

Abstract

The demand of sustainability is continuously increasing. Therefore, thermoplastic composites became a focus of research due to their good weight to performance ratio. Nevertheless, the limiting factor of their usage for some processes is the loss of consolidation during re-melting (deconsolidation), which reduces the part quality. Several studies dealing with deconsolidation are available. These studies investigate a single material and process, which limit their usefulness in terms of general interpretations as well as their comparability to other studies. There are two main approaches. The first approach identifies the internal void pressure as the main cause of deconsolidation and the second approach identifies the fiber reinforcement network as the main cause. Due to of their controversial results and limited variety of materials and processes, there is a big need of a more comprehensive investigation on several materials and processes.

This study investigates the deconsolidation behavior of 17 different materials and material configurations considering commodity, engineering, and performance polymers as well as a carbon and two glass fiber fabrics. Based on the first law of thermodynamics, a deconsolidation model is proposed and verified by experiments. Universal applicable input parameters are proposed for the prediction of deconsolidation to minimize the required input measurements. The study revealed that the fiber reinforcement network is the main cause of deconsolidation, especially for fiber volume fractions higher than 48 %. The internal void pressure can promote deconsolidation, when the specimen was recently manufactured. In other cases the internal void pressure as well as the surface tension prevents deconsolidation. During deconsolidation the polymer is displaced by the volume increase of the void. The polymer flow damps the progress of deconsolidation because of the internal friction of the polymer. The crystallinity and the thermal expansion lead to a reversible thickness increase during deconsolidation. Moisture can highly accelerate deconsolidation and can increase the thickness by several times because of the vaporization of water. The model is also capable to predict reconsolidation under the defined boundary condition of pressure, time, and specimen size. For high pressure matrix squeeze out occur, which falsifies the accuracy of the model.

The proposed model was applied to thermoforming, induction welding, and thermoplastic tape placement. It is demonstrated that the load rate during thermoforming is the critical factor of achieving complete reconsolidation. The required load rate can be determined by the model and is dependent on the cooling rate, the forming length, the extent of deconsolidation, the processing temperature, and the final pressure. During induction welding deconsolidation can tremendously occur because of the left moisture in the polymer at the molten state. The moisture cannot fully diffuse out of the specimen during the faster heating. Therefore, additional pressure is needed for complete reconsolidation than it would be for a dry specimen. Deconsolidation is an issue for thermoplastic tape placement, too. It limits the placement velocity because of insufficient cooling after compaction. If the specimen after compaction is locally in a molten state, it deconsolidates and causes residual stresses in the bond line, which decreases the interlaminar shear strength. It can be concluded that the study gains new knowledge and helps to optimize these processes by means of the developed model without a high number of required measurements.

Kurzfassung

Aufgrund seiner guten spezifischen Festigkeit und Steifigkeit ist der endlosfaserverstärkte Thermoplast ein hervorragender Leichtbauwerkstoff. Allerdings kann es während des Wiederaufschmelzens durch Dekonsolidierung zu einem Verlust der guten mechanischen Eigenschaften kommen, daher ist Dekonsolidierung unerwünscht. In vielen Studien wurde die Dekonsolidierung mit unterschiedlichen Ergebnissen untersucht. Dabei wurde meist ein Material und ein Prozess betrachtet. Eine allgemeine Interpretation und die Vergleichbarkeit unter den Studien sind dadurch nur begrenzt möglich. Aus der Literatur sind zwei Ansätze bekannt. Dem ersten Ansatz liegt der Druckunterschied zwischen Poreninnendruck und Umgebungsdruck als Hauptursache der Dekonsolidierung zu Grunde. Beim zweiten Ansatz wird die Faserverstärkung als Hauptursache identifiziert. Aufgrund der kontroversen Ergebnisse und der begrenzten Anzahl der Materialien und Verarbeitungsverfahren, besteht die Notwendigkeit einer umfassenden Untersuchung über mehrere Materialien und Prozesse. Diese Studie umfasst drei Polymere (Polypropylen, Polycarbonat und Polyphenylensulfid), drei Gewebe (Köper, Atlas und Unidirektional) und zwei Prozesse (Autoklav und Heißpressen) bei verschiedenen Faservolumengehalten.

Es wurde der Einfluss des Porengehaltes auf die interlaminare Scherfestigkeit untersucht. Aus der Literatur ist bekannt, dass die interlaminare Scherfestigkeit mit der Zunahme des Porengehaltes linear sinkt. Dies konnte für die Dekonsolidierung bestätigt werden. Die Reduktion der interlaminaren Scherfestigkeit für thermoplastische Matrices ist kleiner als für duroplastische Matrices und liegt im Bereich zwischen 0,5 % bis 1,5 % pro Prozent Porengehalt. Außerdem ist die Abnahme signifikant vom Matrixpolymer abhängig.

