

Abstract

Ever since gears were first used there has been a constant demand for increasing the power density in gear transmissions, to reduce the power losses, to increase the life time and also to decrease their weight. To satisfy these demands new solutions have been developed, such as the use of new materials, the application of surface coatings, improved surface finishing, different hardening treatments, and the use of new lubricants.

There is also a growing environmental awareness that leads to an increasing interest in biodegradable non-toxic oils. Of course, higher lubricant performance in what concerns friction, wear, lifetime, etc. has also major impact in the environmental compatibility, because premature wear, high energy needs and low lifetime are also harmful to the environment.

Any new solution presented must have technical performance advantages for its industrial application, and the technical performance must be proved in dedicated tests.

Nowadays some of the main concerns in gear applications are scuffing failures, micropitting fatigue damage (contact fatigue wear phenomenon observed in combined rolling and sliding contacts operating under elastohydrodynamic lubrication (EHL) or mixed EHL/Boundary lubrication conditions) and power loss or efficiency. These were some of the main concerns during this work for the evaluation of new material, surface coatings and lubricants for gears.

The applicability of multilayer composite surface coatings (providing coefficients of friction close to those obtained with solid lubricants like MoS₂ and graphite) in gear tooth is discussed in this work, mainly in what concerns to gear efficiency at normal operating conditions and to scuffing load capacity. The average friction coefficient between gear tooth is also discussed and compared with a conventional solution (carburized steel gears).

The use of Austempered Ductil Iron (ADI), austempered at 300°C, as a gear material is also discussed, mainly in what concerns fatigue life, both pitting and micropitting, and power loss behaviour.

Two new environmentally friendly lubricants blended for industrial gear applications were investigated in this work. These oils are based on fully or highly saturated esters and are produced from harvestable raw materials. Both oils are biodegradable and have low toxicity and were formulated to replace mineral lubricants in industrial gears, accomplishing CLP specification according to DIN51517.

The overall performance and applicability of the biolubricants was assessed in this work, their tribological performance has been evaluated in combination with the different materials and surface coatings, as well as with the classical carburized steel gears. This will give an overview of the range of tribological systems where ester oils could be used. This research focussed on the scuffing load capacity, micropitting protection and power loss.

The influence of lubricants and material / surface coating combinations on the friction coefficient between gear tooth is discussed and evaluated. A numerical model for the energetic balance of the FZG gearbox has been developed for that purpose, integrating the mechanisms of power loss and heat evacuation. The model also calculates the equilibrium temperature of the gearbox as well as the influence of gearbox com-

ponents in the overall power loss, providing a better understanding of the variation of the churning and friction losses and their influence in the total power loss.

The ADI material has very interesting properties and presents a behaviour similar to steel, although lower contact pressures must be used.

The surface coatings, specially the MoS₂/Ti presented an outstanding increase of scuffing load capacity and also a considerable improvement in the energetic efficiency of gears.

The biodegradable non-toxic lubricants proved to be an advantageous solution for replacing mineral lubricants. They form a better tribological system than the mineral lubricant with all the materials and surface coatings tested.

So, the ester lubricants tested are environmentally compatible not only due to their biodegradability and low-toxicity but also due to the lower power consumption, better load carrying capacity and equal or better micropitting protection.

Sumário

A utilização de engrenagens tem sofrido uma pressão constante desde o início da sua utilização no sentido de aumentar a potência transmitida, de melhorar o seu rendimento, aumentar a sua vida útil e simultaneamente diminuir o seu peso. A satisfação destes requisitos tem ocorrido através de novas soluções, que vão desde novos materiais, à aplicação de revestimentos superficiais, super acabamento superficial, novos tratamentos térmicos e a utilização de novos lubrificantes.

A crescente preocupação ambiental conduz a um interesse crescente em óleos biodegradáveis e de baixa toxicidade, mas o elevado desempenho dos lubrificantes no que diz respeito ao atrito, desgaste, tempo de vida, etc. também tem um elevado impacto na protecção ambiental, uma vez que o desgaste prematuro, o elevado consumo energético e um tempo de vida curto são altamente prejudiciais ao ambiente.

