

Aleksandar Rac, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade
Aleksandar VencI, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade

TRIBOLOGICAL COATINGS ON ALUMINIUM ALLOYS USED IN ENGINE CYLINDER BORE – PISTON SYSTEM

ТРИБОЛОШКЕ ПРЕВЛАКЕ ЗА АЛУМИНИЈУМСКЕ ЛЕГУРЕ ЦИЛИНДАРСКО-КЛИПНЕ ГРУПЕ МОТОРА СУС

1. Introduction

Aluminum alloys have increasing applications in the production of internal combustion engines, both for the making their components or whole engine cylinder blocks. Use of AlSi alloys as a substitution for engine cylinder blocks made of grey cast iron, in addition to positive aspects such as reduction of engine mass, have their shortcomings reflected, first of all, in inappropriate tribological properties of this material. In such cases there is a requirement to improve wear resistance of aluminium alloys, i.e. to provide at least such tribological properties like those of grey cast iron or even better ones /1/.

One of the frequently methods applied to improve tribological characteristics of aluminium alloys is using coatings, i.e. to modify surfaces of the cylinder-piston system. Those coatings must meet the requirements of great thermal stresses and wear resistance. Otherwise, the result could be delamination of coating material with catastrophic failures. For this reason the following review is focused on tribological aspects of coating materials that can meet the requirements of modern internal combustion engines.

1. Увод

Алуминијумске легуре налазе све већу примену у производњи мотора СУС, било за израду његових компоненти или целих блокова мотора. Коришћење AlSi легура као замена за блок мотора од сивог лива, поред позитивних страна, као што је смањење масе мотора, има и својих недостатака који се огледају, пре свега, у неодговарајућим триболошким својствима тог материјала. Због тога се, у тим случајевима поставља захтев за побољшање отпорности алуминијумских легура на хабање тј. обезбеђење најмање таквих триболошких својстава каква има сиви лив или и бољих /1/.

Једна од често коришћених метода за побољшање триболошких карактеристика алуминијумских легура је наношење превлака тј. модификовање површина цилиндарско-клипне групе. Те превлаке морају да задовоље услове великих термичких напрезања и отпорности на хабање, јер у супротном може да дође до одвајања материјала превлаке и катастрофалног оштећења. Због тога је наредни преглед фокусиран на триболошке аспекте материјала за превлаке које могу да задовоље захтеве савремених мотора СУС.

2. Trends in development of tribological coatings of the cylinder bore-piston system

As the major mechanical power losses in internal combustion engines occur in the cylinder-piston system (nearly 40% of all losses), it is quite understandable that those parts must meet appropriate requirements as it would provide adequate savings in fuel consumption, high engine reliability and consequently competitive market prices. Those requirements can be expressed as:

- low friction of the cylinder bore-piston system
- small wear of the cylinder bore-piston system
- seizure resistance of the cylinder bore-piston system
- reduction of lubricating oil consumption

Interaction of the piston skirt and cylinder bore surface is thus of special importance as it essentially affects friction, noise and vibrations and also surface seizure.

This is why use of aluminium pistons is better than of pistons made of grey cast iron. As lighter in weight aluminium pistons reduce total engine mass and inertial forces. This reduces engine vibration. Better thermal conductivity of aluminium alloys allows better heat elimination. The basic disadvantage is that aluminium has a greater coefficient of thermal expansion than grey cast iron and this requires consideration of adequate clearance at operating temperature. Solutions to minimize clearance at operating temperatures cover use of piston coatings of nickel-ceramic composites or molybdenum, iron-based coatings and other materials as well providing friction reduction between the piston skirt and cylinder. At the same time, piston coatings, most frequently in the piston skirt and grooves, should provide a relatively small adhesive wear. Research conducted in this direction by General Motors shows that pistons made of aluminium alloy (Tab.1)

2.Трендови у развоју триболошких превлака цилиндарско – клипне групе

С обзиром да су у мотору СУС највећи механички губици код цилиндарско-клипне групе (близу 40 % свих губитака), потпуно је разумљиво да се овим деловима постављају и одговарајући захтеви, чијим испуњењем треба да се обезбеди одговарајућа уштеда у потрошњи горива, висока поузданост мотора, а time и конкурентна цена на тржишту. Ти захтеви се могу исказати као:

- мало трење цилиндарско-клипне групе,
- мало хабање цилиндарско-клипне групе,
- отпорност на заривавање цилиндарско-клипне групе и
- смањење потрошње уља за подмазивање.

