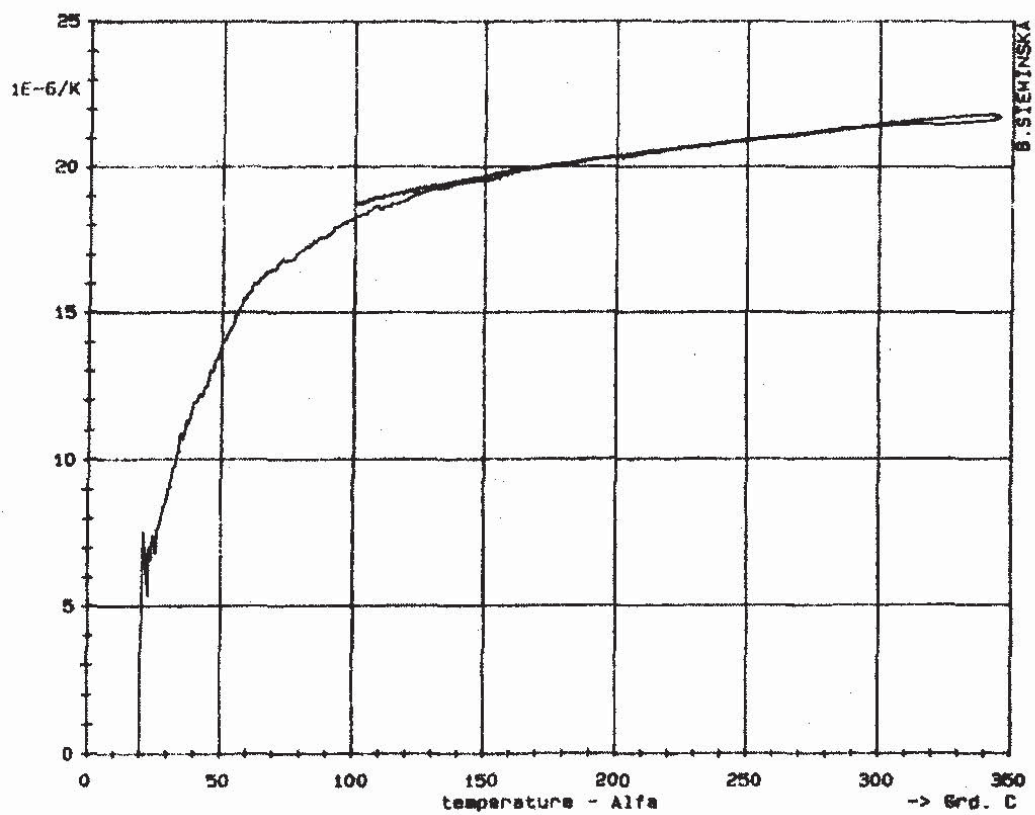
- zmiany długości w funkcji temperatury,
- względne zmiany długości dwóch próbek w funkcji temperatury,
- temperatury rzeczywistej w funkcji temperatury programowanej,
- pierwszej pochodnej zmian długości jako funkcji czasu i temperatury,
- współczynnika rozszerzalności termicznej w funkcji temperatury.

Największą zaletą zastosowanej metody jest ciągły pomiar współczynnika rozszerzalności termicznej w funkcji czasu i temperatury.



Rys. 3. Wyniki badań współczynnika rozszerzalności termicznej oraz histerezy współczynnika rozszerzalności termicznej standardowego siluminu okołoeutektycznego

Fig. 3. Test results of thermal expansion coefficient and hysteresis of thermal expansion coefficient for standard close eutectic silumin alloy



Rys. 4. Wyniki badań współczynnika rozszerzalności termicznej oraz histerezy współczynnika rozszerzalności termicznej nowego materiału na tłoki o kontrolowanej

Fig. 4. Test results of thermal expansion coefficient and hysteresis of thermal expansion coefficient for novel alloy

Tłoki badawcze wykonano z materiału charakteryzującego się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi oraz małą histerezą współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$ . Te parametry uzyskano w wyniku dodania do stopu bazowego nowych pierwiastków stopowych takich, jak chrom, kobalt, molibden, wolfram oraz zwiększonej zawartości miedzi i niklu oraz zastosowanie pełnej obróbki termicznej złożonej z przesycań i starzenia.

### **3. Badania silnikowe tłoków wykonanych z nowych materiałów o kontrolowanej rozszerzalności liniowej**

Spełnienie wysokich wymagań przez materiały tłoka powodowało, że zastosowanie ich do wykonania tłoków, umożliwiało uzyskanie bardzo dobrych osiągnięć silnika w tym niskiego zużycia paliwa, małego zużycia oleju smarującego, małej toksyczności spalin oraz dużej trwałości i niezawodności. Duża trwałość i niezawodność pracy tłoków, to także duża trwałość silników, którą można określić na podstawie zużyć i deformacji tłoków, w tym przede wszystkim zużycia rowków podpierścieniowych, zatarć głównie korony tłoka oraz zużycia płaszcza tłoka, chociaż w warunkach dobrego smarowania nie powinno dochodzić do styku płaszcza tłoka z cylindrem, co może się zdarzyć jednak tylko w trakcie rozruchu silnika, kiedy nie powstanie jeszcze warstwa smaru na powierzchni cylindra lub w wyniku dużych deformacji tłoka. Badania przeprowadzone na silniku 126A1.076/E (przy czym nie ma większego znaczenia rodzaj silnika na którym wykonano badania – chodzi o uzyskanie zmiennych obciążeń termicznych i mechanicznych w możliwie szerokim zakresie) wykazały, że tłoki pracowały prawidłowo w silniku, nie obserwowano nadmiernych zużyć, deformacji a w związku z tym też korzystne były parametry pracy silnika takie, jak toksyczność spalin, zużycie paliwa i zużycie oleju. Szczególnie wyraźnie widać to w zakresie zmniejszenia emisji tlenku węgla i węglowodorów oraz zmniejszenia zużycia oleju, co jest spowodowane małymi luzami w zespole tłok-cylinder i małymi deformacjami oraz małymi zużyciami tłoków. Bardzo małe zużycia wykazały rowki podpierścieniowe tłoków, co jest związane z wysoką twardością nowego materiału tłoków.

