

# Il ruolo dei rivestimenti nanostrutturati nel settore auto e l'introduzione di materiali innovativi per componenti power-train

A. M. Merlo

La recente introduzione della normativa EURO III, che stabilisce i limiti d'emissioni inquinanti ammissibili, e in prospettiva la futura entrata in vigore delle normative EURO IV ed EURO V, costituiscono un vincolo legislativo per le prestazioni dei veicoli in termini di consumi ed emissioni allo scarico. Il rispetto di tali limiti sarà garantito, nei prossimi anni, dall'ulteriore evoluzione dei sistemi di post-trattamento e dall'introduzione di una molteplicità d'innovazioni tecnologiche fra cui le più rilevanti sono i sistemi d'iniezione multi-point del carburante, il controllo elettronico delle valvole e l'impiego di carburanti alternativi, soprattutto gas naturale. Tuttavia, per quanto riguarda l'emissione di CO<sub>2</sub>, estremamente importante per le note conseguenze sul cambiamento del clima, la sola strada percorribile è la riduzione dei consumi di carburante. In questo senso ampi margini di risparmio energetico possono essere conseguiti grazie all'introduzione di materiali alleggeriti nella fabbricazione di componenti motore, soprattutto per la realizzazione delle masse inerziali alternanti, necessaria anche per un adeguato funzionamento dei sistemi di distribuzione a comando elettro-idraulico o elettromeccanico. Fra i materiali candidabili per alleggerire significativi componenti motore sono fondamentali le leghe metalliche non ferrose, per le quali s'impone un serio problema di scarsa resistenza all'usura, che ne ha in passato notevolmente limitato l'impiego. Una potenziale soluzione è l'introduzione di rivestimenti anti-usura, che possono essere depositati con strutture nano-metriche mediante tecnologie di deposizione PVD, e che grazie alle loro rimarchevoli proprietà anti-attrito permetteranno anche un notevole recupero d'efficienza, limitando le dissipazioni di potenza dovute agli attriti meccanici.

Parole chiave: nanomateriali, rivestimenti, ecologia

## INTRODUZIONE

Negli ultimi anni il contributo del trasporto su strada alla mobilità in Europa è cresciuto a tal punto da rappresentare oltre l'80% del mercato nel comparto passeggeri e quasi il 45% del trasporto merci, con un incremento rispettivamente di oltre il 40% e quasi il 60%, nel periodo '85-'99 (figura 1). [1] Nell'anno 2000 il parco circolante di autovetture nell'Unione Europea si aggirava intorno ai 180 milioni di unità, mentre i veicoli commerciali erano 25 milioni e oltre 500.000 gli autobus (figura 2) [2].

Secondo il libro bianco pubblicato dalla Commissione Europea "European Transport Policy for 2010: time to decide", entro il 2010 la richiesta di mobilità nell'Unione Europea crescerà del 24% nel comparto passeggeri e del 38% nel trasporto merci [3].

Il consumo d'energia nell'ambito dell'industria dei trasporti rappresenta circa il 30% dei consumi energetici totali dell'Unione Europea, con la conseguenza che il contributo dei trasporti all'emissione di gas inquinanti in atmosfera, originata da attività umane, è pari ai valori riportati in tavola 1 [4].

Si stima che in assenza d'azioni correttive le emissioni di CO<sub>2</sub> riconducibili ai trasporti supereranno 1.1 miliardi di

