

WPŁYW TECHNOLOGII INŻYNIERII POWIERZCHNI NA ROZWÓJ MOTORYZACJI

INFLUENCE OF SURFACE TECHNOLOGY FOR EVOLUTION OF MOTORISATION

W opracowaniu przedstawiono wybrane osiągnięcia z zakresu inżynierii powierzchni mające istotny wpływ na postęp w motoryzacji. W szczególności odniesiono się do rozwiązań stosowanych w silnikach samochodowych szerzej skupiając się na skojarzeniu pierścieni tłokowych – tuleja cylindrowa.

Słowa kluczowe: Inżynieria powierzchni, motoryzacja, pierścień tłokowy

This paper shows chosen achievements in the area of surface engineering, which significantly influenced on development of motorization. Developments applied in car engines included association of piston ring and cylinder sleeve are shown in details.

Keywords: Surface engineering, motorization, piston ring

Wprowadzenie

Motoryzacja jest jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się dziedzin życia współczesnych cywilizacji. Decydują o tym spełnianie i akceptacja oczekiwań społecznych oraz poszerzający się rynek obszarów dostępności samochodów. Postęp w rozwoju motoryzacji nie byłby możliwy bez rozwoju technologii inżynierii powierzchni. Inżynieria powierzchni jest angażowana w dwóch sytuacjach: pierwsza dotyczy potrzeby zwiększenia trwałości i odporności na działanie różnych czynników, a druga wiąże się z potrzebą obniżenia kosztów wytwarzania wyrobu. Najbardziej efektywne rozwiązania stosowane są w obszarze ochrony przed korozją elementów nadwozia. Współczesne nadwozie posiada elektrochemiczną powłokę cynkową, a coraz częściej stopową cynkowo-metalową Zn-Fe (ok.20%), Zn-Ni (ok.12%), co stanowi doskonałe zabezpieczenie przed korozją i udarami mechanicznymi. Proces nakładania powłok na blachy karoseryjne realizowany jest w automatach galwanizacyjnych wmontowanych w hutniczy proces technologiczny. Części samochodu odlewane, odkuwane i wytłaczane chronione są powłokami Fe-Co (ok. 1%), Zn-Fe (ok.5%), Zn-Ni (7-12%), komory silnikowe powłokami Fe-Ni, a części układów hamulcowych Zn-Fe.

Stosowanie technologii inżynierii powierzchni umożliwia spełnianie postulatu, że skoro nie każdy fragment detalu jest narażony na duże obciążenia, więc nie konieczne musi być cały wykonany z tak drogiego materiału. W efekcie takiego podejścia wykonuje się elementy ze stosunkowo tanich materiałów i jednocześnie posiadających w wybranych miejscach odpowiednie warstwy powierzchniowe. Zgodnie z taką filozofią występują powłoki na widelkach synchronizatora skrzyni biegów, trzonkach i grzybkach zaworów silnikowych czy też obudowach alternatora. W dalszej części opracowania uwagę skoncentrowano na niektórych rozwiązaniach technologii inżynierii powierzchni stosowanych w budowie silników spalinowych.

Technologie inżynierii powierzchni w silnikach pojazdów samochodowych

Trzy grupy zadań dotyczą inżynierii powierzchni w odniesieniu do silników spalinowych pojazdów samochodowych:

Introduction

Motorization belongs to the most dynamically developing areas of modern society, which is mainly due to the greater availability of vehicles as well as higher and higher expectations of users. The advances in motorization apparently coincide with the evolution of surface engineering technologies. Efficient solutions are designed and implemented whenever there is a need for increased durability and resistance of vehicle parts and lower production costs. The aims of the close collaboration of surface and automotive industry engineers include better protection of a vehicle body against corrosion and mechanical shocks. This is achieved by applying various coatings such as electrochemical zinc or zinc-metal coatings containing approximately 20% of Zn-Fe or 12% of Zn-Ni.

Generally, the whole body and other metal sheet components are electroplated automatically during the manufacturing process. Other car parts, whether cast, forged or extruded, are coated with Fe-Co (approx. 1%), Zn-Fe (approx. 5%) and Zn-Ni (7-12%). Engine chambers, for instance, require Fe-Ni coatings, while brake system components Zn-Fe coatings.

Elements which are not exposed to high loads as a whole can be made of relatively cheap materials. Special coatings are deposited on areas where better strength and resistance are required. New surface engineering technologies are used to protect, for example, the gear box synchronizer fork, engine valve stems and heads, and automotive alternator casing.

