

ABSTRACT

Solid particle erosion is usually undesirable, as it leads to development of cracks and holes, material removal and other degradation mechanisms that as final consequence reduce the durability of the structure imposed to erosion. The main aim of this study was to characterise the erosion behaviour of polymers and polymer composites, to understand the nature and the mechanisms of the material removal and to suggest modifications and protective strategies for the effective reduction of the material removal due to erosion.

In polymers, the effects of morphology, mechanical-, thermomechanical, and fracture mechanical- properties were discussed. It was established that there is no general rule for high resistance to erosive wear. Because of the different erosive wear mechanisms that can take place, wear resistance can be achieved by more than one type of materials. Difficulties with materials optimisation for wear reduction arise from the fact that a material can show different behaviour depending on the impact angle and the experimental conditions. Effects of polymer modification through mixing or blending with elastomers and inclusion of nanoparticles were also discussed. Toughness modification of epoxy resin with hygrothermally decomposed polyester-urethane can be favourable for the erosion resistance. This type of modification changes also the crosslinking characteristics of the modified EP and it was established the crosslink density along with fracture energy are decisive parameters for the erosion response. Melt blending of thermoplastic polymers with functionalised rubbers on the other hand, can also have a positive influence whereas inclusion of nanoparticles deteriorate the erosion resistance at low oblique impact angles (30°). The effects of fibre length, orientation, fibre/matrix adhesion, stacking sequence, number, position and existence of interleaves were studied in polymer composites. Linear and inverse rules of mixture were applied in order to predict the erosion rate of a composite system as a function of the erosion rate of its constituents and their relative content. Best results were generally delivered with the inverse rule of mixture approach.

A semi-empirical model, proposed to describe the property degradation and damage growth characteristics and to predict residual properties after single impact, was applied for the case of solid particle erosion. Theoretical predictions and experimental results were in very good agreement.

Zusammenfassung

Strahlerosionsverschleiß (Erosion) entsteht beim Auftreffen von festen Partikel auf Oberflächen und zeichnet sich üblicherweise durch einen Materialabtrag aus, der neben der Partikelgeschwindigkeit und dem Auftreffwinkel stark vom jeweiligen Werkstoff abhängt. In den letzten Jahren ist die Anwendung von Polymeren und Verbundwerkstoffen anstelle der traditionellen Materialien stark angestiegen. Polymere und Polymer-Verbundwerkstoffe weisen eine relativ hohe Erosionsrate (ER) auf, was die potenzielle Anwendung dieser Werkstoffe unter erosiven Umgebungsbedingungen erheblich einschränkt.

Untersuchungen des Erosionsverhaltens anhand ausgewählter Polymere und Polymer-Verbundwerkstoffe haben gezeigt, dass diese Systeme unterschiedlichen Verschleißmechanismen folgen, die sehr komplex sind und nicht nur von einer Werkstoffeigenschaft beeinflusst werden. Anhand der ER kann das Erosionsverhalten grob in zwei Kategorien eingeteilt werden: sprödes und duktiler Erosionsverhalten. Das spröde Erosionsverhalten zeigt eine maximale ER bei 90°, während das Maximum bei dem duktilen Verhalten bei 30° liegt. Ob ein Material das eine oder das andere Erosionsverhalten aufweist, ist nicht nur von seinen Eigenschaften, sondern auch von den jeweiligen Prüfparametern abhängig.

Das Ziel dieser Forschungsarbeit war, das grundsätzliche Verhalten von Polymeren und Verbundwerkstoffen unter dem Einfluss von Erosion zu charakterisieren, die verschiedenen Verschleißmechanismen zu erkennen und die maßgeblichen Materialeigenschaften und Kennwerte zu erfassen, um Anwendungen dieser Werkstoffe unter Erosionsbedingungen zu ermöglichen bzw. zu verbessern.

An einer exemplarischen Auswahl von Polymeren, Elastomeren, modifizierten Polymeren und Faserverbundwerkstoffen wurden die wesentlichen Einflussfaktoren für die Erosion experimentell bestimmt.

Thermoplastische Polymere und thermoplastische- und vernetzte- Elastomere

Die Versuche, den Erosionswiderstand ausgewählter Polymere (Polyethylene und Polyurethane) mit verschiedenen Materialeigenschaften zu korrelieren, haben gezeigt, dass es weder eine klare Abhängigkeit von einzelnen Kenngrößen noch von Eigenschaftskombinationen gibt. Möglicherweise führt die Bestimmung der Materialeigenschaften unter den gleichen experimentellen Bedingungen wie bei den

Erosionsversuchen zu einer besseren Korrelation zwischen ER und Materialkenngröße.

Modifiziertes Epoxidharz

Am Beispiel eines modifizierten Epoxidharzes (EP) mit verschiedener Vernetzungsdichte wurde eine Korrelation zwischen Erosionswiderstand und Bruchenergie bzw. Erosionswiderstand und Vernetzungsdichte gefunden. Die Modifizierung erfolgte mit verschiedenen Anteilen von einem hygrothermisch abgebauten Polyurethan (HD-PUR). Der Zusammenhang zwischen ER und Vernetzungsparametern steht im Einklang mit der Theorie der Kautschukelastizität.