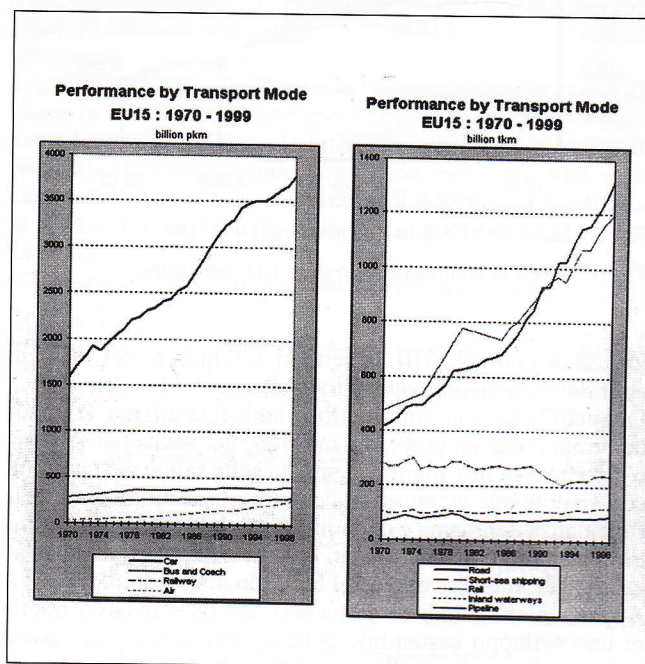


Fig. 1 - Crescita della domanda di mobilità nell'Unione Europea nel periodo 1970-1998.

Fig. 1 - Growth of the passenger and freight transport by transport mode over the period 1970/1998.

A. M. Merlo - Centro Ricerche Fiat

Memoria presentata al simposio AIM - FAST  
"Nanotecnologie e nuove prospettive applicative per i materiali metallici",  
Milano 10 giugno 2002

MEMORIE

1/2003

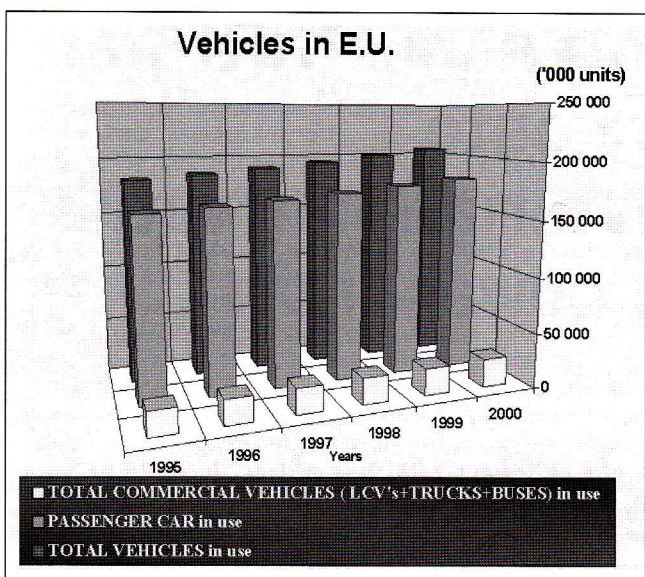


Fig. 2 - Crescita del parco circolante nell'Unione Europea sul periodo 1995/2000.

Fig. 2 - Growth trends of the number of vehicles circulating in the EU over the period 1995/2000 according to ACEA.

CO <sub>2</sub>	CO	NMOVC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
24%	72%	46%	53%	3%

Tabola 1 - Contributo dell'industria dei trasporti all'inquinamento atmosferico originato da attività umane.

Table 1 - Contribution of the transport industry to atmospheric pollution.

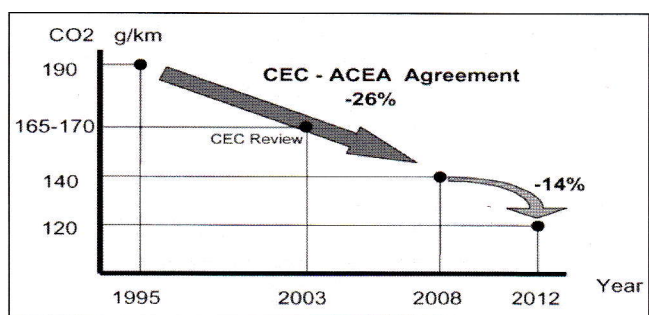


Fig. 3 - Impegno ACEA su riduzione emissioni CO<sub>2</sub>.