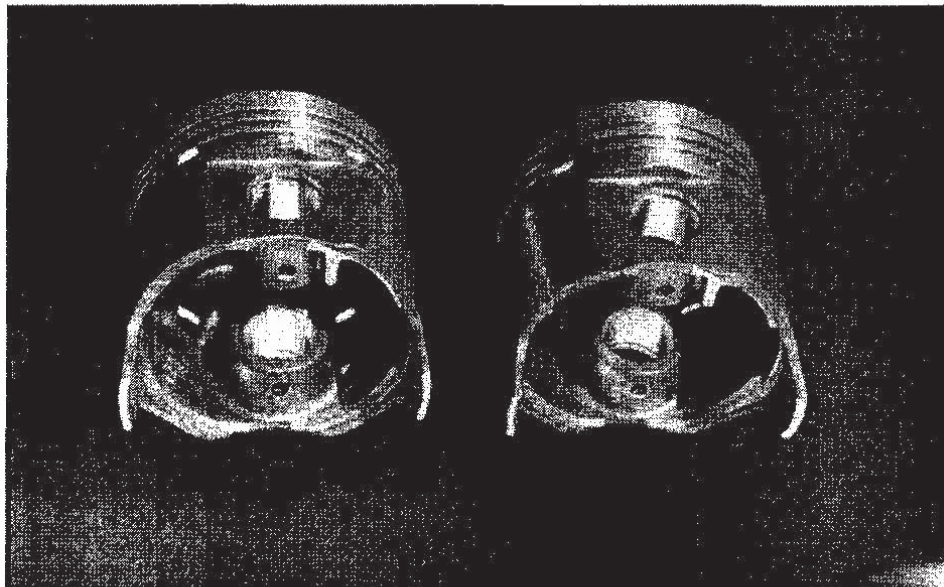
Tak więc wyniki badań silnikowych, które są najważniejszym sprawdzianem jakości tłoków, potwierdziły wyniki badań materiałowych, które wskazywały na wysoką jakość opracowanego materiału. Nie zawsze jednak wysoka jakość materiału gwarantuje, że również wysoką jakością będą się charakteryzowały wykonane z niego tłoki. Konstrukcja tłoka jest bardzo złożona, obserwuje się duże zmiany przekrojów, co powoduje występowanie naprężeń wewnętrznych mogących być przyczyną powstania deformacji i pęknięć tłoków. Jest to szczególnie istotne w tłokach silników trakcyjnych, które pracują w warunkach ciągłych zmian obciążeń i prędkości obrotowej a więc i ciągłych zmian obciążeń termicznych. Można więc stwierdzić z całą odpowiedzialnością, że opracowane tłoki lepiej spełniają techniczne wymagania silnikowe a jedynym problemem jest problem ekonomiczny, ponieważ wykonanie tłoków wymaga większych nakładów zarówno na wykonanie samych tłoków, jak i materiałów do ich produkcji.

Z partii wykonanych tłoków wybrano trzy zestawy tłoków, które były przedmiotem badań. Jedna partia zawierała tłoki, które dobrano z cylindrami w taki sposób, aby uzyskać nominalny luz tłoków, taki jak w standardowym silniku wynoszący 0,07 – 0,09 mm. Ewentualne efekty takich badań powinny być spowodowane zmniejszeniem deformacji tłoka oraz zmniejszeniem histerezy współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$ . Druga partia tłoków została dobrana z cylindrami w taki sposób, aby uzyskać mniejszy luz nominalny rzędu 0,04 - 0,06 mm. Silnik zawierający tę partię tłoków był badany także pod kątem zmiany kąta wyprzedzenia zapłonu, co powinno dać odpowiedź na temat wpływu kąta zapłonu na emisję tlenków azotu. Na trzecim komplecie tłoków prowadzono badania zużycia oleju oraz

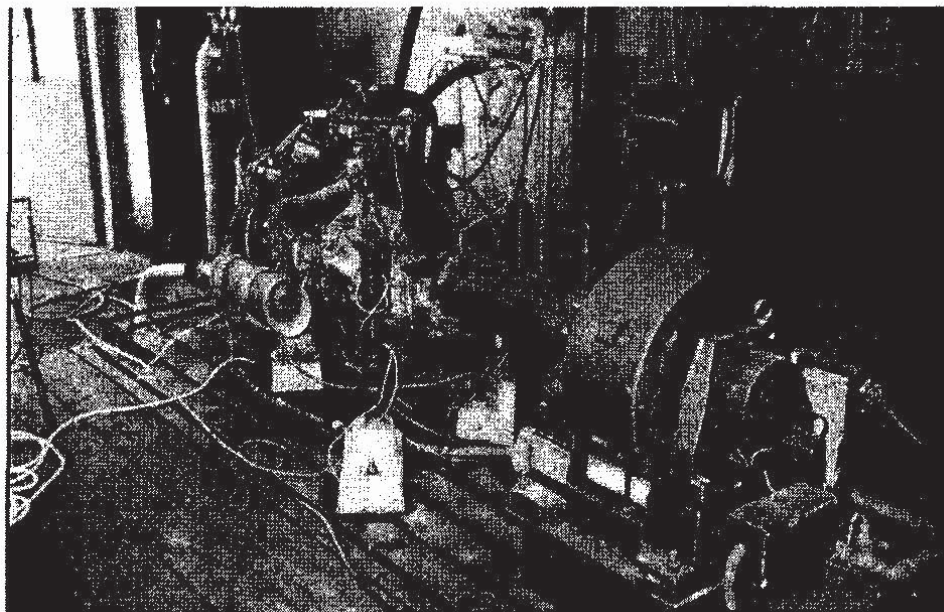
badania trwałościowe. Na Rys. 5 przedstawiono fotografię nowych tłoków, a na Rys. 6 – stanowiska badawczego.

Wyniki badań przedstawione na Rys. 7 – 14 mają charakter porównawczy, przy czym na Rys. tych kolejno liczby odnoszą się do:

- 1 - Silnika w komplecie standardowy i standardowych nastawach silnika.
- 2 - Silnik z nowymi tłokami przy nominalnej wartości luzu 0,07 - 0,09 mm, nastawach standardowych silnika.
- 3 - Silnik z nowymi tłokami, przy wartości luzu 0,04 - 0,06 mm, standardowych nastawach silnika.
- 4 - Silnik z nowymi tłokami, przy wartości luzu 0,04 - 0,06 mm i kącie zapłonu 5°OWK.
- 5 - Silnik z nowymi tłokami, przy wartości luzu 0,04 - 0,06 mm i kącie zapłonu 15°OWK.