The paper discusses also some of the surface engineering solutions for internal combustion engines.

Surface engineering technologies for motor vehicle engines

Surface engineering tasks aiming at the improvement of internal combustion engine efficiency for motor vehicles can be divided into three groups:

- podwyższenie odporności elementów silnika na zużycie tribologiczne,
- podwyższenie odporności elementów silnika na zużycie korozyjne i kawitacyjne,
- podwyższenie ogólnej sprawności silnika przez podwyższenie sprawności mechanicznej i cieplnej.

Silnik spalinowy jest maszyną termodynamiczną którego sprawność ogólna może być wyrażona jako iloczyn sprawności cieplnej η_c i sprawności mechanicznej η_m . Poprawa sprawności mechanicznej której wartość wynosi 0,75 – 0,9 jest możliwa poprzez zmniejszenie oporów ruchu w układzie tłokowo korbowym oraz w innych układach silnika np. układ zasilania paliwem, układ chłodzenia i inne. Około 30 - 50 % ogółu strat tarcia w silniku zachodzi w węźle tarcia tuleja cylindrowa – pierścienie tłokowe. Stąd największe możliwości zmiany dotyczą elementów tego węzła. Wymagania dotyczące materiałów na tuleje cylindrowe i pierścienie tłokowe są bardzo zróżnicowane (Tabela 1), toteż trudno je spełnić wybierając jeden rodzaj materiału. Dlatego w odniesieniu do tych elementów stosuje się zasadę, że rdzeń materiału zabezpiecza własności wytrzymałościowe, a powierzchnia własności tribologiczne i ochronne.

Dla przykładu ewolucji konstrukcji i technologii pierścienia tłokowego należy uwzględnić następującą sekwencję działań dla osiągnięcia rozwiązania współcześnie optymalnego: - pierścien tłokowy żeliwny lub stalowy, - zahartowany pierścień żeliwny lub stalowy, - pierścień jak wyżej z galwaniczną powłoką chromową, - pierścień jak wyżej z natryskowaną powłoką Mo, stopu Mo lub twardych związków (np. azotek tytanu) natryskiwanych cieplnie lub nakładanych innymi technikami np. CVD, PVD. Rozwiązaniem alternatywnym do chromowania jest wykonanie na powierzchni uszczelniającej pierścienia powłoki metodą natrysku cieplnego. Znane są przykłady zastosowania tej technologii przez czołowego producenta pierścieni tłokowych firmę Geotze w postaci pierścieni natryskiwanych molibdenem. Rastegar [6] przeprowadził wszechstronne badania przydatności plazmowo i technologią HVOF¹ natryskiwanych pierścieni tłokowych. Oprócz powłok molibdenowych przedmiotem badań były również powłoki z Cr_2O_3 , Cr_3C_2 , NiCrAlY. Porównawcze testy tribologiczne wykonane na testerze Camerona – Plinta wykazały, że najmniejsze zużycie pierścieni miało miejsce dla próbek pokrytych Cr_3C_2 metodą HVOF, natomiast najniższe zużycie współpracującej z pierścieniem próbki uzyskano dla pierścieni pokrytych stopem molibdenu z żelazem. Mając na uwadze zarówno zużycie pierścienia jak i współpracującej z nim gładzi najkorzystniejszy rezultat osiągnięto również dla pierścieni pokrytych stopem molibdenu z żelazem. Interesujące jest, że według cytowanych badań drugą pozycję pod względem odporności na zużycie zajmują pierścienie z powłoką z Cr_2O_3 natryskiwaną plazmowo. Nadsprzedzanie dobrze powłoka ta znosiła testy promieniowego rozginania pierścieni. W innych źródłach podaje się informacje o wykorzystaniu metody łukowej do nanoszenia CrN, a w jeszcze innych podkreśla się zalety pierścieni z powłoką TiN nanoszonej metodami PVD [3, 4].

- those increasing the tribological wear resistance of engine elements
- those increasing the corrosive and cavitation wear resistance
- those increasing the total efficiency of an engine by increasing its mechanical and thermal efficiency.

Internal combustion engines are thermodynamic devices whose overall efficiency can be expressed as the product of thermal and mechanical efficiency, η_c and η_m respectively. An increase in the mechanical efficiency of the order of 0.75-0.9 is possible by reducing the resistance to motion in the crankshaft-piston assembly and other engine systems, including fuel supply and cooling. About 30-50% of the total losses in friction occur in the cylinder sleeve-piston ring pair, thus its modifications are most desirable. As the requirements concerning the materials for cylinder sleeves and piston rings are quite varied (Table 1), they are difficult to meet if only one material is selected. Design engineers need to assume, therefore, that the material matrix is responsible for the element strength whereas the outer layer determines its tribological and protective properties.