Интеракција плашта клипа и површине цилиндра је с тога од посебне важности, јер битно утиче како на трење, тако и на буку и вибрације, али и на појаву заривавања површина.

Због тога је коришћење алуминијумских клипова повољније од клипова израђених од сивог лива. Као лакши, алуминијумски клипови смањују укупну масу мотора, али и инерцијалне силе, што смањује вибрације мотора. Боља термичка проводљивост алуминијумских легура омогућује боље одвођење топлоте. Основни недостатак је већи коефицијент термичког ширења алуминијума у односу на сиви лив, што захтева разматрање адекватног зазора на радној температури. Решења за минимизирање зазора на радној температури обухватају коришћење превлака на клипу од никл-керамичких композита или молибдена, превлака на бази гвожђа, али и других материјала, што обезбеђује смањење трења између плашта клипа и цилиндра. Истовремено, превлаке на клипу, најчешће на плашту клипа и жљебовима, треба да обезбеде релативно мало адхезивно хабање. У том правцу, истраживања извршена у GM-у

with Ni-P-BN coating, iron plating and Ni-W plating have very good scuffing resistance when sliding against Al cylinder bore samples /2/.

(General Motors) показују да клипови израђени од алуминијумских легура (таб.1), са превлакама на бази гвожђа, Ni-P-BN и Ni-W, а у контакту са сличним материјалом цилиндра имају повољна триболошка својства /2/.

Хемијски састав алуминијумске легуре А390, %
(Chemical composition of aluminium alloy А390, %

Таблица 1
Table 1)

	Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Cr	Zn	Fe	Ni	Al
Клип (Piston)	18,14	1,21	1,11	0,18	0,17	-	0,16	0,68	1,27	Остатак (Balance)
Цилиндар (Cylinder)	15,19	5,05	0,58	0,17	0,03	0,30	0,26	0,78	0,03	Остатак (Balance)

The above research has been carried out on the tribometer and on the engine test stand (dynamometer test). It has proved that simulation tests on the tribometer yield appropriate results and as such they can be successfully used for rapid and low cost studying of material tribological properties.

The cylinder block has been traditionally made of gray cast iron. However, the mentioned reasons for high engine performance have conditioned various material replacements. Aluminium alloys are certainly a usable alternative. Unfortunately, most aluminium alloys, especially those suitable for mass production from the technological-economic aspect, do not have satisfactory wear resistance, i.e. their tribological properties are relatively poor. Today, because of this, the surface engineering of the cylinder bore-piston system of internal combustion engines is in the focus of most producers of aluminium alloy engines /3/.

Наведена истраживања су вршена на трибометру и мотору СУС на пробном столу (динамометарска испитивања). Она су потврдила, да симулациона испитивања на трибометру дају одговарајуће резултате и да се као таква могу успешно да користе за брза и јефтина истраживања триболошких својстава материјала.

Цилиндарски блок је традиционално израђиван од сивог лива. Међутим, већ наведени разлози за високу економичност мотора условили су различите замене материјала. Алуминијумске легуре су свакако употребљива алтернатива. Нажалост, већина алуминијумских легура, посебно оних које су погодне са техно-економског становишта за масовну продукцију, немају задовољавајућу отпорност на хабање тј. триболошка својства су им релативно неповољна. Због тога је, данас, инжењеринг површина цилиндарско-клипне групе мотора СУС у жижи интересовања већине произвођача мотора од легура алуминијума /3/.

3. Aluminium cylinder coatings

Production of a much lighter and low cost internal combustion engine block of aluminium alloy demands that cylinder surface be specially treated for improvement of tribological characteristics

3. Превлаке за алуминијумске цилиндри

Производња много лакшег и јефтинијег блока мотора СУС од легуре алуминијума, захтева да се површина цилиндра посебно третира ради побољшања, пре свега, триболошких

first of all. Various techniques have been researched in this direction. Among them, coatings occupy a significant place and at this moment plasma deposition and laser surface treatment are being particularly emphasized. Coating materials mostly used are iron oxides and various composite coatings. This is why a review is here shown of results achieved by using above methods.

Method of plasma deposition - PTA has been used for research of composite coatings by the author from South Australia /4/. The project, whose results have been published in the quoted paper, has been financially supported by the Commonwealth organization CSCIRO. The used method allows deposition of macro coating from 3 to 5 mm thickness and this means that the substrate affect to tribological characteristics is negligible.

Aluminium 5083 has been used as a basic material on which composite coatings have been deposited. Its chemical composition is shown in Table 2.

