



Unione Europea



*Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca*



Università degli Studi di Salerno

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica

XII Ciclo N.S. (2011-2013)

***“Advances in lubrication technology and
modelling”***

***Novel nanoscale friction modifiers - Piezoviscosity effect in
EHL contacts***

Ing. Vincenzo Petrone

Tutor:

Ch.mo Prof. Vincenzo D'Agostino

Coordinatore:

Ch.mo Prof. Vincenzo Sergi

ABSTRACT

Lubricant additives have an important influence on the lubrication performances. These additives are active ingredients which can be added during a blending process to base oils in order either to enhance the existing performance of the base fluids or to impart new properties that the base fluids lack. In modern industry, the ever growing demand on the duration and efficiency of machineries stimulates the research for lubricant additives with better performance. At the same time, industry is facing increasingly rigorous environmental regulations. Compared with the traditional organic lubricant additives that contain P, S and Cl elements, novel additives with environmental friendly feature are certainly becoming more desirable in the future, and research for the novel lubricant additives with good tribological properties and low environmental impact becomes important.

Most of lubricant oils at present contain several critical additives, including antiwear additive, dispersant, detergent, friction modifier, viscosity index improver and antioxidant. Traditionally, lubricant oils are presented as a single phase material in order to maintain a good consistency and dispersibility of the additives in the base oil. However, a great amount of research has been focused on introducing solid particles as a friction reduction or antiwear additive over recent years due to a number of incomparable advantages of the two-phase lubricant oils (liquid-solid), such as the superior thermal conductivity, the high pressure standing ability, high resistance to decomposition at temperature, low environmental impact, etc. Some of the solid lubricant additives, particularly in nano or submicron size, have even demonstrated better tribological performances than the traditional organic additives, Zinc dialkyldithiophosphates (ZDDP) for instance.

Due to the diversity of the materials, there are still many controversies about their behaviour in a base lubricant and their lubricating mechanisms although many potential candidates have been tested as the solid lubricant additives and many of them has shown the excellent tribological properties. The major drawback of solid lubricant additives, the intrinsic poor stability in liquid base lubricant systems, has considerably restrained them from applications. Therefore the research on exploring novel solid lubricant additives and the techniques that would improve their dispersibility in base lubricants is certainly required.

Furthermore, many machine elements, lubricated by fluid film have surfaces that do not conform to each other, so small lubricated areas must then carry the load. The lubrication area of a nonconformal conjunction is typically three orders of magnitude less than that of a conformal conjunction. In general, the lubrication area between nonconformal surfaces enlarges considerably with increasing load, but it is still smaller than the lubrication area between conformal surfaces. Accordingly, the lubrication regime, known as elastohydrodynamic lubrication (EHL) is the typical

regime of lubrication characterized by high contact pressures and, therefore, significant elastic deformation and piezoviscous increase in lubricant viscosity. For this reason, a good and accurate prediction of the EHL behaviour, in several different applications, requires consideration of the constitutive equation for the lubricant. Actually, the EHL has two primary aspects: the increase of viscosity with pressure, and the elastic deformation, caused by high pressure, which is comparable to that of the film thickness. Due to the high pressure and the limited contact area, elastic deformation of the surfaces will occur and it is not negligible, as well as the pressure dependence of viscosity play a crucial role in EHL simulation because the viscosity at the inlet has crucial influence on film formation.

In particular, for applications involving lubricants that exhibit shear-thinning behaviour, the use of an appropriate pressure-viscosity relationship for the lubricant is required to predict the EHL behaviour more accurately. Hence, this Ph.D. thesis aims, also, to emphasize the importance of implementing piezoviscous models with accurate treatment methods in EHL applications.

In order to a better modelling of the lubricant rheology Doolittle developed the first free-volume model based on a physical meaning, that the resistance to flow in a liquid depends upon the relative volume of molecules present per unit of free volume. Using an exponential function, Doolittle related viscosity to the fractional free volume.

Summarizing, this research aimed to study:

- Firstly, the influence of different solid lubricant additives (organic additives, such as graphene nanosheets, and inorganic additives, such as inorganic fullerene-like tungsten and molybdenum disulphide nanoparticles) on friction and wear properties of the base lubricants.
- Secondly, by means of numerical simulations:
 - The effects of different pressure–viscosity relationships (including the exponential model, the Roelands model and overall the so called Yasutomi-Doolittle free-volume model) for different operating parameters and surface characterization in EHL lubrication
 - The lubrication mechanism of a perfectly spherical nanoparticle, with size and shape close to those of the inorganic fullerene like nanoparticle (IF-NPs), in order to understand the lubrication mechanism and how this kind of solid additive could affect the tribological performance of mating surfaces.

The above presented research fields have been studied in different ways:

- Exploring the influence of different types of solid lubricant additives on the friction and wear properties of the base lubricants.

- Interpreting the mechanisms of the effects of these solid lubricant additives on tribological performances through tribochemical analysis.
- Using numerical simulations techniques (such as full multigrid numerical code and finite element simulations) to investigate the lubricant piezoviscous property in EHL regime and to understand IF-NPs deformation and lubrication mechanism at nanoscale.

