

Abstract

Thermoplastic polymer-polymer composites consist of a polymeric matrix and a polymeric reinforcement. The combination of these materials offers outstanding mechanical properties at lower weight than standard fiber reinforced materials. Furthermore, when both polymeric components originate from the same family or, ideally, from the same polymer, their sustainability degree is higher than standard fiber reinforced composites.

A challenge of polymer-polymer composites is the subsequent processing of their semi-finished materials by heating techniques. Since the fibers are made of meltable thermoplastic, the reinforcing fiber structure might be lost during the heating process. Hence, the mechanical properties of an overheated polymer-polymer composite would decline, and finally, they would be even lower than the neat matrix. A decrease of process temperature to manage the heating challenge is not reasonable since the cycle time would be increased at the same time. Therefore, this work pursues the adaption of a fast and selective heating method on the use with polymer-polymer composites. Inductively activatable particles, so-called susceptors, were distributed in the matrix to evoke a local heating in the matrix when being exposed to an alternating magnetic field. In this way, the energy input to the fibers is limited.

The experimental series revealed the induction particle heating effect to be mainly related to susceptor material, susceptor fraction, susceptor distribution as well as magnetic field strength, coupling distance, and heating time. A proper heating was achieved with ferromagnetic particles at a filler content of only 5 wt-% in HDPE as well as with its respective polymer fiber reinforced composites. The study included the analysis of susceptor impact on mechanical and thermal matrix properties as well as a degradation evaluation. The susceptors were identified to have only a marginal impact on matrix properties. Furthermore, a semi-empiric simulation of the particle induction heating was applied, which served for the investigation of intrinsic melting processes.

The achieved results, the experimental as well as the analytic study, were successfully adapted to a thermoforming process with a polymer-polymer material, which had been preheated by means of particle induction.

Kurzfassung

Die Klasse der eigenverstärkten Verbundwerkstoffe umfasst Thermoplaste, die mit einer polymeren Verstärkung ausgestattet sind. Diese meist faserförmige Verstärkung ist dabei der gleichen Polymerfamilie zugeordnet, der auch die Matrix angehört. Im Hinblick auf die Faser/Matrix-Haftung und aus Recyclinggründen sind beide Komponenten im idealen Fall aus demselben Material hergestellt. Solche Systeme sind seit einigen Jahren bereits im Bereich der Polyolefine, meist in Form von tafelförmigen Halbzeugen, auf dem Markt etabliert. Diese eigenverstärkten Kunststoffe weisen Vorteile im Bereich der Zugeigenschaften, der Schlagzähigkeit, der Dichte sowie der Rezyklierfähigkeit im Vergleich zu Faserkunststoffverbunden mit anorganischer Verstärkung auf. Hierdurch ist ein extremer Leichtbau mit hoher Energieabsorption des Bauteils möglich. Die Anwendungsmöglichkeiten reichen von Unterbodenblechen für Automobile über Schalenelemente in Transportboxen und Koffern bis hin zu verstärkter persönlicher Schutzausrüstung im Sportbereich.

Bei der Verarbeitung eigenverstärkter Verbundwerkstoffhalbzeuge besteht die Gefahr, die thermoplastische Verstärkungsphase thermisch zu schädigen und damit die mechanischen Eigenschaften des Verbunds zu reduzieren. Eine extrinsische Erwärmung, d.h. eine Erwärmung von außen, erweist sich als problematisch, da die bei Thermoplasten übliche Verwendung einer Verarbeitungstemperatur oberhalb der Schmelztemperatur des Polymers zu einem Schmelzen der verstärkenden Polymerfaserstruktur führen würde. Selbst bei unterschiedlichen Schmelztemperaturen von Matrix und Faser, die innerhalb einer Polymerfamilie realisiert werden könnten, würden Fasern im Randbereich stärker erwärmt und damit auch eher geschädigt als im Zentrum des Verbunds. Eine moderatere Arbeitstemperatur würde zwar die Faserkomponente nicht schädigen, aber auch zu längeren Prozesszeiten führen.

Aufgrund dieser Problematik wurde eine neuartige Methode zur induktiven Erwärmung eigenverstärkter Verbunde über in die Matrix eingebrachte Partikel, sog. Suszeptoren, untersucht und validiert. Die Partikel werden benötigt, um die Energie eines von außen wirkenden elektromagnetischen Induktionsfelds in Wärmeenergie im Verbund umzusetzen. Thermoplastische Polymere sind ohne diese Additive transparent gegenüber magnetischen Feldern. Da die Partikel nur in der Matrix

eingebraucht sind, kann eine lokale Heizwirkung erzielt werden. Durch die Distanz zu den partikelförmigen Wärmequellen werden die ohne Partikel ausgerüsteten Fasern vor einem zu großen Wärmeeintrag geschützt.