Modifizierungseffizienz in Duromeren, Thermoplasten und Elastomeren

Des Weiteren wurde der Einfluss von Modifizierungen von Polymeren und Elastomeren untersucht. Mit dem obenerwähnten System (d.h. EP/HD-PUR) lässt sich auch der Einfluss der Zähigkeitsmodifizierung des Epoxidharzes (EP) auf das Erosionsverhalten untersuchen. Es wurde gezeigt, dass für HD-PUR Anteile von mehr als 20 Gew.% diese Modifizierung einen positiven Einfluss auf die Erosionsbeständigkeit hat. Durch Variation der HD-PUR-Anteile können für dieses EP Materialeigenschaften, die zwischen den Eigenschaften eines üblichen Duroplasten und eines weniger elastischen Gummis liegen, erzeugt werden. Deswegen stellt der modifizierte EP-Harz ein sehr gutes Modellmaterial dar, um den Einfluss der experimentellen Bedingungen zu studieren, und zu untersuchen, ob verschiedene Erodenten zu gleichen Erosionsmechanismen führen. Der Übergang vom duroplastischen zum zähen Verhalten wurde anhand von vier Erodenten untersucht. Aus den Versuchen ergab sich, dass ein solcher Übergang auftritt, wenn sehr feine, kantige Partikel (Korund) als Erodenten dienen. Die Partikelgröße und -form ist von entscheidender Bedeutung für die jeweiligen Verschleißmechanismen.

Die Effizienz neuartiger thermoplastischer Elastomere mit einer co-kontinuierlichen Phasenstruktur, bestehend aus thermoplastischem Polyester und Gummi (funktionalisierter NBR und EPDM Kautschuk), wurde in Bezug auf die Erosionsbeständigkeit untersucht. Große Anteile von funktionalisiertem Gummi (mehr als 20 Gew.%) sind vorteilhaft für den Erosionswiderstand. Weiterhin wurde untersucht, ob sich die herausragende Erosionsbeständigkeit von Polyurethan (PUR) durch Zugabe von Nanosilikaten eventuell noch steigern lässt. Das Ergebnis war, dass die Nanopartikel sich vor allem bei einem kleinen Verschleißwinkel (30°) negativ

auswirken. Die schwache Adhäsion zwischen Matrix und Partikeln erleichtert den Beginn und das Wachsen von Rissen. Dies führt zu einem schnelleren Materialabtrag von der Materialoberfläche.

Faserverbundwerkstoffe

Ferner wurden Faserverbundwerkstoffe (FVW) mit thermoplastischer und duromerer Matrix auf ihr Verhalten bei Erosivverschleiß untersucht. Es war von großem Interesse, den Einfluss von Faserlänge und -orientierung zu untersuchen. Kurzfaserverstärkte Systeme haben einen besseren Erosionswiderstand als die unidirektionalen (UD) Systeme. Die Rolle der Faserorientierung kann man nur in Verbindung mit anderen Parametern, wie Matrixzähigkeit, Faseranteil oder Faser-Matrix Haftung, berücksichtigen. Am Beispiel von GF/PP Verbunden weisen die parallel zur Verstreckungsrichtung gestrahlten Systeme den geringsten Widerstand auf. Andererseits findet bei einem GF/EP System die maximale ER in senkrechter Richtung statt. Eine Verbesserung der Grenzflächenscherfestigkeit beeinflusst die Erosionsverschleißrate nachhaltig. Wenn die Haftung der Grenzfläche ausreichend ist, spielt die Erosionsrichtung eine unbedeutende Rolle für die ER. Weiterhin wurde gezeigt, dass die Präsenz von zähen Zwischenschichten zu einer deutlichen Verbesserung des Erosionswiderstands von CF/EP- Verbunden führt.

Eine weitere Aufgabenstellung war es, die Rolle des Faservolumenanteils zu bestimmen. „Lineare, inverse und modifizierte Mischungsregeln“ wurden angewendet, und es wurde festgestellt, dass die inversen Mischungsregeln besser die ER in Abhängigkeit des Faservolumenanteils beschreiben können.

Im Anwendungsbereich von Faserverbundwerkstoffen ist nicht nur die Kenntnis der ER, sondern auch die Kenntnis der Resteigenschaften erforderlich. Ein halbempirisches Modell für die Vorhersage des Schlagenergieschwellwertes (U_0) für den Beginn der Festigkeitsabnahme und der Restzugfestigkeit nach einer Schlagbelastung wurde bei der Untersuchung des Erosionsverschleißes angewendet. Experimentelle Ergebnisse und theoretische Vorhersagen stimmten nicht nur für duromere CF/EP-Verbundwerkstoffe, sondern auch für Verbundwerkstoffe mit einer thermoplastischen Matrix (GF/PP) sehr gut überein.