Qualquer nova solução deve apresentar vantagens técnicas para a sua aplicação industrial, e esse incremento de desempenho precisa de ser comprovado em testes específicos.

Algumas das principais preocupações no uso de engrenagens continuam a ser a avaria por gripagem, a fadiga superficial sob a forma de *micropitting* (fenómeno de fadiga superficial que ocorre em condições de lubrificação EHL ou mista EHL / lubrificação limite) e a dissipação de potência ou rendimento energético. Estas foram também algumas das principais preocupações ao longo deste trabalho na avaliação dos novos materiais, revestimentos superficiais e lubrificantes.

A aplicabilidade de revestimentos superficiais compostos multi-camada em engrenagens (com coeficientes de atrito próximos dos obtidos com MoS₂ ou grafite) será discutida neste trabalho, especialmente no que diz respeito à eficiência energética das engrenagens em condições normais de funcionamento e à capacidade de carga à gripagem. O coeficiente de atrito médio no contacto dos dentes da engrenagem será também discutido e comparado com o obtido para a solução convencional (rodas em aço cementadas).

A aplicabilidade do ferro fundido nodular austemperado (ADI) a 300 °C em engrenagens também é discutido neste trabalho, especialmente no que se refere à vida à fadiga (pitting e micropitting) e ao desempenho energético, sendo em ambos os casos comparado com a solução clássica, o aço cementado.

Neste trabalho foi também investigado o comportamento tribológico de duas novas formulações de óleos “amigos do ambiente”. Ambos os óleos são biodegradáveis e de baixa toxicidades, possuindo uma base ester muito ou totalmente saturada, produzida a partir de óleos vegetais provenientes de materias primas cultiváveis. Estes dois óleos foram formulados para aplicações industriais de modo a cumprir a especificação CLP DIN 51517, e também de modo a substituir os óleos minerais nessas aplicações.

A performance global e a aplicabilidade dos bio-lubrificantes em engrenagens foram estudadas neste trabalho. O estudo foi efectuado combinando os óleos com vários materiais, revestimentos superficiais em engrenagens cementadas, permitindo deste modo, uma visão geral sobre os tipos de sistemas tribológicos onde os esters podem ser usados. Os aspectos principais considerados foram a capacidade de carga à gripagem, a protecção contra o micropitting e o desempenho energético.

A influência do conjunto lubrificante/material ou lubrificante/revestimento superficial no coeficiente de atrito entre os dentes das engrenagens foi estudado e avaliado,

sendo para esse efeito desenvolvido um modelo numérico do balanço energético da caixa FZG, modelo esse que integra os mecanismos de dissipação de potência e de evacuação de calor. Este modelo energético também permite estimar a temperatura de estabilização do banho de óleo sendo conhecidas as condições de funcionamento, permite também estimar a influência dos diversos componentes constituintes da caixa na dissipação total de potência, permitindo deste modo uma melhor compreensão da origem da potência dissipada assim como da variação das perdas por chapinagem e das perdas devidas à carga e qual a sua proporção na perda total de potência.

O ADI possui propriedades muito interessantes e apresenta um desempenho semelhante ao obtido com aço cementado, no entanto é necessário usar pressões de contacto inferiores.

Os revestimentos superficiais, em especial o MoS_2/Ti , apresentaram um incremento enorme da capacidade de carga à gripagem e também uma melhoria considerável da eficiência energética das engrenagens.

Os lubrificantes biodegradáveis e não tóxicos mostraram ser uma solução vantajosa na substituição dos lubrificantes minerais. Mostraram formar um melhor sistema tribológico com todos os materiais e revestimentos superficiais testados.

Portanto, os esters testados são “amigos do ambiente” devido à sua biodegradabilidade e toxicologia e são-no também devido a promover menor consumo de energia, maior capacidade de carga à gripagem e igual ou mesmo melhor protecção em relação ao micropitting.