

## Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es die auftretenden Phänomene der Konsolidierung beim thermoplastischen Tapelegen zu beschreiben. Ein genaues Verständnis der auftretenden Zusammenhänge ist unabdingbar um hochqualitative Bauteile zu fertigen und den Prozess für industrielle Anwendungen im Automobil, Luft- und Raumfahrtsektor konkurrenzfähig zu machen. Die größte Herausforderung bei dieser Technik ist die prozessbedingt sehr kurze Verweildauer des Materials unter der Konsolidierungsrolle, in der eine vollständige Polymerdiffusion in der Fügezone erreicht werden soll. Infolgedessen wurden ausführliche Untersuchungen hinsichtlich der optimalen Prozessparameter durch Halbzeug-, Prozess- und Bauteiltests, sowie durch Prozesssimulation durchgeführt.

Die Temperaturverteilung unter der Heißgasdüse wurde untersucht. Die anfängliche Annahme eines größeren Wärmeeintrages bei höherem Gasvolumenstrom konnte als teilweise richtig bewiesen werden. Durch den sinus-, beziehungsweise wellenförmigen Verlauf bei der konvektiven Wärmeübertragung wird eine geringere Wärmeabgabe bei höheren Gasvolumenströmen induziert. Folglich wirkt sich dieser Effekt auf die interlaminaire Festigkeit aus. Untersuchungen haben gezeigt, dass das Heißgas Temperaturen von über 1700°C erreichen kann. Eine derartig hohe Temperatur kann zu einer thermischen Alterung, sowie Degradation des abgelegten Materials führen.

Der Verbindungsprozess zwischen den einzelnen Lagen kann als die Kombination der Effekte Grenzflächenkontakt  $D_{ic}$  und der dort ablaufenden Polymerdiffusion  $D_h$  angesehen werden. Die Polymerkettendiffusion startet nur in den Materialzonen, in denen ein direkter Kontakt zwischen den Materialzonen hergestellt wurde. Unebenheiten auf der Halbzeugoberfläche behindern eine gleichmäßige Ausbildung des Grenzflächenkontakts. Die Abplattung der Oberflächenrauigkeit kann als stufenweise Funktion angenommen werden, somit wird beim Ablegen mit jedem sukzessiven Überfahren der Verbundzone der Grenzflächenkontakt verbessert. Folglich verbessert das fortlaufende Ablegen (Dickenaufbau des Laminats) den Konsolidierungsgrad in den bereits abgelegten Lagen. Dieses Phänomen wirkt sich jedoch nur auf wenige aufeinanderfolgende Lagen (1-6 Lagen), in denen die Temperatur über den Schmelzpunkt steigt, aus.

Auf der Kombination der Prozessgeschwindigkeit und des Heißgasdüsen volumens basierende drei Energieeintragslevel konnten identifiziert werden. Bei Wahl einer Kombination der beiden Parameter mit insgesamt niedrigem Eintragsniveau ist der Energieeintrag sowohl in das abzulegende Tape als auch in das bereits abgelegte Substrat begrenzt und ein daraus resultierender unvollständiger Grenzflächenkontakt verhindert den Verbund. Obgleich ein hoher Energieeintrag den Grad des Verbundes  $D_b$  bis hin zu 97% anhebend kann, tritt hierbei das Phänomen der thermischen Degradation auf. Die Polymerdiffusion und die Polymervernetzung folgen der Arrhenius-Gleichung mit Aktivierungsenergien von 43 KJ/mol und 276 KJ/mol. Die Polymervernetzung bei hohem Temperatureintrag erschwert die Polymerdiffusion und resultiert somit in einer verringerten Verbundstärke. Somit ermöglicht die Wahl optimierter den Energieeintrag betreffenden Prozessparametern eine kontinuierliche über den gesamten Legeprozess fortschreitende Verbesserung des interlaminaren Verbundes.

Eine Multi-Parameter-Studie hat gezeigt, dass eine verlängerte Konsolidationsphase, einerseits erreichbar durch Erhöhungen der Anzahl der Überfahrvorgänge, andererseits durch Verlängerung der Konsolidierstrecke, oder durch Einsatz von mehreren Konsolidierungsrollen, in einer Aufweitung des Profilverlaufs des Verbundgrades  $D_b$  resultiert. Auf diese Weise sind hohe Ablegegeschwindigkeiten (bis zu 7 m/min) realisierbar und machen den Prozess für industrielle Anwendungen geeignet. Mit der am IVW vorhandenen Tapelegeeinheit mit einer Kompaktierungsrolle ist eine Laminatherstellung möglich, welche autoklav-ähnliche Güte besitzt (bezogen auf ILSS und Porengehalt), wenn das bändchenförmige vorimprägnierte Halbzeug einen Porengehalt kleiner 1% aufweist.