Im Falle der thermisch induzierten Dekonsolidierung nimmt der Porengehalt proportional zu der Dicke der Probe zu und ist ein Maß für die Dekonsolidierung. Die Pore expandiert aufgrund der thermischen Gasexpansion und kann durch äußere Kräfte zur Expansion gezwungen werden, was zu einem Unterdruck in der Pore führt. Die Faserverstärkung ist die Hauptursache der Dickenzunahme beziehungsweise der Dekonsolidierung. Die gespeicherte Energie, aufgebaut

während der Kompaktierung, wird während der Dekonsolidierung abgegeben. Der Dekompaktierungsdruck reicht von 0,02 MPa bis 0,15 MPa für die untersuchten Gewebe und Faservolumengehalte. Die Oberflächenspannung behindert die Porenexpansion, weil die Oberfläche vergrößert werden muss, die zusätzliche Energie benötigt. Beim Kontakt von benachbarten Poren verursacht die Oberflächenspannung ein Verschmelzen der Poren. Durch das bessere Volumen-Oberfläche-Verhältnis wird Energie abgebaut. Der Polymerfluss bremst die Entwicklung der Dickenzunahme aufgrund der erforderlichen Energie (innere Reibung) der viskosen Strömung. Je höher die Temperatur ist, desto niedriger ist die Viskosität des Polymers, wodurch weniger Energie für ein weiteres Porenwachstum benötigt wird. Durch den reversiblen Einfluss der Kristallinität und der Wärmeausdehnung des Verbundes wird während der Erwärmung die Dicke erhöht und während der Abkühlung wieder verringert. Feuchtigkeit kann einen enormen Einfluss auf die Dekonsolidierung haben. Ist noch Feuchtigkeit über der Schmelztemperatur im Verbund vorhanden, verdampft diese und kann die Dicke um ein Vielfaches der ursprünglichen Dicke vergrößern.

Das Dekonsolidierungsmodell ist in der Lage die Rekonsolidierung vorherzusagen. Allerdings muss der Rekonsolidierungsdruck unter einem Grenzwert liegen (0,15 MPa für 50x50 mm² und 1,5 MPa für 500x500 mm² große Proben), da es sonst bei der Probe zu einem Polymerfluss aus der Probe von mehr als 2 % kommt. Die Rekonsolidierung ist eine inverse Dekonsolidierung und weist die gleichen Mechanismen in der entgegengesetzten Richtung auf.

Das entwickelte Modell basiert auf dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik und kann die Dicke während der Dekonsolidierung und der Rekonsolidierung vorhersagen. Dabei wurden eine homogene Porenverteilung und eine einheitliche, kugelförmige Porengröße angenommen. Außerdem wurde die Massenerhaltung angenommen. Um den Aufwand für die Bestimmung der Eingangsgrößen zu reduzieren, wurden allgemein gültige Eingabeparameter bestimmt, die für eine Vielzahl von Konfigurationen gelten. Das simulierte Materialverhalten mit den allgemein gültigen Eingangsparametern erzielte unter den definierten Einschränkungen eine gute Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Materialverhalten. Nur bei Konfigurationen mit einer Viskositätsdifferenz von mehr als

30 % zwischen der Schmelztemperatur und der Prozesstemperatur sind die allgemein gültigen Eingangsparameter nicht anwendbar. Um die Relevanz für die Industrie aufzuzeigen, wurden die Effekte der Dekonsolidierung für drei weitere Verfahren simuliert. Es wurde gezeigt, dass die Kraftzunahmegeschwindigkeit während des Thermoformens ein Schlüsselfaktor für eine vollständige Rekonsolidierung ist. Wenn die Kraft zu langsam appliziert wird oder die finale Kraft zu gering ist, ist die Probe bereits erstarrt, bevor eine vollständige Konsolidierung erreicht werden kann. Auch beim Induktionsschweißen kann Dekonsolidierung auftreten. Besonders die Feuchtigkeit kann zu einer starken Zunahme der Dekonsolidierung führen, verursacht durch die sehr schnellen Heizraten von mehr als 100 K/min. Die Feuchtigkeit kann während der kurzen Aufheizphase nicht vollständig aus dem Polymer ausdiffundieren, sodass die Feuchtigkeit beim Erreichen der Schmelztemperatur in der Probe verdampft. Beim Tapelegen wird die Ablegegeschwindigkeit durch die Dekonsolidierung begrenzt. Nach einer scheinbar vollständigen Konsolidierung unter der Walze kann die Probe lokal dekonsolidieren, wenn das Polymer unter der Oberfläche noch geschmolzen ist. Die daraus resultierenden Poren reduzieren die interlaminaire Scherfestigkeit drastisch um 5,8 % pro Prozent Porengehalt für den untersuchten Fall. Ursache ist die Kristallisation in der Verbindungszone. Dadurch werden Eigenspannungen erzeugt, die in der gleichen Größenordnung wie die tatsächliche Scherfestigkeit sind.