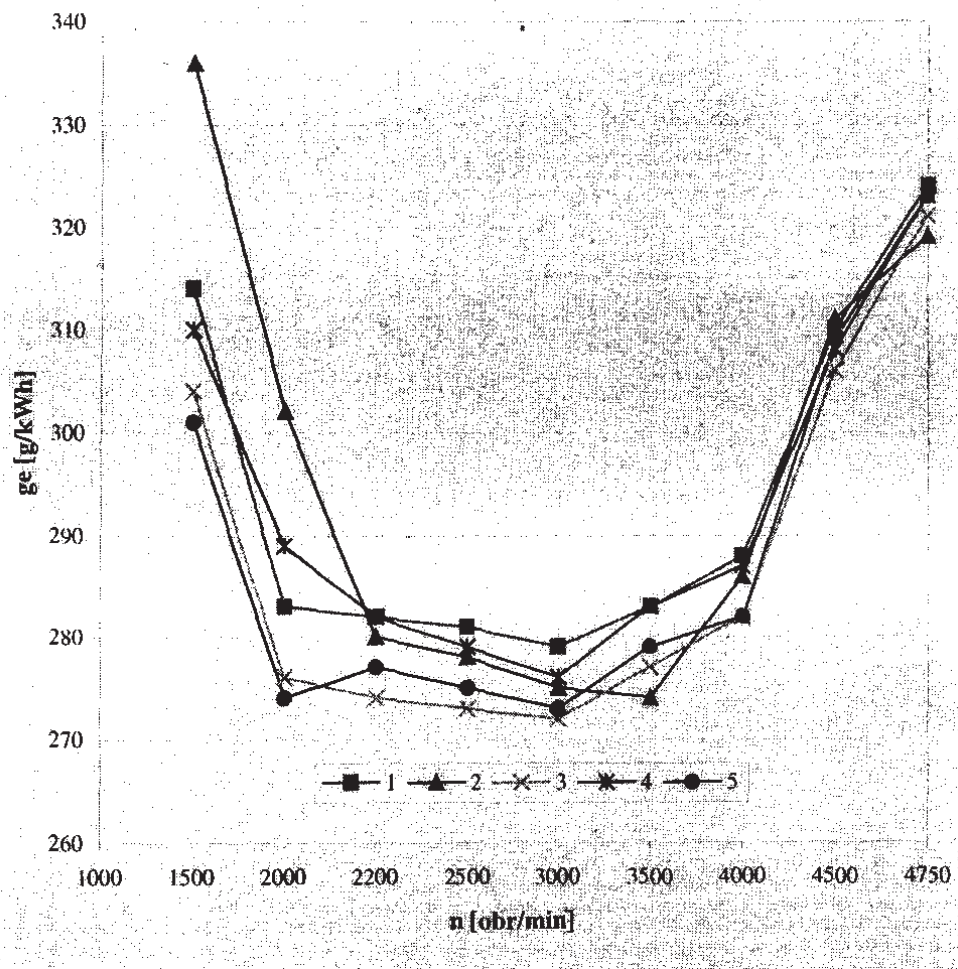
Rys. 5. Fotografia zestawu tłoków badawczych do silnika 126A1.076/E  
Fig. 5. Photograph of test pistons for the 126A1.076/E engine



Rys. 6. Widok stanowiska badawczego  
Fig. 6. View of engine test stand



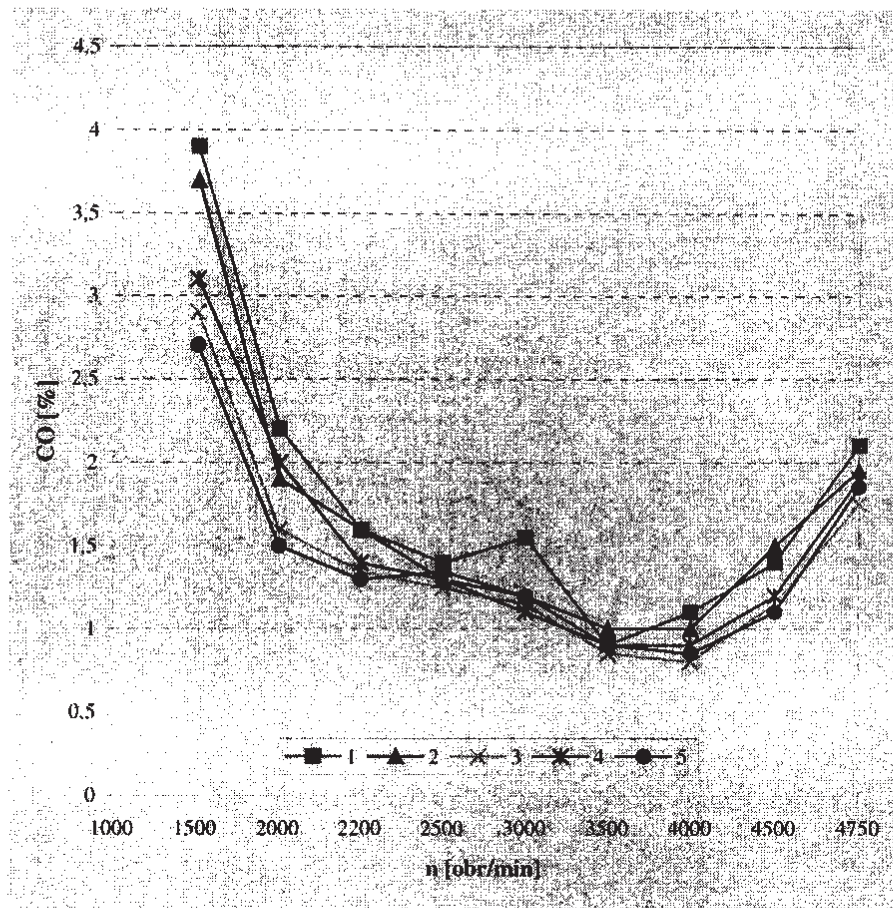
Silnik każdorazowo był przygotowywany do próby w ten sposób, że dokonywano zmiany całego zespołu tłokowo - cylindrowego przy zmianie tłoków. Nie prowadzono badań z różnymi tłokami w tej samej tulei cylindrowej. Przed montażem silnika elementy zespołu tłokowo - cylindrowego (tłoki, cylindry, pierścienie tłokowe) były mierzone. Po pomiarach silnik montowano i przystępowano do prowadzenia właściwej próby. Na początku próby prowadzono docieranie silnika w cyklu sześciogodzinnym, następnie prowadzono badania zużycia oleju, wymieniano olej smarujący i przystępowano do określania charakterystyk silnika oraz z charakterystykami toksyczności spalin przy standardowej kompletacji silnika, która stanowiła poziom odniesienia w stosunku do charakterystyk na tłokach badawczych. Na Rys. 7 - 14 przedstawiono wyniki badań standardowego silnika 126A1.076/E nr. 9 524 868, przy czym w silniku tym zainstalowano nowy zespół tłokowo-cylindrowy.