Als auf die Zugfestigkeit 90° primärer beeinflussender Parameter konnte die Deformationen der Tape kante identifiziert werden. Lamine, welche mit einer leichten Überlappung der Tapes erstellt wurden, weisen eine ca. 10% Steigerung bezüglich der Querkraft verglichen zu Laminaten mit reiner Stoß-an-Stoß Ablage.

Ein hohes Energieeintragsniveau wirkt sich im Ablegeprozess jedoch negativ auf die Güte des Querverbundes der Lamine aus, da sich hierbei Lufteinschlüsse bilden. Nachträgliche Konsolidierungsschritte wie beispielsweise zusätzliche Überfahrvorgänge mit geringem Gasvolumenstrom haben sich als positiv erwiesen um die eingeschlossenen Poren zu eliminieren und die Gesamtqualität des Laminats zu ver-

bessern.

Letztlich kann die in dieser Arbeit entwickelte Simulation dazu verwendet werden um bestehende limitierende Parameterkonstellationen zu identifizieren um somit durch optimierte Prozessfenster eine vollständige Konsolidation zu erreichen. Die ausgeführte Parameterstudie hat gezeigt, dass mit der aktuell am Markt angebotenen Halbzeuggüte (ursprünglicher Porengehalt 3,1%) Lamine mit einem Verbundgrad  $D_b > 97\%$ , bei jedoch gleichzeitig erhöhtem intralaminaren Porengehalt, erstellt werden können. Obgleich es sich in dieser Arbeit durch experimentelle Untersuchungen gezeigt hat, dass sich das Vorhandensein von intralaminaren Poren nicht negativ auf ILSS-Werte auswirkt, gibt es Anwendungsfälle (Luft- und Raumfahrt oder Medizintechnik) in denen ein Porengehalt  $< 1\%$  gefordert ist. Die Werkzeugtemperatur konnte neben der Heißgastemperatur und der Prozessgeschwindigkeit als dritter Parameter mit starken Auswirkungen auf die Laminatgüte identifiziert werden. Ein hochtemperiertes Werkzeug (260-290 °C) begünstigt einerseits den Verbund innerhalb des Laminates, andererseits jedoch wird hierdurch eine Porenexpansion gefördert. Simulationsergebnisse zeigen, dass eine Porenexpansion durch eine kalte Werkzeugoberfläche verhindert werden kann. Jedoch die zur Ausbildung der Adhäsion zwischen Erstlage und Werkzeug notwendige erhöhte Temperatur steht dem entgegen.

## Abstract

The aim of this study is to describe the consolidation in thermoplastic tape placement process to obtain high quality structure, making the process viable for automotive and aerospace industrial applications. The major barrier in this technique is very short residence time of material under the consolidation roller to accomplished complete polymer diffusion in the bonded region. Hence investigation is performed to find out the optimize manufacturing parameters by extensive material, process, product testing and through process simulation.

Temperature distribution and convective heat transfer under the hot gas torch is experimentally mapped out. Bonding process inside the laminate is the combine effect of layers (tapes) intimate contact  $D_{ic}$  development and resulting polymer diffusion  $D_h$  at these contacted sections. Three energy levels are identified based on the process velocity and hot gas flow combinations. For the low energy parameter combinations, the energy input to the incoming tape and substrate material is limited and result in incomplete intimate contact which restricts the bonding process. On other hand high energy input although could increase the bonding degree  $D_b$  even up to the 97%, but also activate the thermal degradation phenomena. It is found out that the rate of polymer healing (diffusion) and polymer crosslinking follows the Arrhenius laws with the activation energies of 43 KJ/mol and 276 KJ/mol. The polymer crosslinking at high temperature exposure hinder the polymer diffusion process and reduces the strength development. So the parameters combination at intermediate energy level provides the opportunity of continuous interlaminar strength improvement through out the lay-up process.

Deformation of tape edges is identified as the dictating factor for the laminate's transverse strength. Tape placement with slight overlap reinforced the transverse joint by more 10 % as compared to pure matrix joint. Finally the simulation tool developed in this research work is used for identifying the existing limitation to achieve full consolidation. A parameter study shows that extended consolidation either by mean of additional pass or by increasing consolidation length widens the high strength (over 90%) bonding degree  $D_b$  contour. Thus high lay-up velocity (up to 7 m/min) is viable for industrial production rate.