

## Abstract

The use of polymers subjected to various tribological situations has become state of the art. Owing to the advantages of self-lubrication and superior cleanliness, more and more polymer composites are now being used as sliding elements, which were formerly composed of metallic materials only. The feature that makes polymer composites so promising in industrial applications is the opportunity to tailor their properties with special fillers. The main aim of this study was to strengthen the importance of integrating various functional fillers in the design of wear-resistant polymer composites and to understand the role of fillers in modifying the wear behaviour of the materials. Special emphasis was focused on enhancement of the wear resistance of thermosetting and thermoplastic matrix composites by nano-TiO<sub>2</sub> particles (with a diameter of 300nm).

In order to optimize the content of various fillers, the tribological performance of a series of epoxy-based composites, filled with short carbon fibre (SCF), graphite, PTFE and nano-TiO<sub>2</sub> in different proportions and combinations, was investigated. The patterns of frictional coefficient, wear resistance and contact temperature were examined by a pin-on-disc apparatus in a dry sliding condition under different contact pressures and sliding velocities. The experimental results indicated that the addition of nano-TiO<sub>2</sub> effectively reduced the frictional coefficient, and consequently the contact temperature, of short-fibre reinforced epoxy composites. Based on scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) observations of the worn surfaces, a positive rolling effect of the nanoparticles between the material pairs was proposed, which led to remarkable reduction of the frictional coefficient. In particular, this rolling effect protected the SCF from more severe wear mechanisms, especially in high sliding pressure and speed situations. As a result, the load carrying capacity of materials was significantly improved. In addition, the different contributions of two solid lubricants, PTFE powders and graphite flakes, on the tribological performance of epoxy nanocomposites were compared. It seems that graphite contributes to the improved wear resistance in general, whereas PTFE can easily form a transfer film and reduce the wear rate, especially in the running-in period. A combina-

tion of SCF and solid lubricants (PTFE and graphite) together with TiO<sub>2</sub> nanoparticles can achieve a synergistic effect on the wear behaviour of materials.

The favourable effect of nanoparticles detected in epoxy composites was also found in the investigations of thermoplastic, e.g. polyamide (PA) 6,6 matrix. It was found that nanoparticles could reduce the friction coefficient and wear rate of the PA6,6 composite remarkably, when additionally incorporated with short carbon fibres and graphite flakes. In particular, the addition of nanoparticles contributed to an obvious enhancement of the tribological performances of the short-fibre reinforced, high-temperature resistant polymers, e.g. polyetherimide (PEI), especially under extreme sliding conditions.

A procedure was proposed in order to correlate the contact temperature and the wear rate with the frictional dissipated energy. Based on this energy consideration, a better interpretation of the different performance of distinct tribo-systems is possible. The validity of the model was illustrated for various sliding tests under different conditions. Although simple quantitative formulations could not be expected at present, the study may lead to a fundamental understanding of the mechanisms controlling friction and wear from a general system point of view. Moreover, using the energy-based models, the artificial neural network (ANN) approach was applied to the experimental data. The well-trained ANN has the potential to be further used for online monitoring and prediction of wear progress in practical applications.

## Kurzfassung

Die Verwendung von Polymeren im Hinblick auf verschiedene tribologische Anwendungen entspricht mittlerweile dem Stand der Technik. Aufgrund der Vorteile von Selbstschmierung und ausgezeichneter Sauberkeit werden polymere Verbundwerkstoffe immer mehr als Gleitelemente genutzt, welche früher ausschließlich aus metallischen Werkstoffen bestanden. Die Besonderheit, die polymere Verbundwerkstoffe so vielversprechend für industrielle Anwendungen macht, ist die Möglichkeit ihre Eigenschaften durch Zugabe von speziellen Füllstoffen maßzuschneidern. Das Hauptziel dieser Arbeit bestand darin, die Wichtigkeit der Integration verschiedener funktionalisierter Füllstoffe in den Aufbau polymerer Verbundwerkstoffe mit hohem Verschleißwiderstand aufzuzeigen und die Rolle der Füllstoffe hinsichtlich des Verschleißverhaltens zu verstehen. Hierbei lag besonderes Augenmerk auf der Verbesserung des Verschleißwiderstandes bei Verbunden mit duromerer und thermoplastischer Matrix durch die Präsenz von  $\text{TiO}_2$ -Partikeln (Durchmesser 300nm).