ABSTRACT

Gli additivi per lubrificanti hanno da decenni un'influenza importante sulle prestazioni di coppie lubrificate. Questi additivi sono ingredienti attivi che possono essere aggiunti nel corso di un processo di miscelazione di oli base, al fine sia di migliorare le prestazioni dei fluidi di base sia per impartire nuove proprietà che non appartenevano ai lubrificanti di base. Nell'industria moderna, la sempre crescente importanza posta sulla durata e l'efficienza dei macchinari ha stimolato, quindi, la ricerca di additivi per lubrificanti con prestazioni migliori. Allo stesso tempo, l'industria ha affrontato il problema posto dall'aumentata attenzione alle sempre maggiore sulle problematiche "ecologiche" degli ultimi anni. Rispetto ai tradizionali additivi per lubrificanti organici che contengono elementi P, S e Cl, questi nuovi additivi hanno un impatto molto meno importante sull'ambiente.

La maggior parte degli oli lubrificanti attualmente contengono diversi additivi critici, tra cui additivi antiusura, disperdente, detergente, modificatore di attrito, indice di viscosità miglioratore e antiossidante. Tradizionalmente, gli oli lubrificanti sono presentati come un unico sistema mono fase al fine di mantenere una buona consistenza e disperdibilità degli additivi nell'olio di base. Tuttavia, negli ultimi decenni, la ricerca si è focalizzata sull'introduzione di particelle solide come riduttori dell'attrito o additivi antiusura identificando una miscela bifasica (liquido-solido) con caratteristiche tribologiche superiori, come la conduttività termica superiore, l'alta capacità lubrificante ad elevate pressioni, elevata resistenza alla decomposizione a temperatura, basso impatto ambientale, ecc. Alcuni degli additivi lubrificanti solidi, in particolare su scala nano hanno dimostrato migliori prestazioni tribologiche rispetto ai tradizionali additivi organici, rispetto dialchiliditiofosfato di zinco (ZDDP) per esempio.

A causa della diversità dei materiali, ci sono ancora molte discussioni di carattere scientifico circa il loro comportamento in un lubrificante di base e dei loro meccanismi di lubrificazione, anche nel corso degli anni passati molti potenziali candidati sono stati testati come additivi lubrificanti solidi e molti di loro hanno dimostrato eccellenti proprietà tribologiche. Tuttavia la scarsa stabilità intrinseca degli additivi solidi nei lubrificanti liquidi, li ha notevolmente trattenuto dalle applicazioni industriali su ampia scala. Pertanto, la ricerca su nuovi additivi solidi per lubrificanti e le tecniche che potrebbero migliorare la loro disperdibilità in oli e grassi di base è certamente necessaria e di estremo interesse.

Inoltre, come ben noto gran parte delle coppie cinematiche lubrificate a contatto hanno superfici che non sono conformi tra loro, così il contatto non avviene su un'area estesa ma solo piccole piccole superfici lubrificate devono poi sopportare il carico nella realtà. Di conseguenza, il regime

di lubrificazione, noto come lubrificazione elastoidrodinamica (EHL) è il tipico regime di lubrificazione caratterizzata da alte pressioni di contatto e quindi significative deformazione elastica e soprattutto dall'importanza assunta dalla piezoviscosità che si determina in un aumento della viscosità del lubrificante con la pressione. Per questo motivo, una buona e accurata predizione del comportamento EHL, in diverse applicazioni, richiede la considerazione dell'equazione costitutiva del lubrificante. A causa della elevata pressione e l'area di contatto limitata, la deformazione elastica delle superfici non è trascurabile, così come la dipendenza della viscosità dalla pressione gioca un ruolo cruciale nella simulazione EHL in quanto la viscosità in ingresso ha un'influenza determinante sulla formazione del meato fluido.

Il presente lavoro di tesi mira, proprio, a sottolineare l'importanza dell'utilizzo di modelli piezoviscosi per la simulazione e la predizione dei risultati in termini di pressione e altezza del meato fluido nelle applicazioni EHL.

Per una migliore modellazione della reologia lubrificante Doolittle ha sviluppato il primo modello a "volume libero" volume basata sul concetto fisico che la resistenza al flusso in un liquido dipende dal volume delle molecole presenti per unità di volume libero.

Riassumendo, questa ricerca mira a studiare:

- In primo luogo, l'influenza di diversi additivi lubrificanti solidi (additivi organici, quali nanosheets grafene, e additivi inorganici, quali bisolfuro di molibdeno e tungsteno in formato fullernico) sulle prestazioni tribologiche, in termini di attrito e usura dei lubrificanti di base.
- In secondo luogo, mediante simulazioni numeriche:
 - a) Gli effetti di diverse relazioni pressione-viscosità (compreso il modello esponenziale, il modello Roelands e il sopracitato modello Yasutomi-Doolittle a "volume libero") sui diversi parametri operativi (pressione e meato fluido) e la caratterizzazione superficiale nella lubrificazione EHL.
 - b) Il meccanismo di lubrificazione di una nanoparticella perfettamente sferica, con dimensioni e forma simili a quelle del fullerene inorganico come nanoparticelle (IF-NP), per comprendere il meccanismo di lubrificazione e come questo tipo di additivo solido può influire sulle prestazioni tribologiche di superfici a contatto, mediante la modellazione FEM dell'interazione superficie-particella.

Gli argomenti di ricerca sopra presentati sono stati studiati in diversi modi:

- Esplorando l'influenza di diversi tipi di additivi solid per lubrificanti in termini di prestazioni tribologiche (riduzione di attrito e usura) rispetto ai lubrificanti base.
- Interpretare i meccanismi di funzionamento di questi additivi lubrificanti solidi sulle prestazioni tribologiche attraverso l'analisi tribochimica.

- Utilizzo di tecniche numeriche e simulazioni (metodo multigrid e simulazioni agli elementi finiti) per indagare l'influenza della piezoviscosità del lubrificante in regime EHL e per comprendere IF-NP deformazione e lubrificazione meccanismo a scala nanometrica.