

BADANIA PORÓWNAWCZE NOWYCH KONSTRUKCJI ŚWIEC ZAPŁONOWYCH

COMPARATIVE RESEARCH OF NEW DESIGNS OF SPARK PLUGS

W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań porównawczych świec zapłonowych według opracowanej procedury. W ramach badań określono zdolność świec zapłonowych do zainicjowania spalania w ekstremalnych warunkach oraz zdolność świec zapłonowych do samooczyszczania izolatora. Analizie poddano trzy zestawy świec zapłonowych: świece standardowe z jedną elektrodą boczną, świece U-super, z rowkiem w elektrodzie bocznej oraz świece ze specjalnie zmodyfikowanym izolatorem. Na podstawie przeprowadzonych badań określono wpływ zmian konstrukcyjnych na parametry eksploatacyjne świec zapłonowych.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, świeca zapłonowa

The paper presents chosen results of spark plugs comparative research which was done according to a newly elaborated procedure. The research project covered analysis of ignition feasibility under extreme conditions and ability to burn out carbon and combustion chamber deposits from the insulator. Three types of spark plugs were examined: standard spark plug with single ground electrode, U-super with groove in a ground electrode and special design with modified shape of an insulator. Influence of proposed design modifications on working parameters was established on the grounds of the research.

Keywords: spark ignited engine, spark plug

1. Wprowadzenie

Świece zapłonowe ewoluują równolegle z systemami spalania i konstrukcjami silników spalinowych. Dążenie do podnoszenia średnich ciśnień indykowanych w silnikach powoduje pogorszenie warunków pracy elementów tworzących komory spalania. W związku z tym świece zapłonowe do współczesnych silników muszą charakteryzować się wzmoczoną odpornością na ekstremalne warunki pracy.

Innym, niezwykle ważnym aspektem brany pod uwagę podczas konstruowania świec zapłonowych jest zapewnienie powtarzalnej pracy silnika w warunkach minimalnych obciążeń. W świetle obowiązujących norm toksyczności spalin, nawet jeden cykl pracy silnika bez spalania występujący w trakcie testu przesądza o przekroczeniu dopuszczalnego stężenia węglowodorów w spalinach. Dlatego też konstrukcja świecy zapłonowej musi zapewniać stuprocentową skuteczność zainicjowania płomienia w cylindrze.

Producenci świec zapłonowych poza zadaniem, jakim jest nadążanie za rozwojem systemów spalania i stale zaostrzającymi się przepisami dotyczącymi emisji spalin, oferują także nowe konstrukcje przeznaczone dla starszych typów silników, niekiedy znacznie zużytych.

1. Introduction

Spark plugs evolve in parallel with both combustion systems and engines' designs. Pursuing higher mean indicated pressures in engines causes worsening of combustion chambers' parts working conditions. Accordingly, spark plugs used in contemporary engines have to be distinguished by resistance to extreme service conditions.

Another essential aspect considered in engineering process of spark plug design is providing stable engine operation in low load conditions. Under the new exhaust emission regulations even one misfire during the test determines exceeding hydrocarbons emission limit.

That is why the spark plug design has to guarantee absolute certainty of flame initiation in a combustion chamber.

Spark plugs manufacturers, apart from the main aim which is keeping pace with combustion systems technological advance and continuously developing exhaust emission standards, have to provide parts designed specially for obsolete engines, sometimes substantially deteriorated.

Another group of products existing on the spark plugs market is oriented towards vehicles retrofit-

Kolejna grupa produktów to świece zapłonowe przeznaczone do samochodów wyposażonych w instalacje zasilane gazem propan-butan. Poza nieco odmiennymi warunkami podczas spalania paliwa gazowego, układy zasilania LPG charakteryzują się większym rozrzutem składu mieszanki niż układy zasilania benzyną. Dlatego też ważne jest, aby konstrukcja świec zapłonowych umożliwiała zainicjowanie płomienia w szerokim zakresie nadmiaru powietrza w cylindrze.

