

Diss. ETH No. 15302

Direct Stamp Forming of Non-Consolidated Carbon/Thermoplastic Fibre Commingled Yarns

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES ETH ZÜRICH

presented by

URS IVAN THOMANN

Dipl. Werkstoff-Ing. ETH

born February 11, 1974

citizen of Himmelried, SO (Switzerland)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Paolo Ermanni, examiner

Prof. Dr. Paul Smith, co-examiner

Zürich, 2003

Abstract

The direct stamp forming of previously unconsolidated discontinuous aligned carbon fibre reinforced thermoplastic composites made from commingled yarns is studied in this work, focusing on the influence of processing conditions and yarn architecture on laminate quality and deformation behaviour under thermoforming conditions. Tool design and processing methodology to obtain sample laminates with unidirectional fibre orientation directly from the yarn bobbins without employing any textile intermediate steps are presented. Mechanical properties such as flexural and tensile strength along and transverse to the fibre direction, respectively, and void content serve as quantitative criteria for the achieved laminate quality.

A number of different yarn architectures including two different polymers—poly(lauro lactam) and poly(butylene-terephthalate), different reinforcement fibre fractions, and fibre length distributions are considered. Various heating strategies are reviewed and infra-red radiation heating as the mainly applied heat source throughout this work is closely examined by means of experimental investigations and theoretical considerations. Additionally, direct electrical resistance heating is presented as an interesting alternative heating strategy.

Due to the limited flow capacity of the viscous polymer melt it is important to provide either sufficiently long consolidation times or short flow distance, to obtain satisfactorily consolidated laminates. As the stamp forming process is, however, non-isothermal with the initial and final temperatures being defined by the preform temperature prior to moulding and the mould temperature, respectively, the former criterion can only be met with in a limited way by using thermally insulating tool materials. Experiments performed with a blank aluminium mould and the same mould lined with 4 mm thick sheets of poly(tetra-fluoro-

ethylene) show that the consolidation time can be significantly expanded if the mould is thermally insulated. The so extended consolidation time leads to laminates with lower void content and increased mechanical properties compared with the laminates stamp formed between blank metallic moulds. The remaining alternative to the somewhat difficult task of designing thermally insulated tools is to employ a commingled yarn with exceptionally high blending quality to provide the shortest possible flow distance for the polymer melt. Yarn and fibre parameters to influence the blending quality are discussed and conditions to achieve the best possible degree of commingling are formulated. Best laminate quality is achieved, if both insulated mould and yarns at high blending quality are employed. Consolidation pressure investigated in the range of 2 to 8 MPa is found to have got only minor influence on mechanical properties and void content.

An integrated heat transfer and consolidation model is developed to predict the laminate temperature as well as the degree of consolidation in coordinates of consolidation time and laminate thickness. The proposed model is different from the classical finite differences approach in that it takes variations of laminate density and thermal conductivity due to progressing degree of consolidation into account. Model predictions show good agreement with experiments performed with four ply laminates of commingled yarn woven fabrics directly consolidated between poly(ether-ether-ketone) plates. The here proposed thermal model can provide information about the required mould temperature to achieve the optimum degree of consolidation for various laminate thicknesses at a given mould material.

Finally, the axial deformation behaviour in the direction of the fibre axis at processing temperature is addressed. Experimental results of tensile tests of unconsolidated but molten specimens of different reinforcement fibre fractions and different reinforcement fibre length distributions measured at different temperature levels are presented. A flow curve model based on the anisotropic rheological properties of aligned fibre filled viscous fluids is developed. The suggested flow curve model agrees well with the measured flow curves at all investigated parameter levels. The additional deformation capacity provided by the here employed commingled yarns can improve the achievable geometry complexity of stamp formed parts. In that, the here presented flow curve model represents a first step towards full scale moulding simulation of multi-directional fabric plies of stretch–broken commingled yarns.

Zusammenfassung

Der Stempelumformprozess von unkonsolidierten Hybridgarnhalbzeugen aus Kohle- und Thermoplastfasern ist Gegenstand dieser Arbeit. Hierbei wird schwerpunktmässig der Einfluss von Prozessparametern und Garnarchitektur auf die Laminatqualität sowie auf das Umformverhalten solcher Halbzeuge untersucht. Eine Methode zur Herstellung von Laminaten mit unidirektionaler Faserorientierung wird vorgestellt. Das Garn wird dabei ohne weitere textile Zwischenschritte direkt mit dem Stempelumformprozess zu Laminaten konsolidiert, aus welchen anschliessend Proben zur Beurteilung der Laminatqualität entnommen werden. Die Beigefestigkeit entlang der Faserrichtung und die Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung, sowie der Restporengehalt werden als quantitative Kriterien zur Erfassung der erreichten Laminatqualität herangezogen.