Today's optimal design of the piston ring is a result of several improvements to material. First, steel or cast iron was used. Later, these were hardened and chrome plated. Now piston rings are made of hardened steel or cast iron coated with Mo or Mo alloys. Sometimes, coatings containing hard compounds (e.g. titanium nitride) are deposited by thermal spraying or other techniques, such as CVD or PVD. Chrome plating can also be replaced by coatings thermally sprayed over the ring sealing surface. Geotze, the leading producer of piston rings, is known to apply molybdenum coatings.

A detailed report on the suitability of piston rings with plasma- and HVOF-sprayed coatings was produced by Rastegar [6]. Even though the analysis was concerned with molybdenum coatings mainly, it provided results about Cr_2O_3 , Cr_3C_2 , NiCrAlY coatings as well. The comparative tribological study conducted with a Cameron-Plint tester shows that the lowest wear is reported for rings coated with HVOF-sprayed Cr_3C_2 . The lowest wear of the specimen being in contact with the ring is obtained for a ring with a molybdenum-iron alloy coating. If both the ring wear and the wear of the mating bearing surface are considered, the best results are reported for rings coated with a molybdenum-iron alloy. It should be noted that in all the above-mentioned studies, the second position is occupied by rings with plasma-sprayed Cr_2O_3 coatings. The coating functioned surprisingly well even when subjected to radial bending. Other sources state that the arc method can be applied to deposit CrN coatings. Still others emphasize the advantages of rings with TiN coatings deposited by the PVD methods [3, 4].

The tests conducted at the Kielce University of Technology focused on the development of a production technology of piston rings with thermally sprayed molybdenum coatings [1]. The thermal spray process can be divided into three stages: melting the material, particle flight and coating formation. Each of the

¹ HVOF – system natryskiwania cieplnego w którym prędkość gazów w palniku przewyższa prędkość dźwięku
HVOF – High Velocity Oxygen Fuel thermal process is a system of thermal spray where gas velocity exceeds the speed of sound

Tab. 1. Wymagane własności materiału na pierścieniu tłokowe i tuleje cylindrowe.

Wymagania stawiane materiałom na pierścieniu tłokowe	Wymagania stawiane materiałom na tuleje cylindrowe
<p>Wytrzymałościowe:</p> <ul style="list-style-type: none"> - wysoka wytrzymałość na zginanie i ściskanie, - wysoka granica sprężystości, - wysoka wytrzymałość zmęczeniowa, - wysoka udamność. <p>Dotyczące powierzchni i inne:</p> <ul style="list-style-type: none"> - niski i stabilny współczynnik tarcia przy współpracy z materiałem tulei, - dobre własności przeciwzatarciowe, - samosmarowość, - wysoka twardość, - wysoka gładkość powierzchni, - skłonność do utrzymywania oleju, - dobra zwilżalność olejem, - odporność na zużycie tribologiczne i korozyjne, - skłonność do szybkiego i prawidłowego docierania się do gładzi cylindrów, - dobra obrabialność. 	<p>Wytrzymałościowe:</p> <ul style="list-style-type: none"> - wysoka wytrzymałość na rozciąganie, - wysoka wytrzymałość zmęczeniowa, - zdolność tłumienia drgań, - stabilność własności przy zmiennych temperaturach i obciążeniach. <p>Dotyczące powierzchni i inne:</p> <ul style="list-style-type: none"> - dobre własności przeciwzatarciowe, - odporność na zużycie tribologiczne, korozyjne i kawitacyjne, - dobra przewodność cieplna zwłaszcza dla silników chłodzonych powietrzem, - dobre własności technologiczne w procesie odlewania i obróbki skrawaniem, - zdolność do tłumienia drgań.