Хемијски састав алуминијумске легуре 5083, %
(Chemical composition of aluminium alloy 5083, %

Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cr	Cu	Ti	Al
4,15	0,47	0,35	0,23	0,19	0,16	0,09	0,01	Остатак (Balance)

Таблица 2
Table 2)

Coating materials have essentially been aluminium and nickel powder of commercial purity and mixed in such a way to obtain Al-2% Ni matrix. Nickel has been added to improve wear resistance of structure. Ceramic powders Al_2O_3 and SiC have been individually mixed so that a series of composite powders has been obtained.

Characterization of deposited coatings has been performed in respect of mechanical properties and characteristics of microstructure. From the tribological-mechanical aspect hardness, surface roughness and adhesion to the substrate are of significance.

карактеристика. Различите технике су у том правцу истражене. Међу њима, превлаке заузимају значајно место и у овом тренутку издвајају се поступци плазма депозиције и ласерско третирање површина. При томе се као материјали превлака најчешће користе оксиди гвожђа и различите композитне превлаке. Због тога се овде даје преглед постигнутих резултата коришћењем наведених метода.

Поступак плазма депозиције - ПТА коришћен је за истраживања композитних превлака од стране аутора из јужне Аустралије /4/. Пројекат, чији су резултати објављени у наведеном раду, финансијски је потпомогнут од Комонвелт организације CSCIRO. Наведени поступак омогућује депоновање макропревлака од 3 до 5 mm дебљине, што значи да је утицај основе на триболошке карактеристике занемарљив.

Као основни материјал на који су нанете композитне превлаке коришћен је алуминијум 5083, чији је хемијски састав приказан у табlici 2.

Материјал превлаке је у суштини био прах алуминијума и никла, комерцијалне чистоће, намешан тако да се добије Al-2%Ni матрица. Никл је додат ради побољшања отпорности на хабање структуре. Керамички прахови Al_2O_3 и SiC су појединачно намешавани, тако да је добијена серија композитних прахова.

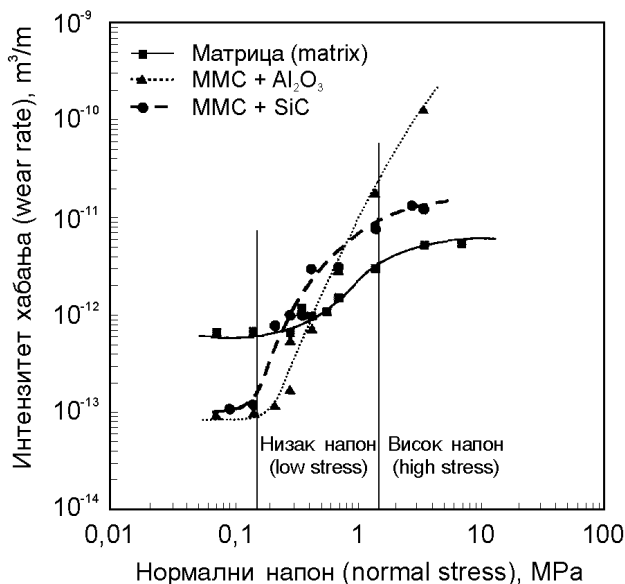
Карактеризација нанетих превлака вршена је у односу на механичка својства и карактеристике микроструктуре. Са триболошко-механичког аспекта од значаја су тврдоћа, храпавост површина и адхезија за основу.

A tribometer pin on disc has been used to test composite coating wear. Wear characteristics have been investigated in the function of load and/or temperature /5/. Test has been performed at ambient temperature and at elevated temperature of 523 °K under the conditions of dry sliding condition. Sliding speed has been 0,2 m/s and sliding distance has been 720 meters.

Wear rate in the function of normal stress at ambient temperature shows that an increase of stress value entails an increase of wear rate. (Fig.1). For low stress values (0,14 MPa) composite Al_2O_3 shows smallest wear, but under stress of 1,42 MPa the indicated composite shows highest wear. This can be explained by a weak bonding of Al_2O_3 particles that easily separate from the coating matrix under high stress and continue to act as abrasive particles.

За испитивање хабања композитних превлака коришћен је трибометар епрувета на диску (pin on disc) Карактеристике хабања су истраживане у функцији оптерећења и/или температуре /5/. Тестови су спроведени на собној и повишеној температури од 523 °K у условима трења сувих површина. Брзина клизања је била 0,2 m/s, а пут клизања износио је 720 метара.