Fig. 3 - ACEA commitments to reduce CO<sub>2</sub> emissions.

tonnellate entro il 2010, rispetto ai 739 milioni del 1990, di cui l'84% saranno dovute al trasporto su strada.

La qualità dell'aria, soprattutto in ambiente urbano, si impone ormai come un problema indifferibile, anche per le gravi conseguenze che l'inquinamento ha sulla salute dei cittadini, con un notevole incremento, nel corso degli ultimi anni, dell'incidenza dell'asma e delle infezioni dell'apparato respiratorio a causa di gas inquinanti quali l'ozono e gli ossidi d'azoto e dell'angina a causa del biossido di carbonio.

Appare chiaro quindi come sia necessario da un lato garantire uno sviluppo sostenibile della motorizzazione nei paesi emergenti, mentre nelle aree ad economia matura quali Unione Europea, NAFTA e Giappone, l'industria auto-veicolistica dovrà ottemperare a normative ambientali sempre più severe. All'inizio dell'anno 2000 è entrata in vigore la Direttiva 70/220, emendata dal parlamento europeo nel 1998, che pone severi limiti alle emissioni inquinanti am-

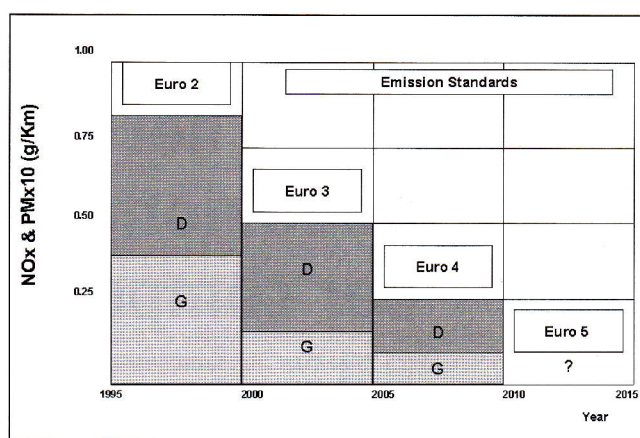


Fig. 4 - Limiti di emissioni di NO<sub>x</sub> e particolato.

Fig. 4 - NO<sub>x</sub> and Carbon Soot emission limits.

messe per chilometro di percorrenza.

La progettazione, la produzione e l'impiego in esercizio degli autoveicoli nei prossimi anni dovranno necessariamente confrontarsi con le esigenze di mercato, ambientali e normative imposte dallo scenario delineato, imponendo ai costruttori europei un significativo miglioramento della qualità di prodotto, soprattutto in termini d'affidabilità, vita utile ed economia di gestione, perseguibili soltanto tramite una politica di costante innovazione tecnologica.

Negli ultimi 10 anni i costruttori europei hanno compiuto un significativo sforzo al fine di ridurre le emissioni inquinanti e si sono impegnati a fare altrettanto anche nel prossimo futuro (fig. 3), allo scopo di adeguarsi e possibilmente anticipare le esigenze dei cittadini europei e i vincoli imposti dalla legislazione europea di prossima introduzione (fig. 4).

### TENDENZE EVOLUTIVE

Negli ultimi anni la ricerca tecnologica in campo motoristico si è concentrata particolarmente nello sviluppo dei sistemi di post-trattamento dei gas combusti e nell'introduzione di sistemi innovativi d'iniezione del carburante, ed è facilmente prevedibile che questa tendenza sarà destinata a continuare anche per il futuro, mentre sempre maggiore importanza acquisiranno il comando elettronico delle valvole e l'impiego di carburanti alternativi, soprattutto gas naturale con sistema d'iniezione multi-point a controllo elettronico. Tuttavia, per quanto riguarda l'emissione di CO<sub>2</sub> la sola strada percorribile è la riduzione dei consumi di carburante. A questo fine il contributo dell'introduzione di materiali a basso peso specifico e di rivestimenti a basso attrito nella realizzazione dei componenti motore può svolgere un ruolo fondamentale.