W Politechnice Świętokrzyskiej prowadzono badania nad opracowaniem technologii wytwarzania pierścieni tłokowych z natryskiwanyymi cieplnie powłokami molibdenowymi [5]. Proces natryskiwania cieplnego, w wyniku którego otrzymujemy powłokę można podzielić na trzy etapy: topienie materiału, lot cząstki oraz tworzenie się warstwy. W każdym z tych etapów występuje szereg czynników decydujących o właściwościach powłoki. W cytowanych badaniach ograniczono się do określenia wpływu rodzaju płomienia przy natryskiwaniu. Stwierdzono, że najkorzystniejsze własności powłoki pod względem odporności na zużycie osiąga się przy natryskiwaniu płomieniem obojętnym. Zwiększona ilość twardych tlenków powstająca przy natryskiwaniu płomieniem utleniającym osłabia spoiwość warstwy, co z kolei prowadzi do wykruszania ziaren powłoki w procesie zużycia. Intensywne wykruszanie ziaren powłoki występuje również przy natryskiwaniu płomieniem redukującym. W tym przypadku uzyskuje się słabą spoiwość niezupełnie stopionych ziaren molibdenu. Powłoka natryskiwana płomieniem obojętnym charakteryzuje się występowaniem umiarkowanej ilości twardych tlenków oraz por spójnych dominującymi ziarnami molibdenu. Próby poprawy własności powłoki poprzez jej wygrzewanie w atmosferze argonu przy temperaturze 800 °C przez okres 1 h prowadzą do zmniejszenia się ilości tlenków oraz wyraźnego zmniejszenia porowatości powłoki. Tym zmianom towarzyszy jednak spadek twardości powłoki, co skutkuje zmniejszeniem odporności na zużycie. Uzyskane wyniki przekonują, że wysoka odporność powłok molibdenowych na zużycie jest uzależniona od obecności w strukturze powłoki twardych tlenków molibdenu. Skuteczność pokrycia pierścienia molibdenem badano doświadczalnie poprzez porównanie zużycia tulei cylindrowej współpracującej z omawianym pierścieniem i pierścieniem z powłoką galwaniczną Cr.

Na rysunku 1 przedstawiono fragment przekroju poprzecznego pierścienia tłokowego z zaczernioną powłoką molibdenową. Powłoka molibdenowa o grubości 0,3 mm znajduje się w specjalnie wyprofilowanym kanałku i nie obejmuje całej szerokości pierścienia. Takie usytuowanie powłoki eliminuje możliwość wykruszania się jej krawędzi i zapewnia bardzo

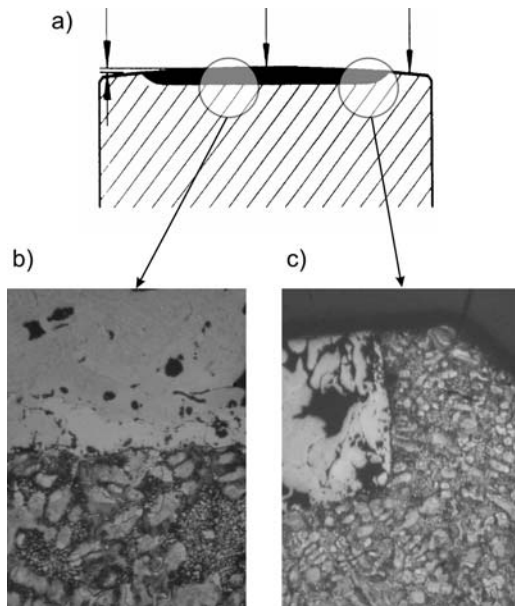
Tab. 1. Desired properties of the piston ring and cylinder sleeve materials.

Requirements for piston ring materials	Requirements for cylinder sleeve materials
<p>Strength:</p> <ul style="list-style-type: none"> - high bending and compressive strength, - high limit of elasticity, - high fatigue strength, - high impact resistance. <p>Surface and other properties:</p> <ul style="list-style-type: none"> - low and stable coefficient of friction when in contact with the sleeve material, - good antiseizure properties, - self-lubrication, - high hardness, - high surface smoothness, - good lubrication, - good oil wettability, - resistance to tribological and corrosive wear, - susceptibility to quick and correct grinding in to the cylinder bearing surface, - good machineability. 	<p>Strength:</p> <ul style="list-style-type: none"> - high tensile strength, - high fatigue strength, - damping capacity, - stability of properties at changeable temperatures and loads <p>Surface and other properties:</p> <ul style="list-style-type: none"> - good antiseizure properties, - resistance to tribological, corrosive and cavitation wear, - good thermal conductivity especially for air-cooled engines, - good technological properties in the casting and cutting processes, - damping capacity.

three stages depends on a number of factors, which determine the coating properties.

