

BETTER RELIABILITY, ENERGY CONSERVATION AND THE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS THANKS TO INNOVATIVE SURFACE COATINGS - “ENGINE TECHNOLOGY”: THE PISTON RINGS PROBLEM

Migliorare l'affidabilità, il risparmio energetico ed il rispetto dell'ambiente con rivestimenti superficiali innovativi - “Engine Technology”: il problema delle fasce elastiche

Beatrice Barba
P&P Holding,
Bedizzole (BS), Italy
marketing@p-pholding.com

The difference between a product of medium or of excellent quality often lies in the type of surface coating. Research and innovation departments work day after day to achieve higher and higher standards in many sectors. The engine components are definitely among the most critical applications: pistons, piston rings and cylinders. This field, namely, has been the subject of study by many researchers and scholars with the same goal: achieving high performance while respecting the environment.

The piston rings are one of the most studied components. They were introduced in the second half of 1800 by Ramsbottom and further enhanced by Miller. Located on the piston head, they have two main functions: on the one hand, they must maintain the sealing of the combustion chamber and prevent the “blow-by” phenomenon; on the other hand, they must allow an easy sliding between the cylinder and the piston itself.

Changes in the piston rings shape – width reduction

La differenza tra un prodotto di media o d'eccellente qualità è spesso data dalla tipologia di rivestimento superficiale. Ricerca ed innovazione lavorano giorno dopo giorno per raggiungere *standard* sempre più elevati in molteplici settori. Tra le applicazioni più critiche c'è sicuramente quella dei componenti motore: pistoni, fasce elastiche e cilindri. Questo settore, infatti, è stato l'oggetto di studio di numerose ricerche e pubblicazioni scientifiche con lo stesso obiettivo comune: raggiungere *performance* elevate coniugando alte prestazioni nel pieno rispetto dell'ambiente circostante.

Tra i diversi componenti, le fasce elastiche (*piston rings*) costituiscono al giorno d'oggi uno dei particolari tra i più studiati. Furono introdotte per la prima volta nella seconda metà dell'800 da Ramsbottom e successivamente migliorate da Miller. Posizionate sulla testa del pistone, hanno principalmente due funzioni: da una parte devono mantenere la tenuta della pressione prodotta all'interno della camera di combustione ed evitare il fenomeno del “blow by”; dall'altra devono permettere un facile scorrimento tra il cilindro ed il pistone stesso.

Opening photo:
Piston rings with DLC
coating (courtesy P&P
Equipment Division)

Foto d'apertura:
Fasce elastiche con
rivestimento DLC
(immagine P&P Equipment
Division)

and tangential load reduction – and in the materials used – steel and cast iron with more flexible sections – have allowed some improvements, but what really characterises the performance of these components is their surface coating.

Low coefficient of friction to ensure high energy efficiency, high resistance to wear to ensure a longer useful life of components, fatigue strength under different pressure and temperature conditions and resistance to corrosion are just some of the main requirements for the different types of coatings.

Among the various components, the piston rings play, therefore, a decisive role in the overall performance of the engine.

Modifiche delle geometrie delle fasce elastiche – riduzione della larghezza e riduzione del carico tangenziale – o lo studio dei materiali di base da utilizzare (acciaio e ghisa con sezioni più flessibili) hanno permesso alcuni miglioramenti, ma ciò che davvero caratterizza le performance di tali componenti sono i rivestimenti superficiali.

Basso coefficiente d'attrito per assicurare elevata efficienza energetica, elevata resistenza all'usura per garantire una maggiore vita utile dei componenti, resistenza a fatica in diverse condizioni di pressione e temperatura, resistenza alla corrosione sono solo alcune delle principali caratteristiche ricercate nelle diverse tipologie di rivestimenti.

Tra i diversi componenti, le fasce elastiche giocano, quindi, un ruolo decisivo sulle prestazioni complessive del motore.



Surface Coatings for Piston Rings

The coatings used for the engine components, in particular for the piston rings, are always evolving. Numerous laboratory and field tests have been carried out on the efficiency of different deposits. Summarising the development of the different technologies applied over time, it is possible to identify different families of coatings with increasingly high performance.