Verschiedene Garnarchitekturen einschliesslich zweier verschiedener Polymerfasern — Polylaurolactam und Polybutylen-terephthalat, verschiedene Verstärkungsfasergehalte und –Faserlängenverteilungen werden betrachtet. Verschiedene Heizstrategien für die Erwärmung der Hybridgarnhalbzeuge auf Prozesstemperatur werden sowohl empirisch als auch analytisch untersucht. Die direkte Umwandlung von elektrischem Strom zu Wärme im leitfähige Fasern enthaltenden Halbzeug wird als zusätzliche Heizstrategie, die im Zusammenhang mit Varianten des Stempelumform- bzw. Thermoformprozessen kommerziell interessant sein könnte, vorgestellt.

Aufgrund der limitierten Fliessfähigkeit, die allen thermoplastischen Polymerschmelzen eigen ist, ist es wichtig entweder genügend Zeit für die Faserimpregnierung zur Verfügung zu stellen, oder aber den Fliessweg der Schmelze zu minimieren, um Lamine mit befriedigendem Konsolidierungsgrad zu erhalten. Da der Stempelumformprozess aber nichtisotherm ist, wobei die Anfangstemperatur durch Halbzeugtemperatur

nach der Aufheizung und die Endtemperatur durch die Werkzeugtemperatur gegeben ist, kann die Forderung nach genügend langer Konsolidierungszeit nur beschränkt durch Verwendung von thermisch isolierenden Werkzeugen erfüllt werden. Experimente durchgeführt einmal mit einem blanken Aluminiumwerkzeug und einmal mit demselben Werkzeug isoliert mit 4 mm dicken Platten aus Polytetrafluorethylen zeigen, dass die Konsolidierungszeit unter Verwendung thermisch isolierender Presswerkzeuge im Vergleich zu blanken Metallwerkzeugen signifikant verlängert werden kann. Alternativ zu der technisch nicht ganz einfach zu lösenden Aufgabe, thermisch isolierende Werkzeuge zu verwenden, kann der Fließweg der Schmelze dadurch verkürzt werden, dass man Hybridgarne mit ausserordentlich regelmässiger Durchmischung von Verstärkungs- und Polymerfasern verwendet. Parameter, die die Qualität der Fasermischung beeinflussen werden diskutiert und Randbedingungen, unter welchen eine gute Durchmischung erreicht werden kann, werden angegeben. Die höchste Laminatqualität kann erreicht werden, wenn sowohl thermisch isolierende Werkzeuge wie auch hervorragend durchmischte Hybridgarne verwendet werden. Innerhalb des hier untersuchten Bereichs von Konsolidierungsdrücken zwischen 2 und 8 MPa konnte nur ein unwesentlicher Einfluss des Prozessdruckes auf die mechanischen Eigenschaften und den Restporengehalt festgestellt werden.

Ein kombiniertes Wärmeübergangs- und Konsolidierungsmodell zur Voraussage der Laminattemperatur sowie des Konsolidierungsgrades als Funktion der Laminatdickencoordinate und der Prozesszeit wird präsentiert. Dieses Modell unterscheidet sich insofern von einem klassischen Ansatz der finiten Differenzen als es Variationen der Dichte und der thermischen Leitfähigkeit aufgrund der fortschreitenden Konsolidierung mitberücksichtigt. Die Modellvoraussagen stimmen gut mit experimentellen Daten überein. Dieses Modell kann nützliche Informationen bzgl. der Prozessparameter liefern, um bei einem gegebenen Werkzeugmaterial eine optimale Konsolidierung zu erhalten.

Schliesslich wird das Deformationsverhalten von Hybridgarnhalbzeugen in Richtung der Verstärkungsfaserachse bei Prozesstemperatur diskutiert. Experimentelle Resultate von Zugprüfungen von unkonsolidierten aber geschmolzenen Hybridgarnproben mit unidirektionaler Faserrichtung werden präsentiert. Basierend auf der anisotropen rheologischen Eigenschaften von viskosen fluiden gefüllt mit ausgerichteten Fasern wird ein Fließkurvenmodell entwickelt. Das vorgeschlagene Fließkurvenmodell zeigt gute Übereinstimmung mit experimentellen Daten auf allen

untersuchten Parameterniveaus. Die hier untersuchten diskontinuierlich faserverstärkten Hybridgarnhalbzeuge können durch Gleiten der Verstärkungsfasern auch entlang der Faserrichtung umgeformt werden. Diese zusätzliche Umformkapazität kann die erreichbare Geometriekomplexität stempelumgeformter Bauteile erhöhen. Das hier vorgeschlagene Fliesskurvenmodell repräsentiert daher den ersten Schritt in Richtung einer vollständigen Umformsimulation von multidirektionalen Faserschichten aus diskontinuierlich faserverstärkten Hybridgarnhalbzeugen.