2. Wymagania stawiane świecom zapłonowym

Jednym z głównych elementów układu zapłonowego silnika spalinowego jest świeca zapłonowa. Podstawowym zadaniem świecy zapłonowej jest zrealizowanie we wnętrzu komory spalania wyładowania elektrycznego o wymaganym charakterze. Do podstawowych parametrów wyładowania elektrycznego należą napięcie iskry elektrycznej oraz energia iskry. Wyładowanie występuje pomiędzy elektrodą centralną a jedną bądź kilkoma elektrodami bocznymi świecy. Do wywołania tego zjawiska niezbędne jest wystąpienie pewnej minimalnej wartości napięcia wtórnego. Wartość tego napięcia zależy od odległości między elektrodami świecy, medium, przez które przeskakuje iskra oraz ciśnienia. Wyindukowane w uzwojeniu wtórnym cewki zapłonowej napięcie obecne między elektrodami świecy zapłonowej powoduje jonizację lawinową w przestrzeni międzyelektrodowej, w wyniku, której tworzy się kanał zjonizowany o zmniejszonej impedancji a jednocześnie wzrasta natężenie prądu przepływającego pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej [2]. Aby doprowadzić do zapłonu ładunku w cylindrze, ilość ciepła dostarczonego do mieszanki paliwowo-powietrznej musi być dostatecznie duża, aby zainicjować reakcję spalania w objętości na tyle dużej, aby płomień zaczął się samorzutnie rozwijać. Intensywne zawirowania ładunku w cylindrze silnika często doprowadzają do wygaszenia płomienia [1].

Przebieg opisanej powyżej fazy spalania zwanej okresem rozwoju jądra płomienia odpowiada za ilość pracy indykowanej uzyskanej w cyklu pracy silnika oraz za cykliczną powtarzalność spalania.

Charakterystykę cieplną świecy zapłonowej określają dwie wartości temperatury: temperatura samooczyszczania się oraz temperatura żarzenia. Pierwsza wartość jest to minimalna temperatura, poniżej której nie zachodzi proces samooczyszczania się świecy, co prowadzi do jej mostkowania. Po osiągnięciu tej temperatury następuje wypalenie z powierzchni izolatora osiadłych zanieczyszczeń złożonych głównie z cięższych węglowodorów oraz sadzy. Substancje osadzające się na izolatorze zmniejszają jego rezystancję tworząc tzw. mostek przewodzący.

ted with LPG fuelling systems. Apart from slightly different gaseous fuel combustion conditions in comparison to gasoline LPG feeding systems can not guarantee constant and stable air-fuel ratio in combustion chamber.

2. Requirements concerning spark plugs

Spark plug is one of the main parts of engine ignition system. The primary function of a spark plug is transmitting electrical energy which is able to create a spark in combustion chamber. The spark discharge is described by such parameters like voltage and spark energy. The spark discharge takes place between central electrode and one or more ground electrodes. In order to initiate a spark discharge it is necessary to supply sufficient amount of voltage by ignition coil. This minimum voltage is determined by the spark plug gap, surrounding atmosphere and pressure. Voltage induced in secondary coil of ignition transformer causes cumulative ionization in volume between the electrodes. As a result, an ionized channel is created which is distinguished by lowered impedance. It causes a passage of increased current between the electrodes [2].

In order to pass to the next stage of combustion process called flame kernel development, amount of energy dissipated in air fuel mixture must be sufficient to cover heat losses and allow flame to propagate through combustion chamber. High swirl rates in combustion chambers often result in blowing flame kernel and termination of combustion process [1].

Parameters of flame kernel development process determine both amount of in-cylinder working energy obtained as a result of combustion process and irrepeatability of consecutive cycles of engine operation.

Thermal performance of the spark plug is described by two values of temperature: self-cleaning temperature and glowing temperature. Below the first value the process of self-cleaning can not take place, what leads to insulator fouling. When the spark plug temperature reaches the self-cleaning threshold value, oil and carbon deposits are gradually burning out.

Exciding of the glowing temperature by the most protruding spark plug parts provides hot spots and can result in pre-ignition.

Spark plug correctly designed and fit to an engine should keep its tip temperature between two mentioned borders i.e. from 500 to 850 °C in the whole range of engine operation conditions.

Przekroczenie przez najbardziej wysunięte do komory spalania elementy świecy temperatury żarzenia powoduje samorzutne, niekontrolowane zapłony mieszanki.

Prawidłowo skonstruowana i dobrana do silnika świeca zapłonowa powinna pracować pomiędzy wymienionymi powyżej wartościami temperatury tj. w granicach od 500 do 850 °C w całym zakresie pracy silnika [3].