Rivestimenti superficiali utilizzati per le fasce elastiche

I rivestimenti utilizzati per i componenti motore, ed in particolare per le fasce elastiche, sono in continua evoluzione. Numerose sono state le prove di laboratorio ed in esercizio che hanno testato l'efficienza dei diversi depositi. Riassumendo l'evoluzione delle diverse tecnologie di rivestimento è possibile distinguere diverse famiglie che si sono succedute negli anni ottenendo un prodotto con prestazioni sempre maggiori.

A first family of coatings used in this sector is that of galvanic coatings, especially with the use of hard chrome. These coatings give a good resistance to wear and to corrosion even in harsh physico-chemical conditions.

However, after the deposition, the rings must undergo subsequent lapping and polishing treatments. Also the environmental impact and the workers safety during the processing – harmful substances, such as hexavalent chromium, are present – are an issue.

New technologies have been subsequently developed to improve the production processes of both piston rings and other mechanical components. Particular attention has been paid to HVOF coatings as an alternative to hard chromium coatings (Picas, Forn, Matthäua, 2005).

The HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) coatings belong to the family of thermal spray coatings. This process uses a powder precursor that is heated and subsequently sprayed on the component. The heat generated by both the heating of the starting material and the collision of the particles with the substrate sublimates the material, which results in a good adhesion of the coating. Among the various thermal spray coating processes, the HVOF technique is able to obtain deposits with low porosity (<1%) and a better adhesion compared to the conventional hard chromium coatings.

The materials used to create this type of coatings are many, also depending on the base material, e.g. Ni-BN, Fe-FeO-C, Cr₂C₃.

New Generations: PVD Coatings

Another family is that of the vacuum thin film coatings. With the PVD (Physical Vapour Deposition) technology, it is possible to produce many different coatings. The most common ones for these applications are the Ti/TiN multilayer and the CrxN coatings. Numerous tests have shown that the CrxN deposits obtained by magnetron sputtering technology have excellent tribological properties, high surface resistance and wear and corrosion resistance.

The PVD technology has allowed to reduce by one-tenth the wear compared to the galvanic chrome deposit. (Friedrich, 1997).

Una prima famiglia di rivestimenti utilizzata in questo settore è rappresentata dai *Rivestimenti galvanici*, in particolare dall'utilizzo di cromo duro. Grazie a questi rivestimenti è possibile conferire una buona resistenza all'usura ed alla corrosione anche in condizioni chimico – fisiche aggressive. Tuttavia a seguito della deposizione, le fasce elastiche devono subire dei trattamenti successivi di lappatura e lucidatura. Da non sottovalutare, poi, l'impatto ambientale e la sicurezza degli operatori in fase di lavorazione dovuto alla presenza di sostanze dannose, quali cromo esavalente.

Successivamente sono state studiate nuove tecnologie per migliorare i processi produttivi sia delle fasce elastiche che di altri componenti meccanici. Particolare attenzione è stata posta ai rivestimenti HVOF come alternativa ai rivestimenti di cromo duro (Picas, Forn, Matthäua, 2005).

I rivestimenti HVOF (*High Velocity Oxy-Fuel*) fanno parte della famiglia costituita dalle tecniche *Thermal Spray*. Questo processo utilizza un precursore in polvere che viene riscaldato e successivamente spruzzato sul componente. Il calore proveniente sia dal riscaldamento del materiale di partenza che dalla collisione delle particelle con il substrato sublima il materiale generando una buona adesione del rivestimento. Tra i diversi processi di rivestimento *Thermal Spray*, la tecnica HVOF riesce ad ottenere depositi con bassa porosità (<1%) ed una maggiore adesione rispetto ai tradizionali rivestimenti di cromo duro.

I materiali utilizzati per creare questa tipologia di rivestimenti sono svariati, anche in funzione del materiale di base, ad esempio Ni-BN, Fe-FeO-C, Cr₂C₃.