Интензитет хабања у функцији нормалног напона при собној температури указује да са порастом вредности напона долази и до пораста интензитета хабања (сл.1). При томе, за мале вредности напона (0,14 MPa) композит са Al_2O_3 показује најмање хабање, али при напону од 1,42 MPa наведени композит показује највеће хабање. То се објашњава слабом везом Al_2O_3 делића, који се лако издвајају из матрице превлаке при великом напону и даље делују као абразивне честице.



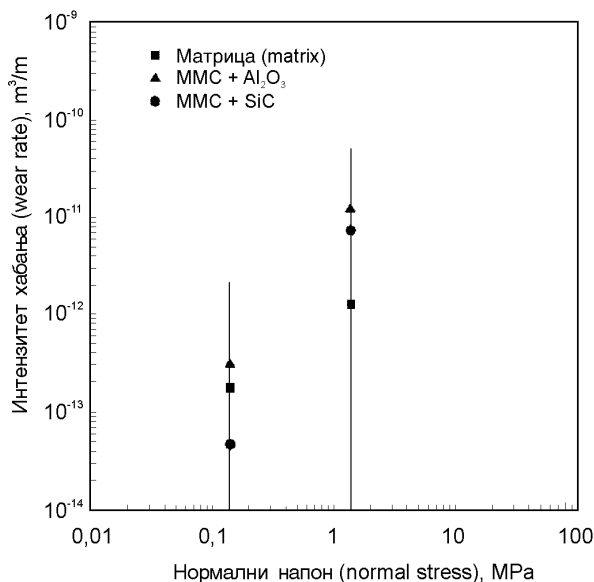
Слика 1. Интензитет хабања у функцији нормалног напона на собној температури
(Figure 1. Wear rate in the function of normal stress at ambient temperature)

At elevated temperatures and for selected stress values, wear rates are similar to

На повишеним температурама и за изабране величине напона, интензитети

those obtained at ambient temperature and this point to a relatively small temperature effect (Fig. 2).

хабања су слични оним који су добијени на собној температури, што указује на релативно мали утицај температуре (сл.2).



Слика 2. Интензитет хабања за два нормална напона при повишеној температури (523 °K)

(Figure 2. Wear rate for two normal stresses at elevated temperature (523 °K))

Various wear mechanisms have been determined for various test conditions. Under low stress and at ambient temperature abrasive and oxidative wear primarily occur. Under high stresses and at ambient temperature delamination wear occurs and this means that under such conditions strength of interface bond is of particular importance. At elevated temperature and under low stress abrasive and delamination wear occurs whereas under high stresses adhesive wear occurs in addition to delamination.

Plasma spray deposition, as a process of coating deposits on aluminium alloys has been developed by the Sulzer Metco company to the extent of commercial use /6/. Two materials have been proposed for coating material: one based on iron and iron oxide whereas the other consists of

Различити механизми хабања су утврђени за различите услове испитивања. При малом напону и собној температури јавља се, преваходно, абразивно и оксидационо хабање. При великим напрезањима и собној температури настаје деламинационо хабање, што значи да је у тим условима од посебног значаја јачина међуповршинске везе. На повишеној температури и малом напону који делује на композитну превлаку настаје абразивно и деламинационо хабање, док при великим напонима поред деламинације, настаје и адхезивно хабање.

Плазма спреј депозицију, као поступак наношења превлака на алуминијумску легуру, развила је фирма Сулцер Метко (Sulzer Metco) и то до степена комерцијалне употребе /6/. За превлаке, предлажу се два материјала: један на бази гвожђа и оксида гвожђа, док се

steal, boron-nitride and nickel. Coatings obtained from those two materials have good tribological properties and do not require any special and preceding preparation of the aluminium surface on which they are deposited.

As indicated by the Sulzer Metco company residual porosity, after iron coating has been deposited, considerably helps to reduce friction as micro cavity serve as a lubricant reservoir allowing improved lubrication process. Wear resistance is better compared to gray cast iron cylinders.

The process is called Rota Plasma 500 and has been developed especially for the needs of car industry. The system can be integrated in the production line of engine cylinder blocks /7/.

Laser treatment of coating material deposited on aluminium alloys is also a technique that is increasingly developing. Iron oxides can be considered as an adequate choice for coating material because, just like gray cast iron, they provide appropriate mechanical and tribological properties.