Das tribologische Verhalten epoxidharzbasierter Verbunde, gefüllt mit kurzen Kohlenstofffasern (SCF), Graphite, PTFE und nano- $\text{TiO}_2$  in unterschiedlichen Proportionen und Kombinationen wurde untersucht, um den jeweiligen Füllstoffgehalt zu optimieren. Das Verhalten von Reibungskoeffizient, Verschleißwiderstand und Kontakttemperatur wurde unter Verwendung einer Stift-Scheibe Apparatur bei trockenem Gleitzustand, verschiedenen Kontaktdrücken und Gleitgeschwindigkeiten erforscht. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Zugabe von nano- $\text{TiO}_2$  in kohlenstofffaserverstärkte Epoxide den Reibungskoeffizienten und die Kontakttemperatur herabsetzen können. Basierend auf Aufnahmen der verschlissenen Oberflächen durch Rasterelektronen- (REM) und Rasterkraftmikroskopie (AFM) trat ein positiver Rolleffekt der Nanopartikel zwischen den Materialpaaren zum Vorschein, welcher zu einer beachtlichen Reduktion des Reibungskoeffizienten führte. Dieser Rolleffekt schützte insbesondere die SCF vor schwerwiegenden Verschleißmechanismen, speziell bei hohem Gleitdruck und hohen Geschwindigkeiten. Als Ergebnis konnte die Tragfähigkeit dieser Materialien wesentlich verbessert werden. Zusätzlich wurde die Wirkung zweier fester Schmierstoffe (PTFE-Pulver und Graphit-Flocken) auf die

tribologische Leistungsfähigkeit verglichen. Es scheint, daß Graphit generell zur Verbesserung des Verschleißwiderstandes beiträgt, wobei PTFE einen Transferfilm bilden kann und die Verschleißrate insbesondere in der Einlaufphase reduziert. Die Kombination von SCF und festen Schmierstoffen zusammen mit TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln kann einen Synergieeffekt bei dem Verschleißverhalten der Materialien hervorrufen.

Der positive Effekt der Nanopartikel in Duromeren wurde ebenfalls bei den Untersuchungen von Thermoplasten (PA 66) gefunden. Die Nanopartikel konnten den Reibungskoeffizienten und die Verschleißrate der PA 66-Verbunde herabsetzen, wobei zusätzlich Kohlenstofffasern und Graphit-Flocken enthalten waren. Die Zugabe von Nanopartikeln trug offensichtlich auch zur Verbesserung der tribologischen Leistungsfähigkeit von SCF-verstärkten, hochtemperaturbeständigen Polymeren (PEI) insbesondere unter extremen Gleitzuständen, bei. Es wurde eine Methode vorgestellt, um die Kontakttemperatur und die Verschleißrate mit der durch Reibung dissipierten Energie zu korrelieren. Diese Energiebetrachtung ermöglicht eine bessere Interpretation der verschiedenen Eigenschaften von ausgewählten Tribo-Systemen. Die Gültigkeit dieses Modells wurde für mehrere Gleittests unter verschiedenen Bedingungen erklärt.

Vom generellen Blickpunkt eines tribologischen Systems aus mag diese Arbeit zu einem fundamentalen Verständnis der Mechanismen führen, welche das Reibungs- und Verschleißverhalten kontrollieren, obwohl hier einfache quantitative (mathematische) Zusammenhänge bisher nicht zu erwarten sind. Der auf energiebasierenden Modellen fußende Lösungsansatz der neuronalen Netzwerke (ANN) wurde darüber hinaus auf die experimentellen Datensätze angewendet. Die gut trainierten ANN's besitzen das Potenzial sie in der praktischen Anwendungen zur Online-Datenauswertung und zur Vorhersage des Verschleißfortschritts einzusetzen.