Nuove generazioni: i rivestimenti PVD

Un'ulteriore famiglia è costituita dai *Rivestimenti a film sottile Sotto Vuoto*. Attraverso la tecnologia PVD – *Physical Vapour Deposition* – è possibile realizzare una moltitudine di rivestimenti. Tra i più comuni per queste applicazioni risultano essere multi strato di Ti/TiN e rivestimenti CrxN. Numerosi test hanno dimostrato che depositi di CrxN, ottenuti tramite tecnologia *Magnetron Sputtering*, presentano ottime caratteristiche tribologiche, elevata resistenza superficiale, resistenza all'usura e alla corrosione. Grazie alla tecnologia PVD è stato possibile ridurre di un decimo l'usura rispetto al deposito di cromo galvanico. (Friedrich, 1997).

The research conducted on the CrN coatings for piston rings led to three important results:

- **Greater thickness:** it has been shown [6] that, in order to achieve a good wear resistance, a 30 μm thick deposit is necessary (the traditional PVD coatings are typically about 20 μm thick) to avoid damage to the component;
- **Good fatigue strength:** generally, the higher the density values result, the greater the internal stress. To avoid damage, a more porous structure is preferable, so as to improve the breaking strength.
- **Better adhesion:** with 30 μm thick coatings, edges are generally the most critical part of piston rings, because they are subject to the most stress. Adhesion is a key parameter in determining the quality of the coating.

COATING	THICKNESS (μm)	HARDNESS (HV)	MODULUS OF ELASTICITY (Mpa)	INTERNAL STRESS (Compressive - Mpa)	POROSITY %
CrN	30	1240	250	-1100	4
High porous CrN	30	1160	310	-200	8
Multilayer CrN/Cr	28	1350	360	-310	2

The Table above briefly summarises the differences between different types of CrN coatings. The increase in the deposit porosity is the main cause of the decrease in surface hardness and corrosion resistance. On the other hand, however, the different density values of the porous coating with columnar structure correspond to lower internal stresses. The CrN/Cr multilayer structure too has a good internal structure, because it combines the good ductility properties of metal chromium with the characteristics of hardness and fragility of the CrN/Cr₂N ceramic phase.

Gli studi fatti a riguardo dei rivestimenti CrN per fasce elastiche hanno portato a 3 grandi risultati:

- **Spessore più elevato:** è stato dimostrato [6] che per avere una buona resistenza all'usura è necessario creare un deposito di 30 μm (i classici rivestimenti PVD hanno spessori generalmente intorno ai 20 μm) per evitare danni al componente;
- Buona **resistenza a fatica:** maggiori valori di densità generalmente presentano molti stress interni. Per evitare danneggiamenti si preferisce creare una struttura morfologica più porosa migliorando così la resistenza a rottura.
- **Migliore adesione:** con rivestimenti di 30 μm gli spigoli sono generalmente la parte più critica delle fasce elastiche, dove si concentrano maggiori stress. L'adesione è un parametro fondamentale per determinare la qualità del rivestimento.

La Tabella soprastante riassume brevemente le differenze tra diverse tipologie di rivestimento CrN. L'aumento della porosità del deposito è la principale causa della riduzione della durezza superficiale e resistenza alla corrosione. D'altra parte, però, i diversi valori di densità del rivestimento poroso con struttura colonnare presentano minori stress interni. Anche la struttura multi strato CrN/Cr ha una buona struttura interna grazie al fatto che combina le buone proprietà di duttilità del cromo metallico con le caratteristiche di durezza e fragilità della fase ceramica CrN/Cr₂N).