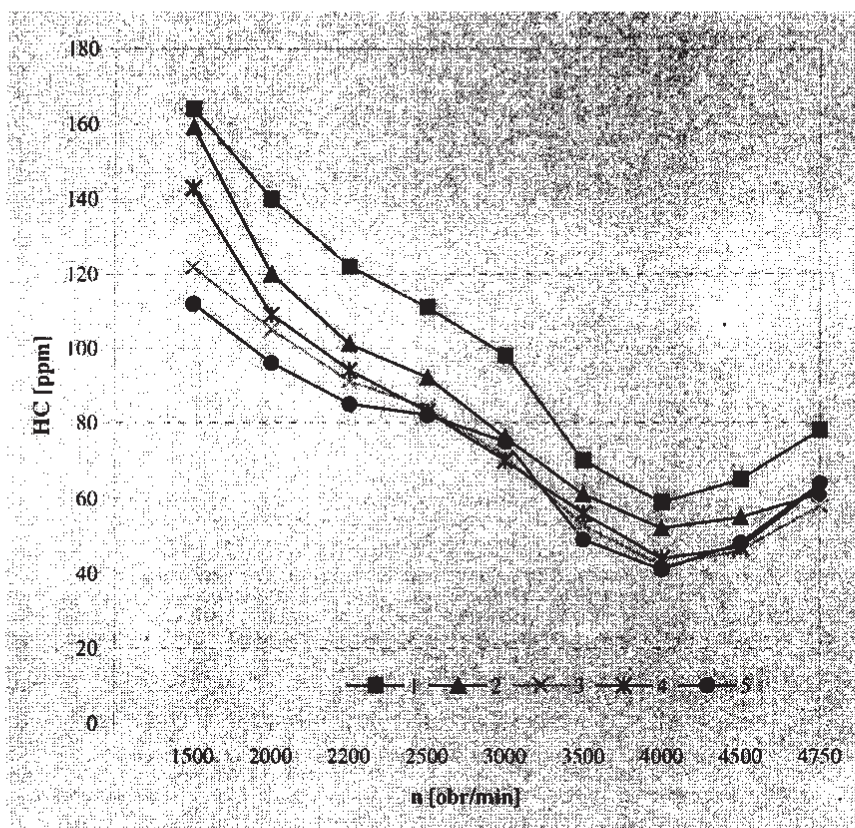
Rys. 7. Przebiegi jednostkowego zużycia paliwa w funkcji prędkości obrotowej przy pełnym otwarciu przepustnicy (warunki charakterystyki zewnętrznej)

Fig. 7. Specific break fuel consumption versus engine speed at full load

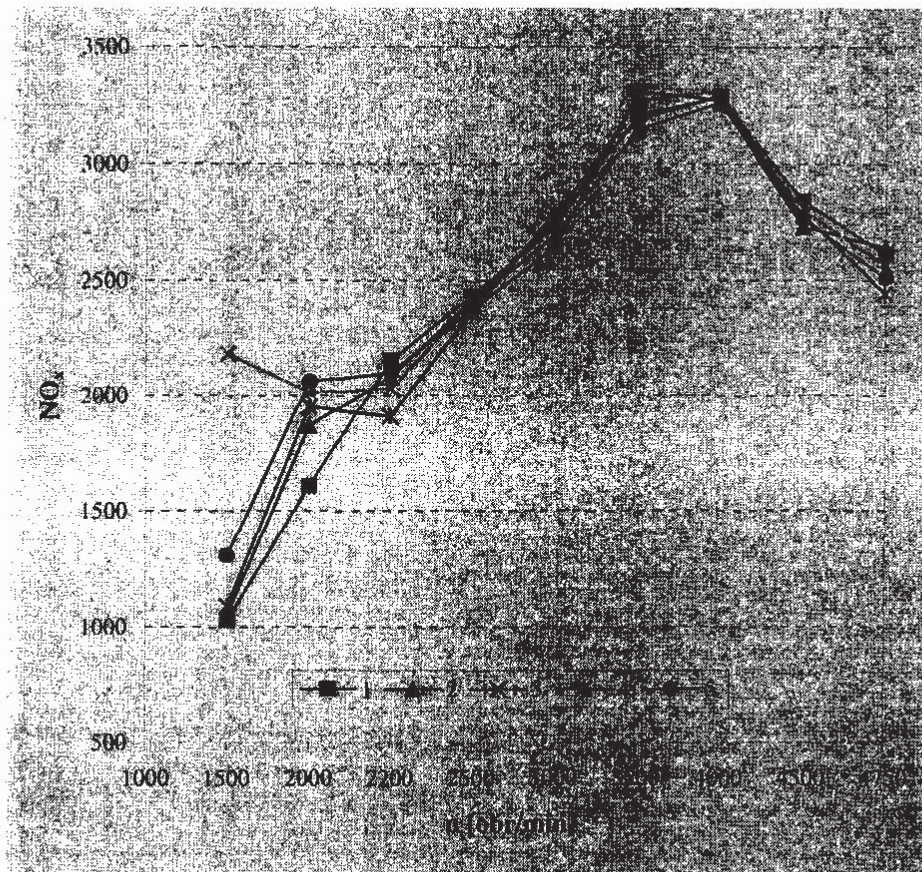
Najbardziej wyraźny efekt został uzyskany w odniesieniu do zmniejszenia zużycia oleju oraz zawartości składników toksycznych w spalinach, głównie zawartości węglowodorów. Na Rys. 9 porównano przebieg zmian zawartości węglowodorów w spalinach silnika w funkcji prędkości obrotowej silnika, a więc w warunkach maksymalnych obciążeń silnika dla rozwiązania standardowego – porównawczego, rozwiązania ze standardowym luzem oraz rozwiązania ze zmniejszonym luzem. Przy zachowaniu standardowych luzów zawartość węglowodorów w spalinach uległa zmniejszeniu o 15-20%, natomiast po zmniejszeniu luzów zmniejszenie zawartości węglowodorów dochodziło do 30%.