Infatti, in generale, più del 60% dell'energia consumata da un motore a combustione interna viene dissipata sotto forma di calore, sia attraverso le superfici calde sia tramite l'emissione dei gas combusti ad alta temperatura. Tuttavia, pur tendendo a ridursi con l'evoluzione dei motori negli anni più recenti, la potenza dissipata a causa degli attriti tra le parti meccaniche in movimento di un motore termico si aggira mediamente intorno al 13 % del totale [5], potendo comunque variare sensibilmente da motore a motore e in funzione del regime e condizioni di carico.

### RIDUZIONE DEGLI ATTRITI

Le perdite di potenza per attrito si concentrano soprattutto nel sistema canna-cilindro/pistone e canna-cilindro/fasce elastiche, ma anche i cuscinetti di banco e di biella e il siste-

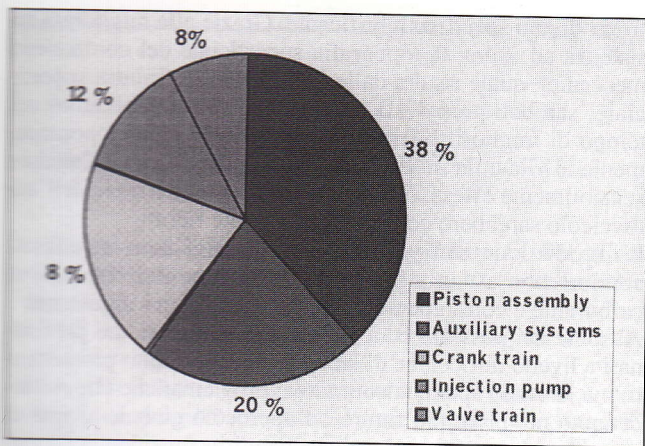


Fig. 5 - Ripartizione delle dissipazioni causate dall'attrito nei diversi sottosistemi di un motore termico.

Fig. 5 - Friction losses distribution in an IC engine.

ma distribuzione, soprattutto a bassi regimi del motore, contribuiscono significativamente (fig. 5) [6].

Una riduzione degli attriti del 10% all'interno del motore consentirebbe un risparmio di carburante di circa il 2%, al 50% di coppia.

Il sistema pistone-fasce elastiche/canna cilindro è stato oggetto in passato di un intenso sforzo di ricerca, volto sia alla riduzione delle masse sia alla riduzione delle perdite di potenza per attrito. La ghisa è stata per molti anni il materiale tradizionalmente impiegato nella realizzazione di basamenti motore, tuttavia in anni più recenti sono state introdotte parecchie leghe di alluminio.

Per resistere ai carichi ed alle temperature d'esercizio elevate le canne dei basamenti in lega d'alluminio vengono protette mediante il piantaggio o la co-fusione di riporti in ghisa.

Di conseguenza la complessiva riduzione di massa del basamento non ha mai potuto superare il 30%, mentre il contatto fra le canne in ghisa e i pistoni, già da parecchi anni realizzati in lega d'alluminio, pone problemi d'usura e grippaggio di questi ultimi in condizioni di lubrificazione non ottimale, risolti in passato mediante cromatura o applicazione di rivestimenti plasma-spray. Tuttavia il previsto incremento di potenza specifica erogata dai motori di futura generazione condurrà inevitabilmente ad un peggioramento delle condizioni d'esercizio, rendendo necessario lo sviluppo e l'industrializzazione di processi efficienti per la deposizione di rivestimenti innovativi con eccellenti proprietà tribologiche, in vista anche di una definitiva sostituzione delle canne in ghisa. Le perdite di potenza dovute all'attrito nel sistema di distribuzione del motore raggiungono il 15% del totale ai bassi regimi (1500 giri/min), scendendo al solo 3% ad alto regime (5000 giri/min) [5]; tuttavia nel caso di distribuzione a comando diretto il moto all'interfaccia camma/bicchierino è prevalentemente un moto di strisciamento e la perdita d'efficienza motore per attrito può aumentare fino al 25% ai bassi regimi (2000 giri/min), dove prevale un regime di lubrificazione mista.