PRODOTTI DI MASCHERATURA
per ogni trattamento superficiale:
prodotti standard e speciali



GANCI - BILANCELLE - TELAI



LA MIGLIORE TECNOLOGIA PER IL TUO RIVESTIMENTO



PULISCI CATENA
per convogliatori,
estensioni
per pulizie ganci
e bilancelle

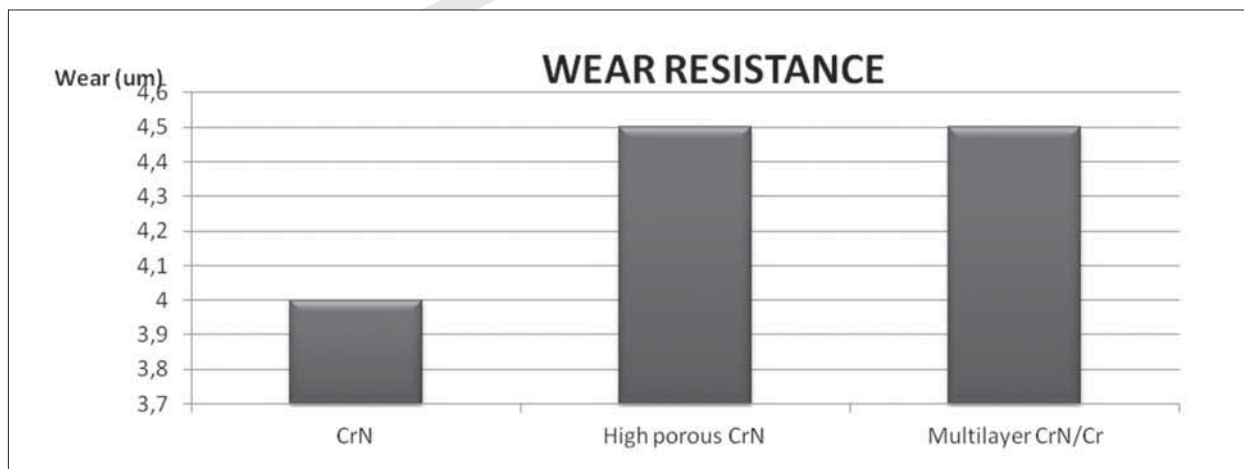
SPEEDY CLEANER

SPESIMETRI



TECNO SUPPLY
divisione di IBIX srl

Via La Viola, 4 48022 S.Maria in
Fabriago (RA)
Tel. +39 0545 994589
Fax. +39 0545 94567
www.tecnosupply.com
info@tecnosupply.com



The factor that ensures good wear resistance is not necessarily the surface hardness, but often a combination of hardness and elastic modulus.

The Figure above shows the wear behaviour of the different PVD coatings analysed.

In the last few years, however, new avenues have been opened for another type of vacuum thin film coatings, the DLC (Diamond Like Carbon) coatings.

These deposits are characterised by the presence of carbon bonds in the sp^3 and sp^2 hybridisation states. The amount of these bonds determines the mechanical and tribological properties of the coating.

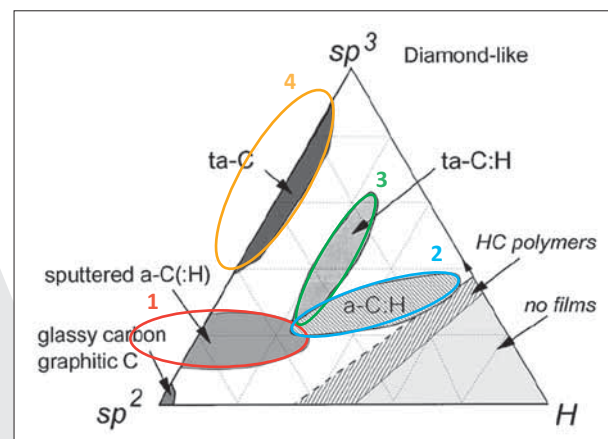
Il fattore che determina una buona resistenza all'usura non è necessariamente la durezza superficiale, ma spesso una combinazione tra durezza e modulo elastico.

La Figura soprastante rappresenta il comportamento ad usura dei diversi rivestimenti PVD analizzati.

Negli ultimi anni, tuttavia, sono state aperte nuove strade per un'altra tipologia di rivestimenti a film sottile sotto vuoto, ovvero i rivestimenti DLC (Diamond Like Carbon). Questi depositi sono caratterizzati dalla presenza di legami carbonio nella stato di ibridizzazione sp^3 e sp^2 . La quantità di questi legami determina le proprietà meccaniche e tribologiche del rivestimento.