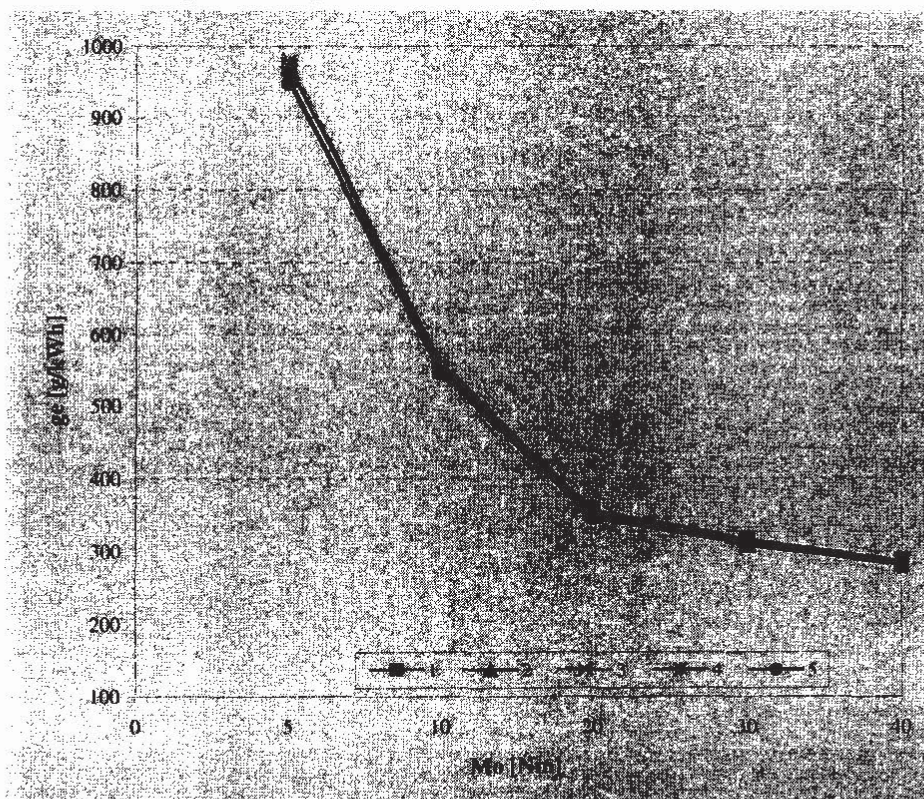
Rys. 8. Przebiegi zawartości tlenku węgla w funkcji prędkości obrotowej przy pełnym otwarciu przepustnicy  
 Fig. 8. Carbon monoxide emission versus engine speed at full load



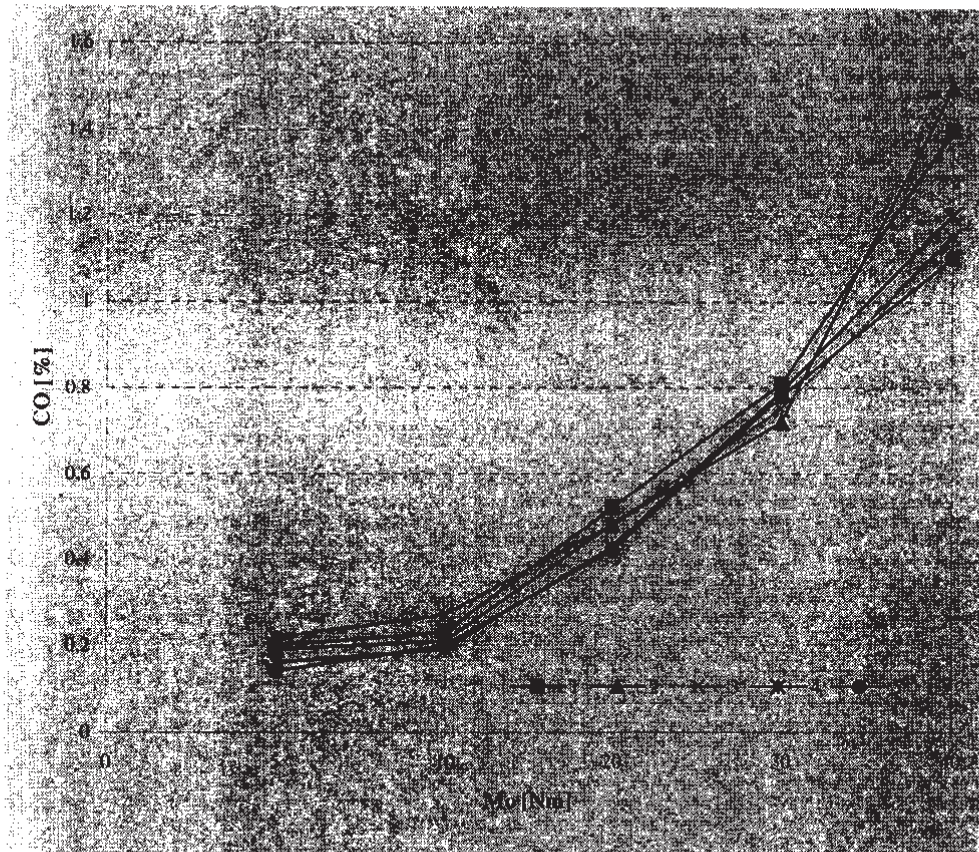
Rys. 9. Przebiegi zawartości węglowodorów w funkcji prędkości obrotowej przy pełnym otwarciu przepustnicy  
 Fig. 9. Hydrocarbons emission versus engine speed at full load