Als Suszeptoren wurden marktübliche, in großer Stückzahl vorhandene Partikel verwendet, wie z.B. Graugusseisen, Magnetit, Nickel und Rußpartikel sowie nanoskalige Kohlenstoffröhrchen. Diese elektrisch als auch magnetisch unterschiedlichen Partikel wurden gewählt, um die bekannten Wirkmechanismen induktiver Erwärmung, die auf elektrischen Eigenschaften basierten Wirbelstromverluste und die magnetischen Hystereseverluste, hinsichtlich ihrer Wirkungsweise zu unterscheiden. Zur Verringerung des Aufwands der experimentellen Reihe wurden die grundsätzlichen Zusammenhänge der Heizwirkung an zwei unverstärkten Polymeren untersucht. Ein niedrigschmelzendes Polyethylen (HDPE) und ein hochschmelzendes Polyamid (PA6) wurden gewählt, um die Umsetzbarkeit in zwei unterschiedlichen Temperaturbereichen zu testen.

Gute Heizwirkungen wurden bei ferromagnetischen Suszeptoren erzielt, was auf magnetischen Hystereseverlust als primären Heizmechanismus der induktiven Erwärmung schließen lässt. Durch die fortwährende Umpolung des magnetischen Materials, insbesondere der Weißschen Bezirke, entsteht ein Wärmeverlust, der als Temperaturanstieg im Polymermaterial beobachtet wird. Im Gegensatz dazu wurde bei rein elektrischen Additiven keine Erwärmung festgestellt. Diese Beobachtung zeigt, dass Wirbelstromverluste, d.h. Wärmeverluste, die durch die Umpolung eines elektrischen Stromes und damit zu Jouleschen Verlusten führen, nicht auftreten.

Die Untersuchungen ergaben eine Abhängigkeit der Heizwirkung ferromagnetischer Suszeptoren von ihrem Füllgehalt im Verbund. Ein Schmelzen der Matrix konnte unabhängig vom Polymer bereits bei einem Suszeptorgehalt von nur 5 Gewichtsprozent beobachtet werden. Neben dem Füllgehalt wurden der Einfluss der Partikelgröße sowie prozesseitige Parameter wie Frequenz, Induktionsstrom und Kopplungsabstand untersucht. Die besten Ergebnisse wurden bei einer Frequenz von 453 kHz mit einem 10 kW Generator bei einem möglichst minimalen Abstand erzielt.

Die Auswirkung der Partikelerwärmung auf die Eigenschaften der Matrix wurde sowohl in thermischen als auch mechanischen Experimenten untersucht. Da es bislang keine standardisierte Vorgehensweise zum Nachweis thermischer Degradation bei Partikelerwärmung existiert, wurde eine neue Methodik entwickelt, die aus der Höhe der nominellen Schmelztemperatur auf den Degradationsgrad des Polymers schließen lässt. Eine Polymerdegradation konnte zwar nachgewiesen werden, deren Schädigungswirkung aber im Vergleich zu Referenzheizverfahren, Infrarot- oder Lasererwärmung, deutlich geringer ausfiel. Weiterhin zeigte sich in mechanischen Studien, dass die Partikel mit Ausnahme der Schlagzähigkeit keinen signifikanten negativen Einfluss auf die Eigenschaften der Matrix haben.

Für den Einsatz mit polymerverstärkten Materialien wurden die ferritischen Partikel, Graugusspulver und Magnetit, ausgewählt. Eigenverstärkte Composite konnten mit Hilfe des induktiven Verfahrens innerhalb von drei Minuten in den schmelzflüssigen Bereich überführt werden. Eine Beeinträchtigung der Fasern wurde optisch und mechanisch widerlegt. Da die Vorgänge um die Partikel bei der Erwärmung nicht direkt beobachtbar sind, wurde ein simulativer Ansatz für Untersuchungen zum intrinsischen Aufheizverhalten gewählt. Die Simulation zeigte, dass die Verteilung der Wärmeenergie vom Dispersionsgrad der Partikel abhängig ist und gleichermaßen Matrix und Faserbereiche erreicht. Dadurch ist es theoretisch möglich, dass Fasern schneller zum Schmelzen gebracht werden könnten als die Matrix. Eine Selektivität des Aufheizverhaltens durch das Einbringen von Partikeln in die primär zu erwärmende Matrix wurde damit widerlegt. In der experimentellen Versuchsreihe wurde aber eine eingeschränkte ortsgebundene Aufheizung nachgewiesen, welche sich dadurch charakterisiert, dass die Erwärmung über das Magnetfeld lokal sehr gut steuerbar ist. Hierdurch wird die Erwärmung von Teilbereichen eines Bauteils ermöglicht. In einem Umformprozess könnten dadurch Bereiche von der Erwärmung ausgespart werden, die keiner späteren Deformation unterliegen. Damit wird insbesondere ein Faserschrumpf der polymeren Verstärkung, der auch in konkurrierenden Prozessen beobachtet wurde, über die Bauteilgesamtheit minimiert.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden auf einen Thermoformprozess eines eigenverstärkten Materials im Kleinstmaßstab angewendet und erfolgreich umgesetzt.