4 different coating macrofamilies, as shown in Figure:
 1-2) a-C:H: coatings with few sp^3 bonds and H atoms;
 3) ta-C:H: more sp^3 bonds and lower % hydrogen
 4) ta-C: % hydrogen absent

4 diverse macro famiglie di coating, come si vede nella Figura:
 1-2) a-C:H: rivestimenti con basso contenuto di legami sp^3 e atomi H;
 3) ta-C:H: aumentano i legami sp^3 e si riduce la % di idrogeno
 4) ta-C: % di idrogeno assente



The Figure above shows all the different types of DLC coatings (J. Robertson, 2002), which can be obtained with different technologies (for example, cathodic arc PVD or magnetron sputtering or PECVD technology). This family of coatings has excellent technical characteristics, such as surface hardness, low coefficients of friction and chemical inertness. For this reason, in the last 30 years they have been studied in many applications.

La Figura soprastante rappresenta lo schema generale di tutte le diverse tipologie di rivestimenti DLC (J. Robertson, 2002), ottenibili con diverse tecnologie (ad esempio tecnologia PVD ad Arco Catodico o Magnetron Sputtering, oppure tecnologia PECVD).

Questa famiglia di rivestimenti gode di ottime caratteristiche tecniche, quali durezza superficiale, bassi coefficienti d'attrito, inerzia chimica. Per tale motivo negli ultimi 30 anni sono stati oggetto di studio in molteplici applicazioni.

The trend in the automotive sector is to achieve always higher performance, improve the reliability of the different components, reduce the use of lubricating oils and obtain completely environmentally friendly products. That is why, nowadays, nearly 30 million of automotive components use this type of coating, with a constant 50% annual increase.

Different types of DLC have been tested.

The Me-C:H ones are the most common in this field; in this case, the DLC coating is "doped" with a metal in order to reduce its internal stresses and improve its performance. Depending on the metal used, different characteristics can be obtained:

for example, silicon has excellent heat resistance.

One of the most used metals is certainly tungsten: with its excellent adhesion to steel, chemical inertness, low friction coefficient and high wear resistance, the coating obtained has excellent potential for the automotive industry (Gahlin, 2001).

La tendenza del settore automotive è quella di raggiungere sempre più alte *performance*, aumentare l'affidabilità dei diversi componenti, ridurre l'utilizzo di oli lubrificanti ed ottenere prodotti completamente eco-compatibili. Ecco perché attualmente quasi 30 milioni di componenti del settore automotive utilizzano questa tipologia di rivestimento con un incremento annuo costante del 50%.

Sono state testate diverse tipologie di DLC. Me-C:H è sicuramente il più comune in questo settore, dove il rivestimento DLC viene "drogato" con un metallo al fine di ridurre le tensioni interne del rivestimento ed aumentarne le prestazioni in esercizio. A seconda del metallo utilizzato, si ottengono diverse caratteristiche: il silicio ad esempio presenta un'ottima resistenza al calore. Tra i metalli di maggior successo è sicuramente il tungsteno, con ottima adesione su acciaio, inerzia chimica, basso coefficiente d'attrito ed elevata resistenza all'usura rappresenta una tipologia di rivestimento dalle ottime potenzialità per il settore *automotive* (Gahlin, 2001).