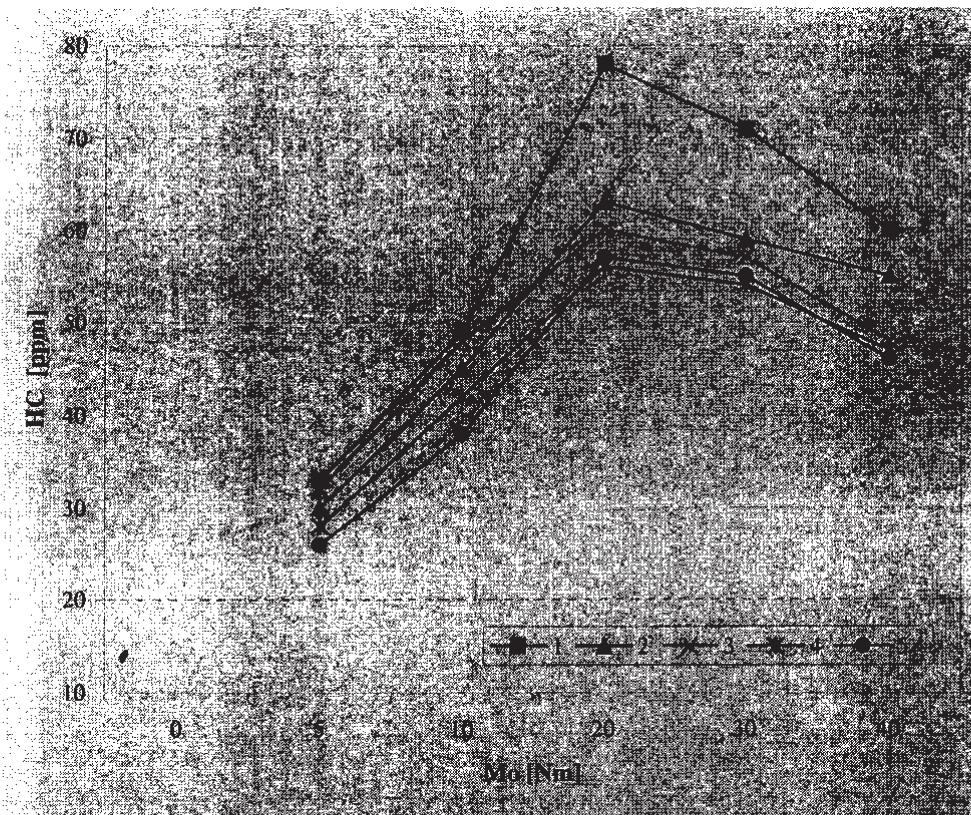
Rys. 10. Przebiegi zawartości tlenków azotu w funkcji prędkości obrotowej przy pełnym otwarciu przepustnicy  
 Fig. 10. Nitrogen oxides versus engine speed at full load



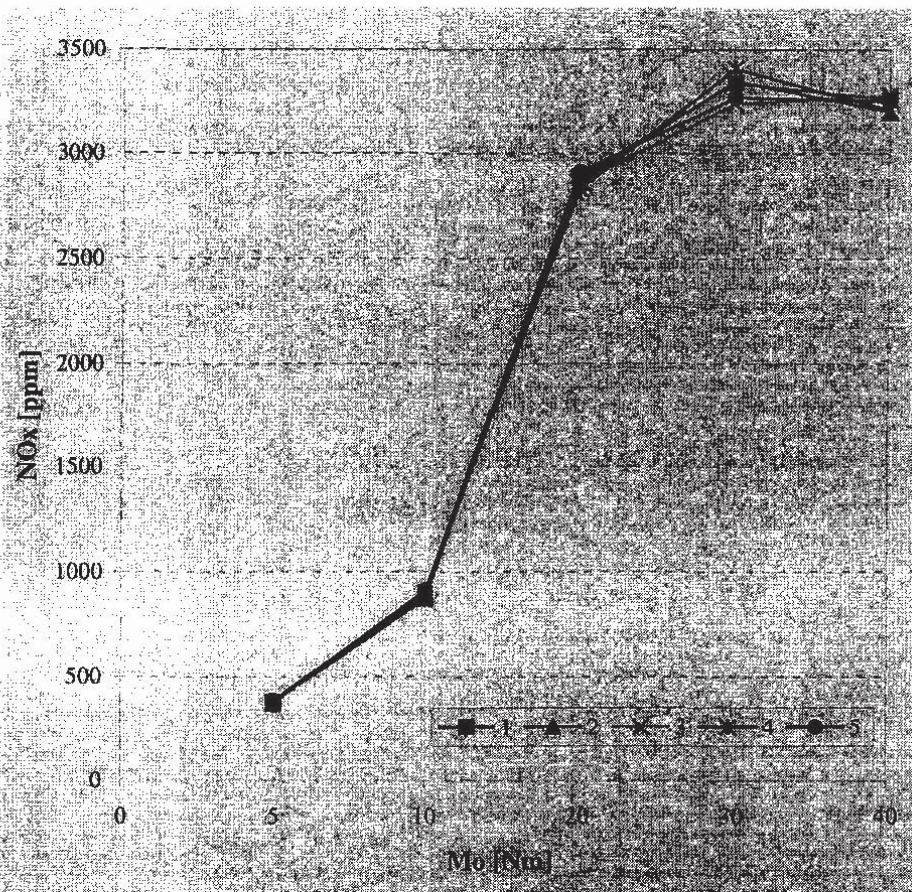
Rys. 11. Przebiegi zmian jednostkowego zużycia paliwa w funkcji obciążenia silnika, przy stałej prędkości obrotowej  $n=3900$  obr/min (warunki charakterystyki obciążeniowej)  
 Fig. 11. Specific break fuel consumption versus engine load at 3900 rpm speed (load characteristic)



Rys. 12. Przebiegi zmian zawartości tlenku węgla w spalinach, w funkcji obciążenia silnika, przy stałej prędkości obrotowej  $n=3900$  obr/min (warunki charakterystyki obciążeniowej)  
 Fig. 12. Carbon monoxide emission versus engine load at 3900 rpm speed (load characteristic)



Rys. 13. Przebiegi zmian zawartości węglowodorów w spalinach, w funkcji obciążenia silnika, przy stałej prędkości obrotowej  $n=3900$  obr/min (warunki charakterystyki obciążeniowej)  
 Fig. 13. Hydrocarbons emission versus engine load at 3900 rpm speed (load characteristic)

