

Zusammenfassung

Der Einsatz von Polymeren und Polymerverbundwerkstoffen in tribologischen Anwendungen ist heute insbesondere im Bereich von trockenlaufenden Gleitanwendungen nicht mehr wegzudenken. Ein elementarer Prozess des Gleitens ist die Ausbildung von sogenannten Transferfilmen, bei denen es sich um die (gegenseitige) Ablagerung von abgetrennten Material auf der Gleitfläche des anderen Gleitpartners handelt. Allgemein wird anerkannt, dass die Ausbildung solcher – typischerweise diskontinuierlichen und heterogen verteilten – Transferfilme die Entwicklung von Reibung und Verschleiß signifikant beeinflussen. Daher nimmt die Analyse von Transferfilmen in wissenschaftlichen Studien mit polymeren Verbundwerkstoffen einen hohen Stellenwert ein. Hierbei wurde festgestellt, dass die Analyse solcher Transferfilme von qualitativen Aussagen dominiert werden, da diese oft auf visuellen Beobachtungen von Verschleißflächenaufnahmen basieren. Des Weiteren werden Untersuchungen oft lediglich nach dem Versuch durchgeführt, sodass nur eine Zeitpunktaufnahme zur Versuchsprobe vom letzten Messpunkt vorliegt. Obwohl alternative quantitative und zeitaufgelöste Analysemethoden existieren, finden diese kaum Anwendung. Mögliche Ursachen hierfür sind die signifikanten Einschränkungen bzgl. der Materialauswahl, z.B. der zwingende Einsatz transparenter oder elektrisch leitfähiger Materialien, die Anwendung hochspezialisierter Maschinen oder Eigenbauten, oder der signifikante Mehraufwand, um die Daten zu generieren, z.B. bei der Versuchsdurchführung und -auswertung.

Ähnlich verhält sich die Datenlage bei Transferfilmattributen, z.B. bzgl. deren Transferfilmdicke, Adhäsionskraft zum Substrat, lateraler Verteilung und Ausbildungsgeschwindigkeit. Darüber hinaus sind einige der wenig vorhandenen Metriken nicht ausreichend definiert und lassen somit Spielraum für Fehlinterpretationen.

Aufgrund dieser schwierigen und unvollständigen Datenlage sind Korrelationsanalysen zwischen Reibungs- oder Verschleißergebnissen mit Transferfilmergebnissen mithilfe statistischer Methoden bis heute äußerst herausfordernd. Daher bleibt die langanhaltende Frage, ob Transferfilme die Ursache oder die Konsequenz von Reibung oder Verschleiß ist, unzureichend beantwortet, obwohl Transferfilme seit den 1960er Jahren bekannt sind. Deshalb ist das Hauptziel dieser Arbeit, das Verständnis von Transferfilmen zu verbessern. Es wird vermutet, dass ein wesentlicher Grund für diese unzureichende Datenlage durch den fehlenden Zugang zu Methoden verursacht wird, die Transferfilme zeitlich, quantitativ und vollflächig aufgelöst analysieren und zudem grundsätz-

lich uneingeschränkte Materialkombinationen erlauben. Um diese Mängel zu überwinden, besteht somit ein wesentlicher Bestandteil dieser Ausarbeitung aus der Entwicklung geeigneter Methodenkonzepte zur Erfassung und Auswertung von Transferfilmen. Die dazu entwickelte Transferfilm-Luminanz-Analyse (TLA) wurde in ein ASTM G137 Block-auf-Ring-Tribometer implementiert. Polyphenylensulfid (PPS) und PPS-basierte Verbundwerkstoffe, gefüllt mit einer Variation aus Kohlenstofffasern (CF), Graphit (GR) und Polytetrafluorethylen (PTFE), wurden als Versuchsmaterialien gewählt. Die hieraus gewonnenen Daten sind aufgrund ihrer quantitativen und zeitlichen Auflösung für statistische Analysen zugänglich. Darüber hinaus wurden auf Basis dieser TLA Daten Metriken zur Beschreibung kinetischer Eigenschaften, der Gleichmäßigkeit der Transferfilmverteilung (Uniformität), der zeitlichen Stabilität und der durchschnittlichen Dicke von Transferfilmen entwickelt und implementiert.

Die Ergebnisse der TLA Daten zeigen deutlich die laterale und zeitliche Dynamik der Transferfilmbildung und dienen als Grundlage für weitere Untersuchungen.

Die kinetischen Untersuchungsergebnisse zeigen keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Materialtypen. Ob dies daran liegt, dass die Füllstoffe durch den relativ geringen pv -Wert von 2 MPa·m/s nicht zum Tragen kommen, oder ob die Ausbildungsgeschwindigkeit durch andere Parameter als pv determiniert werden, muss in zukünftigen pv -Untersuchungen beantwortet werden. Unabhängig davon wurden bei der Bestimmung der kinetischen Eigenschaften zwei verschiedene Ablagerungsmechanismen identifiziert, die durch den Ansatz variierender Verschleißpartikelgrößen erklärt wird. Es wird vermutet, dass während den ersten Rotationen des Metalrings ein Übertrag von großen Verschleißpartikeln stattfindet. Dieser wird durch das Eindringen von Rauheitsspitzen in die Oberfläche des polymeren Werkstoffs verursacht. Die Partikelgröße nimmt anschließend durch Zusetzen oder Abbruch der Rauheitsspitzen bis zu einem gewissen Punkt ab und bleibt fortan konstant.