LEADING IN PRODUCTION EFFICIENCY

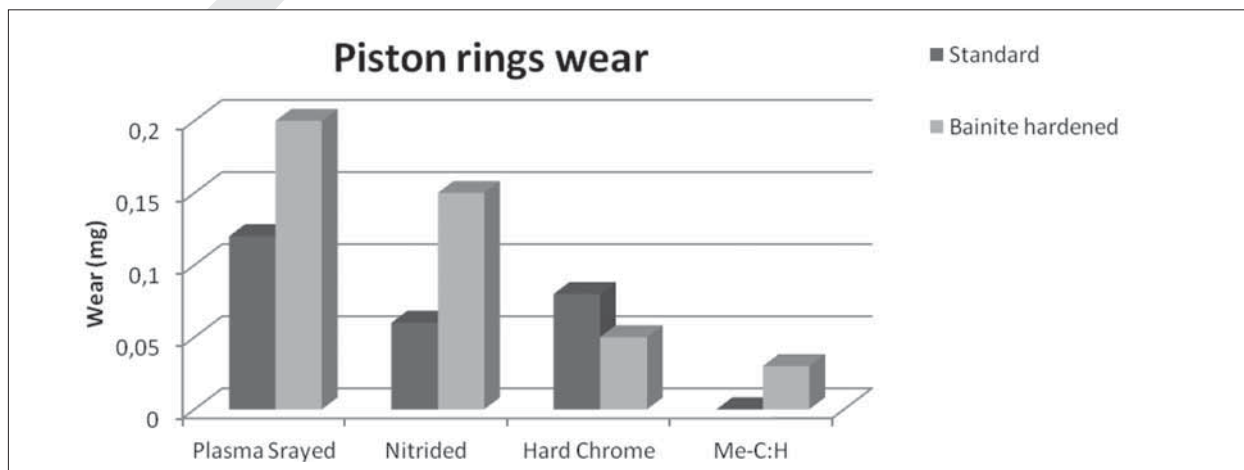
ECO ⊕ EFFICIENCY

Dürr shows responsibility for the efficient and sparing use of resources with **ECO ⊕ EFFICIENCY**. Representing the highest quality, our technologies sustainably reduce your process, material and unit costs.



A few tests on the Me-C:H DLC coatings have shown excellent resistance to wear, higher compared to other coatings (see Figure below).

Alcuni test su rivestimenti DLC Me-C:H hanno dimostrato un'ottima resistenza all'usura maggiore a confronto di altri rivestimenti (figura sottostante).



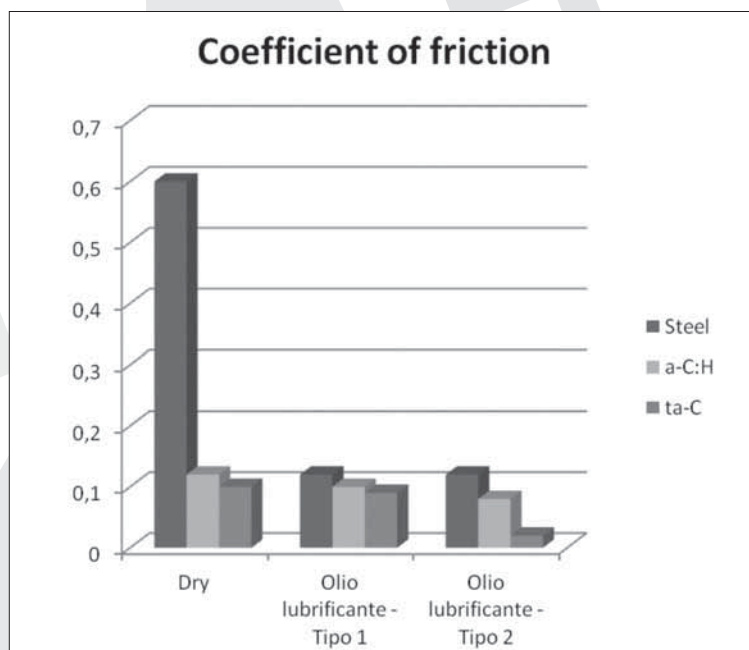
The production process of the Me-C:H coatings, moreover, ensures excellent reproducibility. A further development, now under study, will be a multilayer coating giving excellent tribological characteristics and perfect adhesion before the Me-C:H top coat.

Furthermore, better performance has been achieved with a different family of DLC ta-C coatings, generally obtained by filtered arc technology. The absence of hydrogen atoms in the deposit gives excellent friction coefficients, which allow a reduction of the fuel consumption and of the emissions in the latest generation engines.

Il processo di produzione dei rivestimenti Me-C:H, inoltre, permette un'ottima riproducibilità.