Le coppie di componenti della distribuzione in contatto tribologico più rilevanti sono fondamentalmente:

- camme/punterie
- valvole/sedi-valvola
- valvole/guide-valvola
- albero a camme/cuscinetti

Il contatto di gran lunga il più importante è quello all'interfaccia camma/punteria dove prevalgono moti di scorrimento in regime di lubrificazione mista e di lubrificazione limite, per i quali il comportamento chimico dello strato molecolare di lubrificante adeso alla superficie del componente prevale sulla reologia stessa del lubrificante. In questo caso gli addi-

tivi extreme pressure possono assumere un ruolo più significativo della viscosità stessa dell'olio. Il film lubrificante è talmente sottile (1µm) che le asperità delle superfici possono venire a contatto diretto, con conseguente danneggiamento dei componenti per scuffing, pitting o usura adesiva, particolarmente in corrispondenza delle zone più sollecitate, p. es. il naso delle camme. Simili problemi si sono ulteriormente aggravati a causa della tendenza a ridurre la dimensione dei motori e ad aumentare di conseguenza la velocità di rotazione dell'albero motore.

La deposizione di un rivestimento tribologico antiusura e a basso attrito a protezione della camma o della punteria consentirebbe di ridurre significativamente il danneggiamento delle superfici, con un corrispondente allungamento della vita utile del motore, mentre renderebbe possibile ridurre l'attrito tra camma e punteria fino al 30%, con un risparmio nel consumo di carburante valutabile intorno all'1%.

### RIDUZIONE DELLE MASSE INERZIALI ALTERNE

I pistoni dei motori a combustione interna sono già presentemente realizzati in lega d'alluminio allo scopo di limitarne la massa inerziale.

Le valvole motore invece sono prodotte in acciaio forgiato. Le valvole d'aspirazione sono relativamente poco sollecitate termicamente; le valvole di scarico, al contrario, sono soggette a stress termici elevati e all'atmosfera corrosiva rappresentata dai gas di scarico e richiedono quindi acciai di qualità superiore. Tuttavia l'impiego di una lega di massa specifica inferiore sarebbe attraente per la possibilità di ridurre l'inerzia.

Oltre ad essere un vantaggio in se stessa la riduzione delle inerzie comporterebbe anche una riduzione della sollecitazione impulsiva della valvola sulla sede valvola in fase di chiusura, limitando attriti ed usure, soprattutto a danno della sede, che sono particolarmente severe p. es. nei motori a gas naturale di recente introduzione sul mercato. Inoltre la massa relativamente elevata delle valvole in produzione rende problematica l'introduzione di sistemi di comando distribuzione elettro-idraulici ed elettro-meccanici, che offrono prestazioni ottimali soprattutto in accoppiamento con valvole alleggerite.

L'impiego di valvole alleggerite permetterebbe anche di ridurre la forza di richiamo esercitata dalla molla, che a sua volta ha una considerevole influenza sulla forza d'attrito all'interfaccia camma/punteria; una riduzione del 30% nella massa della valvola permetterebbe di ridurre l'attrito di quasi il 40%. La massa della molla stessa potrebbe essere ridotta dal 20% al 50%.

L'impiego di una lega d'alluminio consentirebbe di ridurre

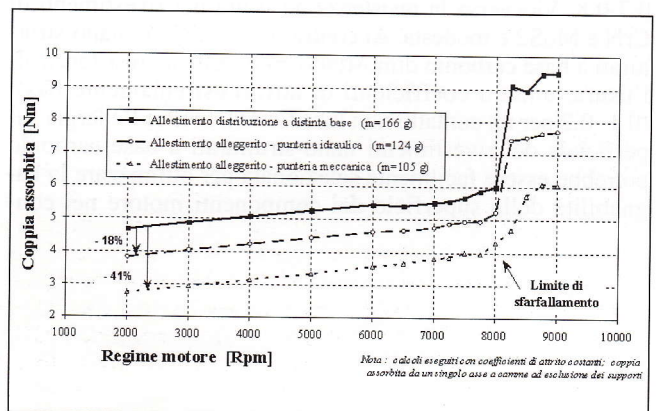


Fig. 6A - Coppia media assorbita Asse a camme Aspirazione.