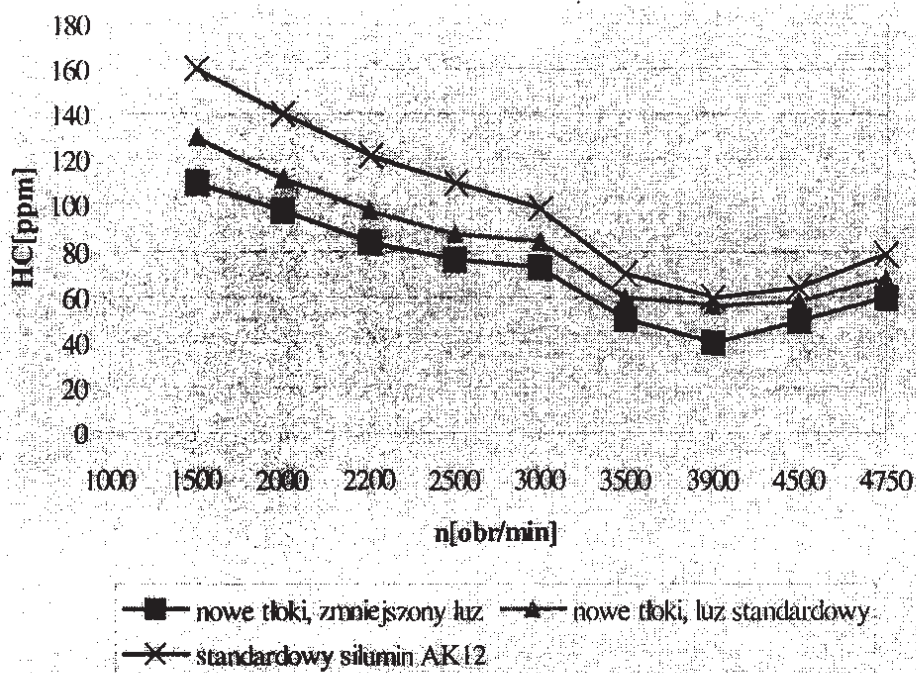


Rys. 14. Przebiegi zmian zawartości tlenków azotu w spalinach, w funkcji obciążenia silnika, przy stałej prędkości obrotowej  $n=3900$  obr/min (warunki charakterystyki obciążeniowej)  
 Fig. 14. Nitrogen oxides emission versus engine load at 3900 rpm speed (load characteristic)

W zakresie charakterystyk silnika, jeżeli chodzi o przebieg mocy, momentu obrotowego i zużycia paliwa różnice mieściły się w granicach rozrzutu wyniku pomiarów (1%-2%). Istotne efekty osiągnięte zostały także w zmniejszeniu zużycia oleju. W Tab. 1. przedstawiono wyniki badań jednostkowego zużycia paliwa i zużycia oleju, w odniesieniu do rozwiązania standardowego, nowego rozwiązania mającego standardowy luz w zespole tłokowo-cylindrowym oraz nowego rozwiązania ze zmniejszonym luzem w zespole tłok-cylinder. O ile w standardowym rozwiązaniu jednostkowe zużycie oleju mieściło się w granicach 0,9-1,1 g/kWh, to w rozwiązaniu z nowymi tłokami, ale standardowym luzem jednostkowe zużycie oleju wynosiło 0,68-0,80 g/kWh a w rozwiązaniu ze zmniejszonym luzem i nowymi tłokami zużycie oleju wynosiło 0,45-0,52 g/kWh, a więc było praktyczne około 50% niższe niż w rozwiązaniu z tłokami standardowymi. To zmniejszone zużycie oleju miało decydujący wpływ na zmniejszenie zawartości węglowodorów w spalinach, chociaż udział w redukcji ilości węglowodorów powinien być jeszcze wyraźniejszy.

#### 4. Wnioski

1. Badania silnikowe nowych tłoków o kontrolowanej i minimalnej histerezie współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$  wykazały, że istnieje możliwość zmniejszenia luzu w zespole tłok - cylinder. Nominalny luz w zespole tłok - cylinder, przy zastosowaniu tłoków standardowych, wynosi 0,07 - 0,09 mm, natomiast w odniesieniu do nowych tłoków możliwe jest zmniejszanie luzów w pełnym zakresie prędkości obrotowych silnika i obciążeń do wartości 0,04 - 0,06 mm.



Rys. 15. Porównanie zawartości węglowodorów (HC) w spalinach silnika standardowego (x), dla nowych tłoków (trójkąt) przy standardowym luzie w zespole tłok-cylinder (0,07-0,09 mm) oraz dla nowych tłoków (prostokąt) przy zmniejszonym luzie w zespole tłok-cylinder (0,04-0,06 mm) w funkcji prędkości obrotowej w warunkach charakterystyki zewnętrznej

Fig. 15. Hydrocarbons emission (HC) for standard engine (cross), novel pistons (triangles) at standard gaps (0.07-0.09 mm) between piston and cylinder and for novel pistons (rectangles) at lower gaps (0.04-0.06 mm) between piston and cylinder versus engine speed at full load

Tab. 1. Wyniki badań zużycia oleju i paliwa w odniesieniu do trzech rozwiązań węzła tłokowego: rozwiązania standardowego, rozwiązania z nowymi tłokami i standardowym luzem w zespole tłok-cylinder, rozwiązania z nowymi tłokami i zmniejszonym luzem w zespole tłok-cylinder

Tab. 1. Test results of oil and fuel consumption for 3 kind of piston sets: standard set, novel piston set and standard gaps (0.07-0.09 mm) between piston and cylinder and novel piston set and standard gaps (0.04-0.06 mm) between piston and cylinder

Lp.	Zużycie oleju	Zużycie paliwa	Rodzaj wariantu
	g/kWh	g/kWh	
1	0,97	283	Tłoki standardowe
2	1,02	284	
3	1,09	282	
4	0,95	283	
5	0,81	280	Nowe tłoki Luz standardowy 0,07-0,06 mm
6	0,68	277	
7	0,74	281	
8	0,79	282	
9	0,46	278	Nowe tłoki Luz zmniejszony 0,04-0,06 mm
10	0,50	281	
11	0,52	281	
12	0,48	279	

- Zastosowanie tłoków z nowego materiału spowodowało zmniejszenie zużycia oleju od 0.9 - 1.1 g/kWh, jakże stwierdzono w odniesieniu do tłoków ze standardowego siluminu tłokowego, do 0.68 - 0.80 g/kWh. To zmniejszenie zużycia oleju można powiązać ze