Research that has been carried out shows that iron oxide or magnetite coatings, when laser-treated, give coatings significant wear resistance /8,9/. Research has been realized with the help of the tribometer block on disc at the sliding speed of 4,4 m/s. The block was made of aluminium alloy A319 with a coating whereas the disc was made of steel. Total testing time was 25 minutes under load of 12 N.

Chemical composition of the basic material is given in Table 3. Iron oxide and magnetite have been commercial powders, 99,5% purity and grain size less than 15 μm . Coating micro hardness has been determined by the Knop method whereas to determine structure characteristics an X-ray spectrometer has been used.

други састоји од челика, борон-нитрида и никла. Превлаке добијене од ова два материјала поседују добра триболошка својства и не захтевају никакву посебну и претходну припрему површине алуминијума на коју се наносе.

Како наводи фирма Сулцер Метко заостала порозност, након nanoшења превлаке од гвожђа, помаже значајно да се смањи трење, јер микрошупљине служе као резервоар за мазиво, што омогућује да се побољшава процес подмазивања. Отпорност на хабање је боља у поређењу са цилиндрима од сивог лива.

Поступак се назива Рота Плазма 500 и развијен је специјално за потребе аутомобилске индустрије. Систем се може интегрисати и у производну линију блока мотора /7/.

Ласерско третирање материјала превлаке нанете на алуминијумску легуру је, такође, техника која се интензивно развија. Оксиди гвожђа се могу сматрати одговарајућим избором за материјал превлаке због тога што, као и сиви лив, обезбеђују одговарајућа механичка и триболошка својства.

Извршена истраживања показују да превлаке од оксида гвожђа или магнетита, када се ласерски третирају, дају превлакама значајну отпорност на хабање /8,9/. Испитивања су реализована помоћу трибометра блок на диску (blok on disc) при брзини клизања од 4,4 m/s. При томе је блок израђен од алуминијумске легуре А319 са превлаком, док је диск био од челика. Укупно време испитивања било је 25 минута при оптерећењу од 12 N.

Хемијски састав основног материјала дат је у табелици 3. Оксид гвожђа и магнетит су били комерцијални прахови, 99,5 % чистоће и величине зрна мање од 15 μm . Микротврдоћа превлаке је одређена по Кноп методи, док је за утврђивање карактеристика структуре коришћен спектрометар са икс зрацима.

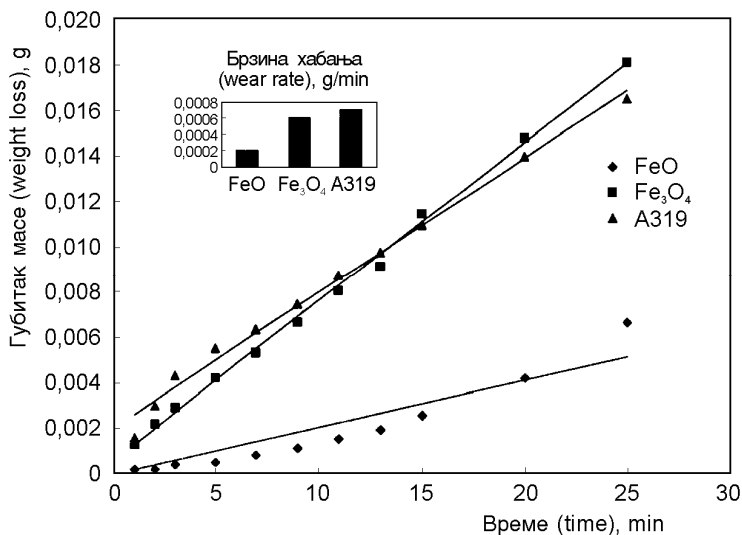
Хемијски састав алуминијумске легуре А319, %
(Chemical composition of aluminium alloy A319, %)

Таблица 3
Table 3)

Si	Cu	Mn	Fe	Mg	Zn	Ti	Ni	Al
5,5-6,5	3,0-4,0	<0,5	<0,1	<0,1	<0,1	<0,25	<0,35	Остатак (Balance)

During testing block mass loss was measured. Obtained results are shown in Figure 3. It can easily be concluded from obtained results that laser-treated oxide iron coatings yields least wear.

Током испитивања мерен је губитак масе блока. Добијени резултати су приказани на слици 3. Из добијених података лако се може закључити да ласерски третирана превлака од оксида гвожђа даје најмање хабање.