Die Analyse der Uniformität zeigt, dass im Mittel signifikante Unterschiede durch den Einsatz verschiedener Füllstoffe in den Verbundwerkstoffen existieren. Die höchste Uniformität wurde mit CF-gefülltem PPS erreicht. Des Weiteren wurde festgestellt, dass der „Steady-State“ der Uniformität schneller erreicht wird als der „Steady-State“ der Transferfilmbildung. Hieraus wurde geschlossen, dass in der Einlaufphase der primäre Ablagerungsmechanismus die laterale Verteilung von Verschleißabrieb ist. Nachdem der „Steady-State“ der Uniformität erreicht wurde, dominiert ein anderer Ablagerungsmechanismus, die Partikelagglomeration. Hierbei nimmt die Dicke der lateralen Transferfilme bis zum „Steady-State“ der Transferfilmbildung zu.

Die Ergebnisse der zeitlichen Stabilität von Transferfilmen zeigen, wie bestimmte Füllstoffe signifikant den zeitlichen Verlauf des Transferfilmaufbaus beeinflussen. CF-haltige Werkstoffe verursachen wiederkehrende Transferfilmabrisse, während Werkstoffe, die nur mit GR oder PTFE gefüllt sind, deutlich stabilere Verläufe aufweisen.

Die vorgestellte Methode zur Bestimmung der Transferfilmdicke stellt einen mathematisch-physikalischen Zusammenhang zwischen den TLA Daten und der Transferfilmdicke her, sodass anhand einer einzelnen Transferfilmdickenmessung am Ende des Versuchs die restlichen Dickenwerte retrospektiv berechnet werden können. Zur Ermittlung des einzelnen Dickenwerts wurde eine neue Messmethodik entwickelt, die auf Profilometertechnik und einer Differenzmessung basiert. Leider zeigte diese Profilometermethode jedoch deutliche Schwächen, sodass die vorgestellte Methodik nicht vollständig auf die PPS Studie angewendet werden konnte. Dennoch wurden anhand von zwei TLA-Datensätzen die retrospektive Umwandlung in Dickenwerten demonstriert. Um jedoch diese Methode zukünftig zu nutzen, muss die Einzelmessung der Transferfilmdicke optimiert oder durch eine andere, geeignete Messtechnik substituiert werden. Hierfür wurden Verbesserungsvorschläge erarbeitet.

Schließlich wurden auf der Basis der Transferfilmdaten, sowie aus Daten den Standardmetriken der Tribometrie, ein integriertes, multi-lineares Regressionsmodell entwickelt. Die Ergebnisse belegen, dass ein Großteil der Reibung (über 88 %) mit dem Ausmaß der Transferfilmuniformität und -stabilität, der Gegenkörpertemperatur und der Materialkomposition erklärt werden kann. Im Gegensatz dazu zeigen Transfilme keine Korrelation mit Verschleiß auf. Hierdurch konnte lediglich durch die Materialkomposition ein geringer Anteil der Verschleißbildung (ca. 50 %) erklärt werden.

Zusammengefasst wurde in der vorliegenden Ausarbeitung ein Werkzeug zur umfassenden Untersuchung von Transferfilmen und Transferfilmeigenschaften entwickelt. Im Vergleich zu anderen Ansätzen ist das Ausmaß an Ergebnissen, die in Relation zum Aufwand aus der TLA gewonnen werden können deutlich größer. Die Ergebnisse wurden in ein integriertes Datenmodell eingearbeitet und wichtige Zusammenhänge zwischen Reibung und Verschleiß und deren Relation zu Transferfilmen identifiziert. Es konnten neue Hypothesen zu Transferfilmbildungsmechanismen formuliert sowie wiederkehrende Muster der Transferfilmbildung identifiziert werden. Das Datenmodell kann durch weitere Ergebnisse aus zukünftigen Untersuchungen präzisiert werden, sodass weitere Zusammenhänge identifiziert und Prognosen präzisiert werden können.

Abstract

In the field of polymer tribology, the deposition of wear debris on the counter-facing wear track during dry sliding, also known as transfer film, is a fundamental process. These typically discontinuous and heterogeneous films are often assumed to be directly responsible for or at least be involved in the progression of friction and wear. Nevertheless, the state of the art shows that the determination and evaluation of such transfer film formations are most frequently reported either only qualitatively, ex-post, or derived from local, possibly unrepresentative inspection areas. This reporting state is valid for determining the extent of transfer film formation and other transfer film-related attributes, e.g. its formation speed, coverage, adhesion, and thickness.

Because of this data situation, transferring results from one study to another is challenging and risks misinterpretation. Furthermore, without temporally resolved and quantitative results, correlation analyses between friction or wear and the extent of transfer film formation, or other attributes, are difficult if conductible at all. As a consequence, the long lasting research question on the role of transfer film, whether it is the cause or consequence of friction or wear, is still unanswered.

In order to come closer to the answer, new transfer film detection and evaluation methods are needed whose results overcome these shortcomings.

The following elaboration develops such a concept based on photo-optical techniques combined with automation programs. The developed transfer film luminance analysis (TLA) was demonstrated on a material composition study based on polyphenylene sulfide (PPS) and PPS compositions incorporated with various fillers, including carbon fibers, graphite, and polytetrafluoroethylene. The results demonstrate the tempo-spatial dynamics of the transfer film formation process in a quantitative manner.

Based on this data, transfer film metrics were developed in the form of transfer film kinetic properties, spatial uniformity, temporal stability, and transfer film thickness. Finally, based on this information, an integrated data model was developed to identify correlations of various parameters and their contribution to friction and wear. Furthermore, new hypotheses on transfer film formation mechanisms were formulated.

Overall, with the help of TLA and the data-driven model, the understanding of transfer films was improved, and a step towards the answer on the role of transfer films was achieved.