Fig. 6A - Mean friction torque - intake camshaft.

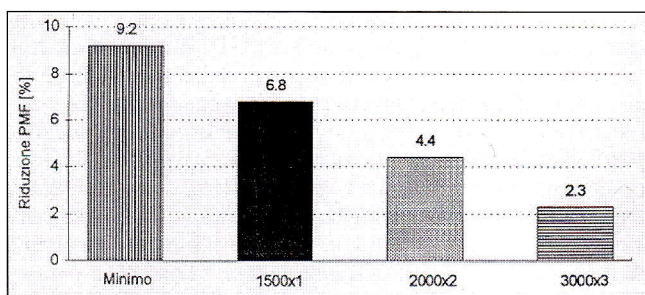


Fig. 6B - Riduzione degli attriti (PMF) rilevati al banco (confronto tra allestimento a distinta base e con punterie meccaniche).

Fig. 6B - Friction reduction vs. engine speed.

la massa del bicchierino di circa il 50%, rispetto al componente in acciaio.

In figura 6A e 6B sono presentati i risultati di sperimentazioni al banco motore eseguite su motori con componenti distribuzione alleggeriti.

### CONCLUSIONI

In definitiva leghe leggere a base alluminio o leghe intermetalliche, grazie alla loro ridotta massa specifica, alle loro soddisfacenti proprietà meccaniche e buona conducibilità termica, sarebbero ottimi candidati per la realizzazione di basamenti motore e di componenti della distribuzione motore innovativi; purtroppo però, oltre i costi elevati, le loro modeste proprietà tribologiche ne hanno sino ad ora fortemente limitato l'introduzione su vetture di grande serie, per le quali la loro affidabilità nel tempo è ancora insufficiente. Altre soluzioni tecnologiche proposte per l'alleggerimento delle valvole, quali l'impiego di valvole cave o l'introduzione di materiali ceramici, che presenterebbero anche il vantaggio di un ottimo comportamento tribologico, sembrano per il momento rese problematiche a causa dei costi elevati o di un'affidabilità strutturale non sufficientemente provata. L'applicazione di rivestimenti tribologici adeguati che modifichino opportunamente le proprietà superficiali di componenti in lega leggera sembra essere quindi una tecnologia abilitante per l'introduzione su grande scala di componenti motore alleggeriti.

I rivestimenti tribologici più comunemente usati attualmente sono TiN, CrN e MoS<sub>2</sub>. Tuttavia il coefficiente di attrito dei rivestimenti di TiN tende ad aumentare con la durata in esercizio ad alti carichi a causa dell'elevato tasso di abrasione della superficie contrapposta e della conseguente formazione di uno strato di trasferimento, fino a raggiungere valori pari a 0.7-0.8. Viceversa la resistenza ad usura dei rivestimenti di CrN e MoS<sub>2</sub> è modesta. Al contrario rivestimenti nano-strutturati a base carbonio dimostrano un'eccellente resistenza all'usura, unita a coefficienti di attrito estremamente bassi (0.1-0.2 per un contatto non lubrificato). Inoltre l'energia superficiale dei rivestimenti nano-strutturati a base carbonio potrebbe essere facilmente selezionata per ottimizzare la bagnabilità della superficie dei componenti motore nei con-

fronti di uno specifico lubrificante. Grazie alla migliorata resistenza ad usura, la topografia superficiale dei componenti meccanici, quale risulta dalle lavorazioni di finitura superficiale, sarebbe preservata, garantendo il mantenimento nel tempo di migliori tolleranze dimensionali. Contemporaneamente la vita utile in servizio dei componenti ne risulterebbe sensibilmente estesa, mentre i costi di manutenzione dell'autoveicolo sarebbero corrispondentemente ridotti.