Слика 3. Зависност губитка масе од времена испитивања
(Figure 3. Mass loss vs. testing time)

4. Conclusions

4.1. Research carried out until now has shown that from technical and economic aspects iron-based coating deposits with the plasma spray process is one of the possible solutions for tribological problems of internal combustion engine cylinders made of aluminium alloys. Another suitable method is laser treatment of iron-based coatings.

4.2. During development and selection of method and technology for coatings of aluminium cylinders, one should have in mind that it is necessary to consider the

4. Закључак

4.1 Досадашња истраживања показују да је са техничког и економског аспекта наношење превлаке на бази гвожђа плазма спреј поступком једно од могућих решења за триболошке проблеме код цилиндра мотора СУС израђених од алуминијумских легура. Друга погодна метода је ласерско третирање превлаке на бази гвожђа.

4.2 При развоју и избору методе и технологије за превлаке алуминијумских цилиндара, треба имати у виду да је неопходно разматрати склоп цилиндар-

cylinder-piston-piston ring assembly and to optimize materials and coatings in order to achieve optimal operating condition of the system and required service life. This is so, because the cylinder-piston group is an integral tribological system and all parameters must be integrally defined.

клип-клипни прстен и извршити оптимизацију материјала и превлака како би се постигле оптималне радне карактеристике система и добио захтевани век трајања. Ово с тога што цилиндарско-клипна група представља јединствен триболошки систем и сви параметри морају бити интегрално дефинисани.

Literature

- [1] Vencel, A. and Rac, A., *New wear resistant Al based materials and their application in automotive industry*, MVM Special Edition, December 2004, page 115-139.
- [2] Wang, Y. and Tung, S., *Scuffing and wear behaviour of aluminum piston skirt coatings against aluminum cylinder bore*, Wear, 225-229, 1999, 110-1108
- [3] Becker, P.E., *Trends in tribological materials and engine technology*, Tribology int., 37, 2004, 569-575
- [4] Deuis, L.,R, Yellup, M.J., Subramanian, C., *Aluminium composite coatings produced by plasma transferred arc surfacing technique*, Materials Science and Technology, 13, June 1997, 511-522
- [5] Deuis, L.R. and Subramanian, C., *Dry sliding wear behaviour at ambient and elevated temperatures of plasma arc deposited aluminium composite coatings*, Materials Science and Technology, 16, Feb. 2000, 209-219
- [6] www.sulzmetco.com
- [7] Harrison, K., *Improved Performance in Car Engines through Plasma Spray Coatings*, IOM, The Institute of Materials
- [8] Dahotre, B.N., Nayak, S. and Popoola O.O., *The Laser Assisted Iron Oxide Coating of Cast Al Auto Engines*, JOM, Sept. 2001
- [9] Dasari, A., Nayak, S., Misra R., Popoola, O.O. and Dahotre B.N., *Surface characteristics and wear performance of laser surface engineered iron oxide coatings on cast aluminium alloy*, Materials Science and Technology, 18, Sept. 2002, 1036-1040.

Литература

- [1] Венцл, А. и Рац, А., *Нови материјали отпорни на хабање на бази Аl легура и њихова примена у моторној индустрији*, МВМ Специјално издање, децембар 2004, стране 115-139.
- [2] Wang, Y. and Tung, S., *Scuffing and wear behaviour of aluminum piston skirt coatings against aluminum cylinder bore*, Wear, 225-229, 1999, 110-1108
- [3] Becker, P.E., *Trends in tribological materials and engine technology*, Tribology int., 37, 2004, 569-575
- [4] Deuis, L.R., Yellup, M.J., and Subramanian, C., *Aluminium composite coatings produced by plasma transferred arc surfacing technique*, Materials Science and Technology, 13, June 1997, 511-522
- [5] Deuis, L.R. and Subramanian, C., *Dry sliding wear behaviour at ambient and elevated temperatures of plasma transferred arc deposited aluminium composite coatings*, Materials Science and Technology, 16, Feb. 2000, 209-219
- [6] www.sulzmetco.com
- [7] Harrison, K., *Improved Performance in Car Engines through Plasma Spray Coatings*, IOM, The Institut of Materials
- [8] Dahotre, B.N., Nayak, S. and Popoola, O.O., *The Laser Assisted Iron Oxide Coating of Cast Al Auto Engines*, JOM, Sept. 2001
- [9] Dasari, A., Nayak, S., Misra R., Popoola, O.O. and Dahotre B.N., *Surface characteristics and wear performance of laser surface engineered iron oxide coatings on cast aluminium alloy*, Materials Science and Technology, 18, Sept. 2002, 1036-1040