**ABSTRACT**

Engineering plastics are widely used for sliding components including worm wheel in worm reducer used in the automotive electric power steering (EPS). To apply the EPS to much larger vehicles or downsize the worm reducer, the developments of polymer material and design of the worm reducer which can ensure good durability and lower friction are requested.

This study clarified the tribological properties of unreinforced and fiber-reinforced PA66 in contact with steel counterpart under grease lubrication to improve the tribological properties of polymer sliding components. Various sliding tests were conducted in a contact geometry which simulated that of the EPS worm reducer; PA66 or composite ring specimens were in contact with fixed four steel cylinders under mainly grease lubrication. Wear or creep resistances of glass fiber (GF)-reinforced PA66 composite were related to the typical sliding surface damage (peeled off fibers and PA66 scratching) and surface mechanical properties, and GF orientation influenced the wear resistance of the composite and steel. In addition, steel hardness influenced the tribological properties. The influence of temperature on the tribological properties of unreinforced or GF-reinforced PA66 under boundary lubrication with grease was also studied when considering the temperature dependence of the mechanical properties on the sliding surface of PA66 and the tribochemical reaction to zinc carboxylate additives in grease. The friction mechanism of the contact between PA66 or GF-reinforced composite and a steel under PAO8 oil or grease lubrication was discussed by focusing on various parameters including the normal load (contact pressure), sliding speed, temperature, and hardness of the steel counterpart. To explain the friction coefficient obtained under different test conditions, the theoretical minimum oil film thickness under oil lubrication was calculated using the equation of the soft elastic hydrodynamic lubrication regime, considering the contributions of the oil film and lubricated solid/solid contact to the friction coefficient. Subsequently, the differences in the friction behavior between PAO8 oil and grease lubrication were investigated.

The effect of the composite composition on the tribological properties was also investigated to aid in the development of a composite with optimal tribological properties. As important parameters of the compositions of GF composite, the types of GFs (GF surface treatment agent and GF diameter) and PA66 molecular mass were deeply studied. Particularly, as a way to increase the PA66 molecular mass of the fiber composite, reactive extrusion using poly-carbodiimide composite was used, and reactive extrusion mechanism and mechanical properties of glass or aramid fibers-reinforced PA66 with added carbodiimide were clarified. In addition to GF composite, the tribological mechanism of carbon fiber-reinforced PA66 composite was investigated under both dry and grease lubricated conditions. The effects of the PA66 molecular mass, the hardness of the counterpart steel, and the temperature on the tribological properties were studied under grease lubrication and compared to unreinforced and GF-reinforced PA66. In addition, the effect of the water absorption of GF-reinforced PA66 on the tribological properties was investigated.

The analysis of all these experimental results can provide guidelines for the selection of polymer-based material and for the design of optimal parts for the industrial application.

**Keywords**, PA66, glass fibers, carbon fibers, aramid fibers, PAO8 oil, grease, lubrication, wear, creep, friction, soft EHL, carbodiimide, worm wheel, EPS

**RESUME**

Les plastiques techniques sont largement utilisés dans la fabrication de pièces de frottement, dont les engrenages à denture hélicoïdale des réducteurs à vis sans fin utilisés dans les systèmes de direction assistée électrique (EPS) des véhicules automobiles. Pour étendre ce dispositif aux véhicules plus puissants ou pour réduire la taille de ces réducteurs, le développement de matériaux polymères et d’un design de réducteurs garantissant une bonne durabilité et un frottement réduit est nécessaire.

Cette étude a permis de comprendre les propriétés tribologiques du PA66 et de composites à base de PA66 renforcés de fibres en contact avec un contre-corps en acier sous lubrification à la graisse afin d'améliorer les propriétés tribologiques des composants en polymère. Les essais de frottement ont été réalisés avec une géométrie de contact simulant celle du réducteur ; les bagues composites étant en contact avec quatre cylindres fixes en acier avec une lubrification principalement à la graisse. Les résistances à l'usure ou au fluage du composite PA66 renforcé de fibres de verre étaient liées à un endommagement de surface caractéristique (arrachement des fibres et rayures du PA66) ainsi qu’aux propriétés mécaniques de la surface. L'orientation des fibres de verre influençait la résistance à l'usure du composite et de l'acier. De plus, la dureté de l'acier a influencé les propriétés tribologiques. L'influence de la température sur les propriétés tribologiques du PA66 non renforcé ou renforcé de fibres de verre dans le cas d’une lubrification limite avec de la graisse a également été étudiée en considérant les effets de la température sur les propriétés mécaniques de surface du PA66 et sur la réaction tribochimique des additifs de carboxylate de zinc dans la graisse. Le mécanisme de frottement du contact entre le PA66 ou le composite renforcé de fibres de verre et l’acier sous lubrification à l'huile PAO8 ou à la graisse a été examiné en se concentrant sur divers paramètres dont la charge normale (pression de contact), la vitesse de glissement, la température et la dureté du contre-corps en acier. Afin d’expliquer le coefficient de frottement obtenu sous les différentes conditions d'essai, l'épaisseur minimale théorique du film d'huile en lubrification à l'huile a été calculée selon l'équation du régime de lubrification élasto-hydrodynamique souple en considérant les contributions du film d'huile et du contact solide/solide lubrifié sur le coefficient de frottement. Ensuite, les différences de comportements au frottement entre la lubrification à l'huile PAO8 et à la graisse ont été analysées.

L'effet de la composition du composite sur les propriétés tribologiques a également été étudié pour aider au développement d'un composite aux propriétés tribologiques optimales. Identifiés comme des paramètres importants de la composition des composites renforcés de fibres de verre, les types de fibres (traitement de surface et diamètre) et la masse moléculaire du PA66 ont été étudiés en détails. En particulier, l'extrusion réactive du composite avec le poly-carbodiimide a été utilisée comme moyen d'augmenter la masse moléculaire du PA66 dans le composite. Le mécanisme d'extrusion réactive et les propriétés mécaniques du PA66 renforcé de fibres de verre ou d'aramide avec ajout de carbodiimide ont été précisés. En plus du composite avec fibres de verre, le mécanisme tribologique du composite PA66 renforcé de fibres de carbone a également été étudié en frottement sec et en lubrification à la graisse. Les effets de la masse moléculaire du PA66, de la dureté du contre-corps en acier et de la température sur les propriétés tribologiques ont été étudiés avec lubrification à la graisse et comparés au cas du PA66 non renforcé et renforcé de fibres de verre. De plus, l'effet de l'absorption d'eau par le PA66 renforcé de fibres de verre sur les propriétés tribologiques a été étudié.

L’analyse de tous ces résultats expérimentaux peut fournir des lignes directrices pour la sélection de matériaux à base de polymères et pour la conception de pièces optimales pour l'application industrielle.

**Mots-clés**, PA66, fibres de verre, fibres de carbone, fibres d'aramide, huile PAO8, graisse, lubrification, usure, fluage, frottement, EHL souple, carbodiimide, roue à vis sans fin, EPS

Title of PhD thesis

In English

Tribology of PA66 or fiber-reinforced composite / steel contact under grease lubrication

In French

Tribologie du contact PA66 avec ou sans fibres de renfort / acier avec lubrification à la graisse