- zmniejszeniem deformacji tłoków. Dalsze zmniejszenie zużycia oleju do wartości 0,45 - 0,52 g/kWh wystąpiło przy zmniejszeniu luzu w zespole tłok - cylinder.
3. Zastosowanie tłoków z nowego materiału spowodowało zmniejszenie toksyczności spalin, głównie węglowodorów, co można powiązać ze zmniejszeniem deformacji tłoków oraz zmniejszeniem luzów w zespole tłok - cylinder. Przy zastosowaniu standardowych luzów w zespole tłok - cylinder zawartość węglowodorów uległa zmniejszeniu w granicach 15 - 20%, natomiast po zmniejszeniu luzów w zespole tłok-cylinder nastąpiło dalsze zmniejszenie do wartości w granicach 24 - 28%.
  4. Zastosowanie nowych tłoków nie spowodowało zmniejszenia emisji tlenków azotu. Zawartość tlenków azotu uległa natomiast zmniejszeniu w wypadku, kiedy zmniejszono kąat opóźnienia zapłonu, co jednak odnosi się także do standardowej kompletacji tłoków i jest związana z obniżeniem temperatury w komorze spalania.
  5. Wprowadzenie nowych tłoków nie spowodowało istotnych zmian w jednostkowym zużyciu paliwa. Zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa mieściło się w granicach 1-2 %.
  6. Końcowym efektem zastosowania tłoków z nowego materiału o minimalnej histerezie współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$  jest zmniejszenie zużycia oleju, zmniejszenie emisji węglowodorów w spalinach, zmniejszenie przedmuchiów do skrzyni korbowej, zmniejszenie zużycia rowków podpierścieniowych i płaszcza tłoków, zmniejszenie deformacji tłoków oraz zwiększenie trwałości i niezawodności tłoków.
  7. Nowy materiał na tłoki ma skład chemiczny znacznie odbiegający od standardowych siluminów tłokowych i charakteryzuje się unikalnymi właściwościami wytrzymałościowymi, małą histerezą współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$  oraz dużą odpornością na zatarcia.
  8. Cechą charakterystyczną nowego materiału na tłoki jest obecność w jego składzie chemicznym pierwiastków stopowych o wysokiej temperaturze topnienia takich, jak chrom, kobalt, molibden, wolfram oraz zwiększoną zawartość miedzi i niklu. Obecność tych pierwiastków stopowych wpływa na neutralizację szkodliwego wpływu obecności żelaza w siluminach. Pierwiastki te tworzą związki międzymetaliczne z żelazem, posiadające kryształy o korzystnym kształcie i wymiarach, które rozmieszczają się na granicach ziaren i powodują umocnienie się materiału.
  9. Uzyskanie drobnoziarnistej struktury materiału nie tylko w płaszczu tłoka, ale także w piastach i denku tłoka oraz w miejscach silnie zmieniających się przekrojów jest sprawą bardzo ważną i wymaga ciągłej i starannej kontroli. Bardzo niebezpieczna jest obecność wielokrotnych eutektyk w miejscach zmiennych przekrojów, ponieważ stanowią one ogniska pęknięć, które mogą przemieszczać się w głąb tłoka.
  10. Możliwości nowego materiału charakteryzującego się minimalną histerezą stwarzają możliwości zminimalizowania luzów i uzyskania poprawnej pracy silnika w pełnym zakresie prędkości obrotowych silnika oraz obciążeń. Daje to możliwości uzyskania zmniejszenia poziomu emitowanego hałasu, jak również zmniejszenia obciążeń mechanicznych tłoków.

*Praca naukowa finansowana w ramach projektu badawczego nr 9T12D02519  
Ministerstwa Nauki i Informatyzacji*

## **Literatura**

- [1] Day R. A, Smart R. F., Tommis N.: Piston Materials Technology. Proceedings of the Associated Engineering Group Technical Symposium. Cawston House, Great Britain, June 17-18 1970.

- [2] Catherall J. A., Smart R. F.: The Effects of Nickel in Aluminum - Silicon Eutectic Alloys. *Metallurgia*, Vol. 79, No. 476, 1969.
- [3] Pietrowski S.: *Siluminy*. Wyd. Pol. Łódzkiej, ISBN 83-7283-029-0, 2001.
- [4] Pietrowski S.: *Siluminy tłokowe*. Monografia PAN: Krzepnięcie metali i stopów, z. 29, 1997.
- [5] Pietrowski S.: *Silumin nadeutektyczny z dodatkami Cr, Mo, W i Co*. Krzepnięcie Metali i Stopów, PAN, Komisja Odlewnictwa. Nr 38, 1998.
- [6] Pietrowski S.: *Silumin wieloskładnikowy*. Patent RP Nr. P-317492.
- [7] Pietrowski S., Siemińska - Jankowska B.: The Coefficient of Linear Thermal Expansion of Synthetic and Technical Silumins. *Polish CIMAC*. Vol. 1, No. 1, Warsaw, 1994.
- [8] Pietrowski S., Siemińska-Jankowska B.: Wpływ rodzaju stopu i postaci krzemu eutektycznego na współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej siluminów. *Proceedings of International Scientific Conference on International Combustion Engines „KONES'93”*, Gdańsk - Jurata, ISBN 83-900666-1-0, 1993.
- [9] Siemińska-Jankowska B.: *Badania symulacyjne obciążeń cieplnych materiałów na tłoki silników spalinowych*. *Proceedings of International Scientific Conference on International Combustion Engines „KONES'93”*, Gdańsk - Jurata, ISBN 83-900666-1-0, 1993.
- [10] Poniewierski Z.: *Krystalizacja, struktura i właściwości siluminów*. WNT, Warszawa, 1989.
- [11] *Krzepnięcie Metali i Stopów*. PAN, Komisja Odlewnictwa Z. 28, 1996.
- [12] Pietrowski S.: *Kompozyt o właściwościach przeciwwzrostowych*. Patent RP Nr 161507.
- [13] Siemińska-Jankowska B.: *Nowy materiał kompozytowy na tłoki ekologicznych silników spalinowych*. *Journal of KONES. Internal Combustion Engines*. Vol 5. No 1, ISSN 1231-4005, 1998.
- [14] Siemińska-Jankowska B.: *Tłoki do ekologicznych silników spalinowych*. *Journal of KONES. Internal Combustion Engines*. Vol. 3, No. 1, ISSN 1231-4005, ISBN 83-900666-5-3, 1996.
- [15] Pietrowski S., Siemińska-Jankowska B.: *Siluminy tłokowe współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej i jego histereza*. *Journal of KONES Internal Combustion Engines*. Vol. 3, No. 1, ISSN 1231-4005, ISBN 83-900666-5-3, 1996.
- [16] Pietrowski S., Siemińska-Jankowska B.: *Investigations of the New Materials for Pistons, of Ecological Combustion Engines*. *Journal of CIMAC*. Vol. 2, No 1, ISSN 1231 3998, ISBN 83-900666-7-X, 1996.
- [17] Merkisz J. *Ekologiczne problemy silników spalinowych*. Wyd. P. P. Poznań 1998/1999.
- [18] Merkisz J., Tomaszewski F., Ignatow D.: *Trwałość i diagnostyka wężła tłokowego silników spalinowych*. Wyd. P.P. Poznań, 1995.
- [19] Kowalewicz A.: *Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych*. Wyd. KiŁ. Warszawa, 1990.
- [20] Wajand J. A.: *Silniki o zapłonie samoczynnym*. WNT. Warszawa, 1988.
- [21] Zabłocki M.: *Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych*. Wyd. KiŁ. Warszawa, 1976.
- [22] Bernhardt M., Chłopek Z., Danilczyk W., Kruczyński S.: *Symulacja procesów emisji substancji szkodliwych z pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym w teście dynamicznym*. *Journal of KONES. Internal Combustion Engines* ISSN 1231-4005. Vol. 2. No 1, 1995.