3. Stanowisko badawcze i plan badań

Badania porównawcze przeprowadzono na trzech rodzajach świec zapłonowych produkcji firmy ISKRA Zakłady Precyzyjne: standardowych z jedną elektrodą boczną, U-super – z rowkiem w elektrodzie bocznej oraz eksperymentalnej konstrukcji świec zapłonowych o zmodyfikowanym kształcie izolatora. Modyfikacja izolatora polegała na zastąpieniu tradycyjnego, stożkowego kształtu bryłą obrotową o tworzącej w kształcie sinusoidy. Celem wprowadzenia tej modyfikacji było wydłużenie drogi upływu prądu w wyniku zanieczyszczenia izolatora.

W celu weryfikacji wprowadzonych zmian konstrukcyjnych zaproponowano następujący plan badań:

- sporządzenie charakterystyk prędkościowych silnika samochodowego,
- sporządzenie charakterystyk regulacyjnych kąta wyprzedzenia zapłonu i składu mieszanki paliwo-powietrznej na jednocylinrowym silniku badawczym,
- określenie zdolności do samooczyszczania świec zapłonowych.

Charakterystyki prędkościowe sporządzono na 4-cylindrowym silniku 170A1.046 o pojemności skokowej 903 cm³. Silnik zamontowany był na hamowni silnikowej wyposażonej w elektronicznie sterowany elektrowirowy hamulec silnikowy.

Pozostałe badania przeprowadzono na zbudowanym na Politechnice Lubelskiej stanowisku do badań dynamometrycznych wyposażonym w jednocylinrowy silnik badawczy. Silnik posiada objętość skokową cylindra 390 cm³ i stopień sprężania 8,8. Silnik połączony jest z hamulcem elektrowirowym wyposażonym w kompletny system automatycznego sterowania. Do kontroli pracy układu zapłonowego oraz układu zasilania silnika w paliwo wykorzystany został autorski system sterowania silnikiem.

4. Wyniki badań eksperymentalnych

Pierwsza część planu badań obejmowała sporządzenie charakterystyk prędkościowych na czterocylinrowym silniku trakcyjnym. Charakterystyki sporządzono przy pełnym otwarciu przepustnicy.

3. Test stand and plan of the experiments

The research was conducted using three types of spark plugs manufactured by ISKRA Zakłady Precyzyjne: standard spark plug with single ground electrode, U-super with u-shaped groove in a ground electrode and special design with modified shape of an insulator. Modification of an insulator consisted in the replacement of typical cone shape with body of revolution with sinusoidal shape of generator. The aim of this modification was to lengthen current leak path resulting from carbon deposits.

In order to verify new designs a following research plan was proposed:

- comparison of automotive engine performance characteristics,
- comparison of ignition advance and air-fuel ratio regulation characteristics obtained on single cylinder research engine,
- evaluation of self-cleaning abilities.

Engine performance characteristics were obtained with the use of 4-cylinder mass production engine 170A1.046 with displacement of 903 cm³. The engine was mounted on a test bed equipped with an electronically controlled eddy-current dynamometer.

The rest of the research was conducted on a special test bed built in Lublin University of Technology. The test bed is equipped with single cylinder research engine with displacement of 390 cm³ and compression ratio of 8,8. The engine is coupled with eddy-current dynamometer equipped with complete automatic control system. Operation of ignition and fuelling system is governed by precise dedicated control system.

4. Results of the experiments

The first stage of the research covered analysis of performance characteristics obtained on the 4-cylinder vehicle engine. The characteristics were made at

W trakcie badań rejestrowano prędkość obrotową, moment obrotowy oraz godzinowe zużycia paliwa. Uzyskane wartości zostały skorygowane do warunków normalnych. Wyniki badań zaprezentowano na wykresie (rys. 1.)

Przy prędkości obrotowej 3000 obr/min, przy której silnik osiąga maksymalny moment obrotowy, w przypadku świec standardowych oraz U-super uzyskano wartość momentu około 65 Nm, co odpowiada znamionowym parametrom badanego silnika. W przypadku eksperymentalnych świec zapłonowych ze zmodyfikowanym izolatorem wartość momentu maksymalnego była o około 1 Nm mniejsza. Przy wyższych prędkościach obrotowych, powyżej 3000 obr/min, obserwowano jeszcze większy spadek momentu w porównaniu do pozostałych, badanych typów świec.

Dalsze badania na silniku jednocylindrowym zmierzały do określenia działania świec zapłonowych w ekstremalnych warunkach pracy silnika. W tym celu sporządzono charakterystyki regulacyjne składu mieszanki i kąta wyprzedzenia zapłonu. W trakcie badań rejestrowano moment obrotowy, godzinowe zużycie paliwa oraz objętościowy skład spalin.