Un'ulteriore evoluzione, in corso di studio, è quella di un possibile multi strato creando ottime caratteristiche tribologiche ed una perfetta adesione prima del rivestimento Me-C:H a finire.

Non solo, migliori prestazioni sono state studiate con una diversa famiglia di rivestimenti DLC ta-C, generalmente realizzati tramite tecnologia ad arco filtrato. L'assenza di atomi idrogeno nel deposito conferiscono ottimi coefficienti d'attrito che consentono riduzione dei consumi e delle emissioni nei motori di ultima generazione.



The Figure above shows the different coefficients of friction of uncoated steel and of the two main families of DLC coatings (ta-C:H and a-C:H), both without lubricant and with two types of lubricating oil commonly used in the automotive sector.

Market trends and future developments

Thus far, the most advanced coatings, for example the DLC deposits, have only been used in very small market niches due to the long cycle times to achieve the deposit and, consequently, the too high production costs.

The market trend is twofold: on the one hand, there is the attempt to use systems with larger deposition chambers in order to optimise the space in each production cycle; on the other hand, the aim is to reduce the cycle times for the production of the coatings.

In this perspective, the R&D laboratories of P&P, a cutting-edge company based in Brescia, are optimising innovative production processes able to greatly reduce the production times and, consequently, to ensure more competitive prices.

The tendency towards innovation will soon lead to use the advanced technologies even for the lower-medium range products, thus making them part of our everyday life. ■

BIBLIOGRAPHY

1. *Piston ring tribology*, Peter Andersson, Jaana Tamminen & Carl-Erik Sandström, 2002
2. *HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves*; J.A. Picas a, A. Forna, G. Matthaus, 2005
3. *PVD CrxN coatings for tribological application on piston rings*, C Friedrich, G Berg, E Broszeit, 1999
4. *Diamond-like amorphous carbon*, J. Robertson, 2002
5. *ME-C:H coatings in motor vehicles*, Rickard Gahlin & Co., 2001
6. *Engineered PVD Coatings for Piston Rings Application*, Araujo and Marques, 2010

La Figura soprastante mostra la differenza del coefficiente d'attrito tra acciaio non rivestito e le due famiglie principali di rivestimenti DLC (ta-C:H e a-C:H) sia in assenza di lubrificante che con due tipologie di olio lubrificante frequentemente utilizzate nel settore automotive.

Trend del mercato e sviluppi futuri

Fino ad ora i rivestimenti più all'avanguardia, ad esempio la famiglia dei depositi DLC, hanno interessato nicchie molto piccole di mercato a causa dei lunghi tempi ciclo per realizzare il deposito e, conseguentemente costi di produzione troppo elevati.

Il trend del mercato si può dividere su due fronti: da una parte si cerca di utilizzare sistemi con camere di deposizione più grandi in modo tale da poter ottimizzare gli spazi in ciascun ciclo produttivo, dall'altra ridurre i tempi cicli per la realizzazione dei rivestimenti.

In questo senso P&P, azienda innovatrice bresciana, all'interno dei suoi laboratori di ricerca e sviluppo sta ottimizzando innovativi processi produttivi in grado di ridurre notevolmente i tempi di produzione e, conseguentemente, ottenere prezzi più competitivi.

La tendenza all'innovazione porterà ben presto ad utilizzare tecnologia avanzata anche per prodotti di fascia medio – bassa, entrando a far parte definitivamente della vita quotidiana di ognuno di noi. ■

REFERENZE

1. *Piston ring tribology*, Peter Andersson, Jaana Tamminen & Carl-Erik Sandström, 2002
2. *HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves*; J.A. Picas a, A. Forna, G. Matthaus, 2005
3. *PVD CrxN coatings for tribological application on piston rings*, C Friedrich, G Berg, E Broszeit, 1999
4. *Diamond-like amorphous carbon*, J. Robertson, 2002
5. *ME-C:H coatings in motor vehicles*, Rickard Gahlin & Co., 2001
6. *Engineered PVD Coatings for Piston Rings Application*, Araujo and Marques, 2010