This study discusses only the effect of the flame type. It has been found that the best wear resistance is achieved if the coating is applied with a neutral flame. An increase in the number of hard oxides resulting from the application of an oxidizing flame causes a reduction in the coating cohesion and, finally, grain chipping due to wear. Intensive chipping will be observed also after a reducing flame is used. The poor cohesion must be owing to incomplete combustion of the molybdenum particles. A coating deposited with a neutral flame is characterized by the occurrence of a moderate number of hard oxides and pores interconnected by predominant molybdenum particles. Attempts to improve the coating properties by holding it for 1 hour at a temperature of 800 °C in the presence of argon will result in a smaller number of oxides and far worse porosity. These changes will be accompanied by a decrease in the coating hardness and, consequently, lower wear resistance. The results show that the high wear resistance of a molybdenum coating is conditioned by the presence of hard molybdenum oxides in the coating structure. The efficiency of a molybdenum coating deposited over a ring was studied empirically by comparing the wear of the cylindrical sleeve being in contact with the ring or one co-acting with the chrome plated ring.

Figure 1 shows part of a cross-section of the piston ring with a molybdenum coating (marked in black). The 0.3mm thick molybdenum coating does not cover the whole ring width; it is deposited only over a specially profiled channel, which prevents edge chipping and assures very good adhesion to the substrate. Piston rings for engine 357 obtained by applying this technology were tested in motion with an HWZ-3 test bed. The tests were conducted in accordance with the Polish standard PN-79/1374-04 concerning automotive engines, test bed technologies and reliability tests. In the engine analysis, molybdenum-coated rings were fitted on cylinders 2, 4 and 6 in the piston unit, whereas chrome-plated rings were fitted on cylinders 1, 3 and 5. The tests involved observing the engine operation, controlling the oil consumption and pressure, preparing the engine characteristics,

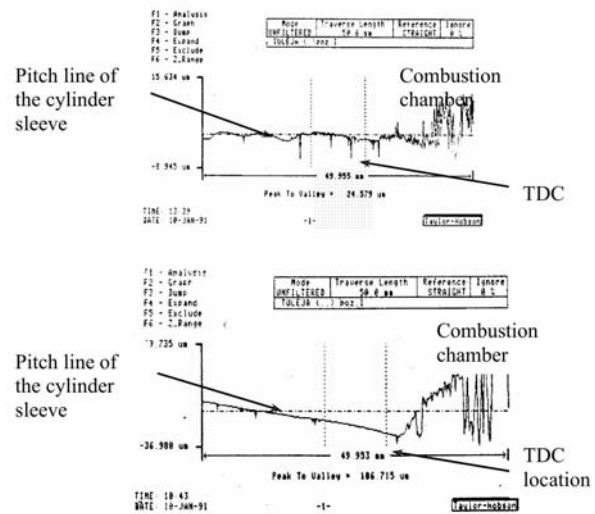


Rys. 1. Widok powłoki molibdenowej na pierścieniu tłokowym a) schemat, b) pow. 300X, c) pow. 200X
 Fig. 1. Piston ring with molybdenum coating: a) scheme, b) mag. 300x, c) mag. 200x

dobrą przyczepność do podłoża. Wykonane wyżej wymienioną technologią pierścienie do silnika 359 posłużyły do ruchowych prób stanowiskowych na hamowni HWZ-3. Próby przeprowadzono według normy PN-79/1374-04 „Silniki samochodowe, badania stanowiskowe, badania niezawodności”. W badanym silniku w zespole tłokowym na II, IV i VI cylindrach zamontowano pierścienie z powłoką molibdenową, natomiast na I, III i V cylindrach pierścienie chromowane. W trakcie badań prowadzono obserwacje pracy silnika, kontrolowano zużycie i ciśnienie oleju, sporządzano jego charakterystyki oraz próby sprężania w poszczególnych cylindrach. Nie stwierdzono odstępstw od przyjętych norm.

Ocena zużycia gładzi cylindrowej wykonana metodą profilografowania po rozmontowaniu silnika wykazała istotnie różny profil zużycia dla obydwu badanych rodzajów pierścieni tłokowych. Z analizy mikro i makrogeometrii powierzchni gładzi cylindrowej po próbie stanowiskowej wynika, że zużycie tulei w otoczeniu górnego punktu zwrotnego (GPZ) jest do sześciu razy mniejsze dla tulei współpracujących z pierścieniami pokrytymi powłoką molibdenową niż dla tych które współpracowały z pierścieniami chromowanymi.