Charakterystyki kąta wyprzedzenia zapłonu wykonano przy prędkości obrotowej 2500 obr/min i stechiometrycznym składzie mieszanki palnej. Miara obciążenia silnika była wartość współczynnika napełnienia cylindra, którą ustalono na 0,315 (małe obciążenie), a następnie na 0,65 (duże obciążenie). Przykładową charakterystykę regulacyjną przedstawiono na rysunku 2.

Analizując przebieg momentu obrotowego nie zaobserwowano istotnych różnic dla badanych typów

full load of the engine. During the research rotational speed, torque, and fuel consumption were recorded. Obtained results were corrected to normal temperature and pressure conditions. Figure 1. presents the results.

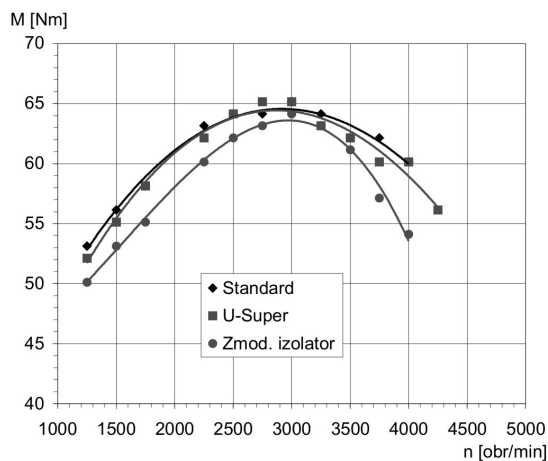
At rotational speed of 3000 rpm at which the engine delivers its maximum torque for standard and U-super spark plugs torque at level of 65 Nm was recorded. This value meets a nominal performance of the engine. In case of spark plugs with modified insulator maximum torque was 1 Nm smaller. At higher rotational speed decrease of torque was even more significant.

Research conducted on single-cylinder engine was aimed at evaluation of spark plugs performance under extreme engine operation conditions. In order to achieve this goal regulation characteristics of ignition advance and air-fuel ratio were made. During the research torque, fuel consumption and volumetric composition of exhaust gases were measured.

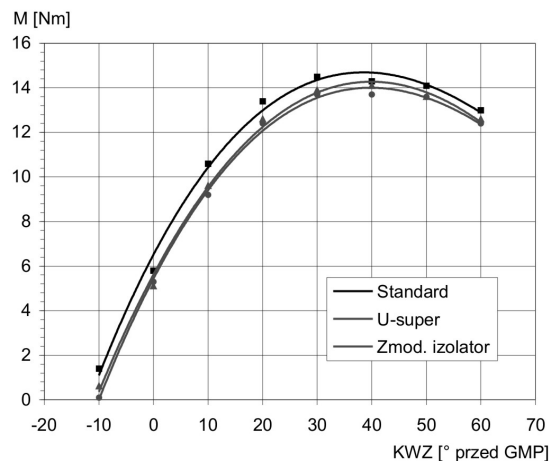
Ignition timing characteristic was made at rotational speed of 2500 rpm and at stoichiometric air-fuel ratio. Engine load was determined by volumetric efficiency, set at 0.315 (low load) and 0.65 (high load). Figure 2 presents exemplary comparative characteristic.

Analysis of torque curves for three types of spark plugs does not show any considerable differences. Similarly, specified fuel consumption and exhaust composition do not differ.

The next research method was based on comparison of air-fuel ratio regulation characteristics. Injection time at constant volumetric efficiency of the engine was varied in order to provide demanded amount of



Rys. 1. Zestawienie charakterystyk zewnętrznych momentu obrotowego dla różnych świec zapłonowych
Fig. 1. Comparison of torque characteristics for different types of spark plugs



Rys. 2. Charakterystyka regulacyjna kąta wyprzedzenia zapłonu przy współczynniku napełnienia cylindra 0,315 i stechiometrycznym składzie mieszanki
Fig. 2. Regulation characteristic of ignition advance at volumetric efficiency of 0,315 and stoichiometric air-fuel ratio

świec zapłonowych. Podobnie, nie stwierdzono zmian jednostkowego zużycia paliwa oraz składu spalin.