L'introduzione di rivestimenti innovativi nano-strutturati condurrebbe a una significativa riduzione dei consumi di carburante e conseguentemente delle emissioni inquinanti.

A fronte dei possibili benefici menzionati, i risultati preliminari a livello di ricerche di laboratorio sono molto promettenti, ma lasciano aperte ancora molte problematiche che richiederanno nel prossimo futuro un approccio globale al fine di progettare le proprietà dei rivestimenti in funzione delle esigenze delle specifiche applicazioni, di verificarne il margine di miglioramento in termini di prestazioni in presenza di lubrificazione, ma soprattutto di ingegnerizzarne i relativi processi di deposizione su scala industriale di grande serie, soprattutto in ottica di una drastica riduzione dei costi, che altrimenti rischia di restare un impedimento alla loro introduzione nel ciclo produttivo. Del resto, anche una sensibile riduzione dei costi ancora elevati delle leghe leggere sarà necessaria per renderne economicamente competitiva l'introduzione in ambienti industriali, che non siano esclusivamente di nicchia.

### RINGRAZIAMENTI

L'autore ringrazia l'ing. Boretto e l'ing. Losano del Centro Ricerche FIAT per le preziose informazioni e per la disponibile collaborazione offerta durante la redazione di questo articolo.

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Sito web della Commissione Europea – DG Energy and Transport
- [2] Sito Web ACEA
- [3] European Commission White Book: "European Transport Policy for 2010: time to decide"
- [4] Facing the Future Challenges of Mobility and Competitiveness of Europe  
Programme Competitive and Sustainable Growth - External Advisory Group KA3 Land Transport and Marine Technologies, February 2001.
- [5] C.M. Taylor: "Automobile engine tribology – design considerations for efficiency and durability", *Wear* 221 (1998) p. 1-8  
M. Priest, C.M. Taylor: "Automobile engine tribology – approaching the surface", *Wear* 241 (2000) p. 193-203.
- [6] H. Herrmann and T. Körfer: "Recent and future developments in Diesel engine technology" *ATA Motor Car Engineering* Vol. 53, n. 11/12 Nov-Dec 2000 p. 398-403

A B S T R A C T

**THE ROLE OF NANO-STRUCTURED COATINGS  
IN AUTOMOTIVE INDUSTRY  
AND THE INTRODUCTION OF INNOVATIVE MATERIALS  
FOR POWER-TRAIN COMPONENTS**

*On January 1st 2000 the European regulation EURO III came into force, establishing severe limits to the allowable exhaust pipe emissions from IC engines.*

*In 2005 the European regulation EURO IV will be introduced, entraining even tighter limits.*

*During the last few years the environmental legislation has fostered a noticeable effort in the field of pollutant gas emissions from IC engines and the car manufacturer world wide have developed those gas after treatment techniques, which are now very well established and have allowed for a significant reduction in the atmospheric pollution.*

*To comply with future standards the automotive industry will resort to several different technological strategies, currently under development, such as fuel direct injection, the electro-hydraulic valve timing, advanced after-treatment systems and the introduction of alternative, less polluting fuels, like*

*compressed natural gas (CNG).*

*However, a major environmental concern like the "greenhouse effect" and climate change, which solution is crucial for a sustainable economic growth, cannot be faced by means of the aforementioned technologies, since the emission of water vapour and carbon di-oxide, one of the gases recognised as responsible for the green house effect, is intrinsic to the combustion process itself.*

*Therefore, the only viable approach to an improvement of the green house effect is the reduction of fuel consumptions, which can be achieved both by means of an increase in the power train efficiency and in a reduction of the overall vehicle weight, besides improved aerodynamic and rolling efficiency.*

*Surface engineering in general and nano-structured low friction anti-wear coatings in particular can play an important role in helping to achieve both objectives of enhancing the engine efficiency and of decreasing the vehicle weight. In this paper some considerations will be offered regarding the possible application of nano-technologies to contributing to the outlined goals.*