Ewolucja konstrukcji tulei cylindrowych w zakresie inżynierii materiałowej prowadzi od stosowania żeliwa szarego przez stopowe do stali hartowanej i azotowanej, aż do tulei wykonanych ze stopów aluminium (Al-Si). Powierzchnie wewnętrzne niektórych współczesnych tulei cylindrowych natryskiwane są cieplnie proszkami na bazie żelaza. Uzyskana powłoka po obróbce ma grubość 70 – 150 μm , porowatość 2%, zawartość tlenków 2% i twardość $HV_{0,3}$ 350-650. Takie rozwiązanie gwarantuje bardzo dobre własności tarciowe głównie dzięki wykorzystaniu cech smaru stałego jakie posiadają tlenki żelaza tworzące się w procesie natrysku [2, 5].



Rys. 2. Profilogram otoczenia GZP tulei cylindrowej współpracującej z pierścieniem: a) z powłoką molibdenową, b) z powłoką galwanicznym Cr
 Fig. 2. Profilograf of cylinder sleeve collaborated with: a) molybdenum coating, b) chrome plating coating

and testing compression in each cylinder. No departure from the standard was reported.

The cylinder bearing surface wear was measured by means of a profilograph after dismantling the engine. The results show that the wear profile for the two types of piston rings differs. The micro- and macroanalyses of the cylinder bearing surface after the bed test show that the wear in the top dead centre (TDC) location is up to six times smaller for a sleeve mating with molybdenum-coated rings than for one cooperating with chrome plated rings.

The evolution of the cylinder sleeve design has been possible thanks to the advances in materials science and engineering. Sleeves made of grey cast iron were replaced by ones made of alloy cast iron, then hardened and nitrided steel, and, finally, of aluminum alloys (Al-Si). The inner surface of some of the modern cylinder sleeves is coated with thermally sprayed iron-based alloy powders. The coating after machining is 70 – 150 μm in thickness, its porosity being 2%, oxide content 2%, and hardness $HV_{0,3}$ 350-650. This solution guarantees very good friction properties relating to the formation of iron oxides during the spray process acting as solid oil [2, 5].

Podsumowanie

Opierając się na analizie podanych przykładów należy zauważyć, że zachodzący postęp w motoryzacji był możliwy dzięki rozwojowi inżynierii powierzchni. Rozwiązania powstałe dzięki tej technologii wielokrotnie zwiększyły trwałość elementów pojazdów i wydłużyły przebiegi pomiędzy naprawami głównymi. Jednocześnie obserwuje się stymulujące oddziaływanie techniki motoryzacyjnej na rozwój inżynierii powierzchni. Takie współdziałanie w niedalekiej przyszłości umożliwi pracę silników na wyższych parametrach i pozwoli wyeliminować kolejne „słabe” punkty.

References

- [1] Antoszewski G.: *Własności laserowo i plazmowo modyfikowanych ślizgowych węzłów tarcia na przykładzie uszczelnień czolowych*. Politechnika Świętokrzyska Seria Monografie 17 Kielce 1999.
- [2] Barbezat G.: *The State of the art of the internal plasma spraying on cylinder bore in AlSi cast alloys*. Journal of Automotive Technology, Vol2, pp.47-52.
- [3] Han D., Lee J.: *Analysis of the piston ring lubrication with a new boundary condition*, Tribology International 31(12), 1998.
- [4] Kaźmierczak A.: *Wybrane kierunki działań tribologii w silniku spalinowym*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn Z.3(123) 2000.
- [5] Vander Kolk G.J. , Hieke A., Hurkmans T., Tobler M., Lieblisch J.: *Carbon-based coatings used for high loaded automotive parts* – Inżynieria Powierzchni nr 2/2005.
- [6] Rastegar F.: *Ring Coatings for a low Heat Rejection Engine*. 11th ITSC Orlando USA 1992.

Conclusion

Studying the selected examples, one can notice that the development of motorization has been possible thanks to the advances in surface engineering. Numerous successfully implemented solutions have resulted in better durability of motor vehicle components and longer failure-free performance periods. The needs of the automotive industry stimulate surface engineers to invent better materials and more efficient technologies. The results of this cooperation will include better operation parameters of engines and further elimination of weak points.

Dr hab. inż. Bogdan ANTOSZEWSKI, prof PŚk
Dr inż. Wojciech ŻÓRAWSKI

Katedra Inżynierii Eksploatacji
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Politechnika Świętokrzyska
25-314 Kielce ul. Al. 1000-lecia PP 7
e-mail: korba@tu.kielce.pl, ktrwz@tu.kielce.pl