Kolejną, zastosowaną metodą badawczą była realizacja charakterystyk regulacyjnych składu mieszanki. Przy stałym napełnieniu cylindra zmieniano czas otwarcia wtryskiwacza w celu uzyskania zmian ilości paliwa dostarczanego do cylindra. Współczynnik nadmiaru powietrza określany był na podstawie składu spalin. Badania prowadzono w szerokim zakresie składu mieszanki, aby określić granice palności przy zastosowaniu świec zapłonowych różnych typów. Pomiary wykonano dla prędkości obrotowej silnika 2500 obr/min, kąta wyprzedzenia zapłonu 20 °OWK przed GMP oraz współczynnika napełnienia cylindra $\eta_v = 0,65$. Zbiorną charakterystykę składu mieszanki przedstawiono na rysunku 3.

Przy zastosowaniu świec zapłonowych U-super uzyskano największe wartości momentu obrotowego w zakresie mieszanek ubogich. Emisja węglowodorów w przypadku tych świec jest niemal w całym zakresie najniższa. Na uwagę zasługuje fakt, że granica, przy której występuje nagły wzrost emisji niespalonych węglowodorów przesunęła się w kierunku mieszanki ubogiej o wartość $\lambda = 0,1$. Oznacza to, że modyfikacja elektrody bocznej spowodowała rozszerzenie zakresu palności mieszanki w cylindrze silnika.

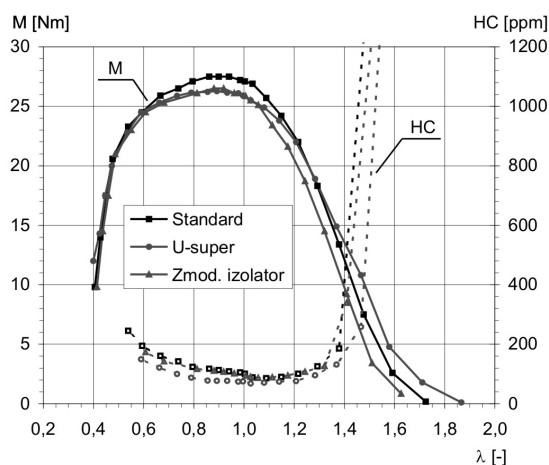
W celu sprawdzenia zdolności świec do samooczyszczania zaproponowano próbę polegającą na realizacji zadanej liczby cykli pracy silnika przy bardzo bogatej mieszance a następnie przy mieszance stechiometrycznej. Całą próbę przeprowadzono przy prędkości obrotowej 2500 obr/min i częściowym obciążeniu silnika. Przy składzie mieszanki $\lambda = 0,5$ silnik pracował przez 300 sekund, następnie zadano skokową zmianę składu mieszanki na stechiometryczny i po upływie kolejnych 45 sekund zatrzymano dopływ paliwa. Po przeprowadzeniu prób świec zapłonowe

injected fuel. The accurate air-fuel ratio coefficient was obtained on the base of exhaust composition analysis. In order to assess burning limits with the use of different spark plugs the research was conducted in wide range of air excess ratio. Measures were held at 2500 rpm and ignition timing of 20 deg. of crankshaft angle before top dead center and at volumetric efficiency $\eta_v = 0.65$. Comparative characteristic of torque and HC concentration in domain of air-fuel ratio is presented at figure 3.

With engine equipped with U-super spark plugs the highest values of torque were obtained in lean mixture region. Emission of unburned hydrocarbons was smaller in almost whole range of analyzed air-fuel ratio. It should be mentioned that lean burn limit, distinguished by dramatic rise of hydrocarbons emission, was shifted towards leaner mixtures by the value of $\lambda = 0.1$. It means that modification of ground electrode resulted in widening of air-fuel mixture burning limits.

In order to evaluate spark plugs self-cleaning ability a new test procedure was proposed. The test consists on realization of prescribed number of engine work cycles under very rich mixture and subsequent work under stoichiometric mixture. The test was held at rotational speed of 2500 rpm and part load of the engine. At first the engine was fed with rich air-fuel mixture ($\lambda = 0,5$) for 300 seconds and then mixture strength was switched to stoichiometry. After next 45 seconds fuel delivery was stopped. Afterwards spark plug was dismantled in order to assess amount of deposits on the insulator. Exemplary results are presented at photographs 1 and 2.

In case of U-super spark plugs considerable amount of soot deposit on the insulator was observed as a result of self-cleaning test. In contrast, on side surface of modified insulator a total self-cleaning



Rys. 3. Charakterystyka regulacyjna składu mieszanki przy współczynniku napełnienia cylindra 0,65 i kącie wyprzedzenia zapłonu 20 °OWK

Fig. 3. Air-fuel ratio regulation characteristic at volumetric efficiency of 0,65 and ignition advance 20 deg. before TDC

były wymontowywane z silnika w celu oceny stopnia zanieczyszczenia izolatora. Przykładowe fotografie świec zapłonowych po próbie samooczyszczania przedstawiono na fotografiach 1 i 2.

W wyniku przeprowadzenia próby samooczyszczania w przypadku świec U-super zaobserwowano dużą ilość sadzy pokrywającej izolator świecy. Dla odmiany na powierzchni bocznej zmodyfikowanego izolatora nastąpiło całkowite usunięcie osadów. Kolejne powtarzanie prób dowiodło, że zmiana kształtu izolatora korzystnie wpływa na przebieg procesu samooczyszczania.



Fot. 1. Świeca zapłonowa U-super po przeprowadzeniu próby samooczyszczania
Phot. 1. U-super spark plug after the self-cleaning test

5. Podsumowanie

Wprowadzenie rowka w elektrodzie bocznej świecy zapłonowej U-super korzystnie wpływa na przebieg zapłonu ładunku w cylindrze. Świadczy o tym większy zakres palności mieszanki w porównaniu ze świecami zapłonowymi o tradycyjnym kształcie elektrod. Cecha ta predysponuje taką konstrukcję do zastosowań w silnikach o dużych wahaniami współczynnika nadmiaru powietrza w cylindrze. Spodziewana jest także poprawa stabilności pracy silnika przy niewielkich obciążeniach oraz na biegu jałowym.

Modyfikacja kształtu izolatora świecy zapłonowej znacznie przyspiesza proces samooczyszczania, czego dowiodły wyniki zaproponowanej próby. Powodem takiego działania tego izolatora może być intensyfikacja zawirowań ładunku omywającego izolator o nieregularnym kształcie. Jednakże, jak wykazały badania na silniku trakcyjnym, intensyfikacja zawirowań jest przyczyną obniżenia momentu obrotowego silnika szczególnie przy wyższych prędkościach obrotowych. W związku z tym, konieczna jest optymalizacja tej konstrukcji zmierzająca do obniżenia wpływu kształtu izolatora na intensywność zawirowań przy jednoczesnym zachowaniu założonej, dłuższej drogi upływu prądu.

process took place. Further repetition of tests proved that insulator shape modification facilitates the self-cleaning process.



Fot. 2. Świeca zapłonowa ze zmodyfikowanym izolatorem po przeprowadzeniu próby samooczyszczania
Phot. 2. Spark plug with modified insulator after the self-cleaning test

5. Conclusions

Introduction of groove in a ground electrode of U-super spark plug advantageously influences process of air-fuel mixture ignition in a combustion chamber. It was confirmed by wider range of mixture burning in comparison with sparkplugs with traditional shapes of electrodes. This feature is in favour of using such spark plugs in engines characterized by large excursions of air-fuel ratio.

Modification of insulator shape substantially accelerates self-cleaning process. It was verified with the use of proposed self-cleaning test. The reason of such insulator performance could be intensification of swirl rate near the spark plug caused by its irregular shape. However, according to research done on the automotive engine such high swirl rate causes decrease of engine torque especially at higher rotational speeds. According to the obtained results, optimization of the insulator shape has to be done. It is needed to lower swirl rate while maintaining the lengthened current leakage path at the same time.

6. References

- [1] Kowalewicz A. : *Wybrane zagadnienia samochodowych silników spalinowych*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Radom 1996.
- [2] Ozdor N., M. Dulger, Sher E.: *Cyclic Variability in Spark Ignition Engines*. SAE Technical Paper 940987.
- [3] Materiały prasowe firm BOSCH, ISKRA, NGK.

Dr inż. Jacek HUNICZ

Mgr inż. Eliaż WAC

Katedra Silników Spalinowych i Transportu

Wydział Mechaniczny

Politechnika Lubelska

20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36

e-mail: j.hunicz@pollub.pl, e.wac@pollub.pl

Inż. Jerzy KABAŁA

ISKRA Zakłady Precyzyjne Sp. z o.o.

25-709 Kielce, ul. Mielczarskiego 47
