

Kurzfassung

Die Luftfahrtindustrie und die meeresgestützte ölfördernde Industrie, die so genannte Off-Shore Industrie, streben die Einführung bzw. Weiterverbreitung von faserverstärkten Kunststoffen mit thermoplastischer Matrix an. Sowohl Leistungsverbesserung aber auch Kosten- und Gewichtsreduktion sind die Treiber für diese Entwicklung. Der sehr hohe Anspruch an die Qualität der Bauteile bedingt die Verfügbarkeit geeigneter Herstellungsverfahren. Beispiele hierfür sind das Tapelege- und das Wickelverfahren. Beide Prozesse sind allerdings bis heute nur in den Varianten für die Verarbeitung duroplastischer Matrices industriell umgesetzt und etabliert. Die Bauteilherstellung geschieht bei Anwendung von Duroplasten für Hochtemperatur- oder Primärstrukturanwendungen durch eine, dem formgebenden Prozess nachgeschaltete Aushärtung im Ofen oder Autoklav. Thermoplaste bieten jedoch die Möglichkeit zur Einsparung dieses Prozessschrittes durch die in-situ Konsolidierung, d.h. endkonturnahes, formgebendes Ablegen und Verschweißen in einem Schritt. Die Komplexität der Thermoplastprozesse ist jedoch durch die simultane Durchführung zweier Aufgaben erhöht. Deshalb besteht ein großer Bedarf, die theoretischen Hintergründe, das physikalische, thermodynamische und chemische Prozessverständnis stetig grundlegend zu erarbeiten bzw. zu verbessern. Die rein experimentelle Prozessentwicklung an Anlagen industriellen Maßstabs ist aus Kostengründen und dem Problem der mangelhaften Auflösung einzelner Prozessphänomene dafür ungeeignet. Daher wird seit vielen Jahren am Verständnis, der Abstraktion und der Simulation dieser Prozesse gearbeitet. Die dabei entstandenen theoretischen Modellierungen können allerdings nur selten einen Bezug zum realen Prozess nachweisen.

Die vorliegende Arbeit schließt deshalb die Lücke zwischen Simulation und experimenteller Prozessentwicklung. Auf Basis einer vielfach verwendeten mathematischen Beschreibung der thermodynamischen Verhältnisse im Prozess, einer Energiebilanzgleichung, die erstmals in diesem Zusammenhang um die Möglichkeit zur Berechnung von Strahlungsrandbedingungen erweitert wird, beschreibt die Arbeit die Entwicklung eines Prozesssimulationssystems. Das dazu neu entwickelte Finite-Elemente-Methode Programm ProSimFRT, das auf der nicht-linearen Diskretisierung der Energiebilanzgleichung basiert, bildet der Kern eines modularen Prozesssimula-

tionspaketes, welches die ganzheitliche parametrische Berechnung der Temperatur während des gesamten Prozesses und für alle Prozessteilnehmer erlaubt. Thermodynamische Teilaspekte der Verfahren und somit auf rein theoretischem Weg unzugängliche Prozessparameter, wie z.B. konvektive Randbedingungen oder durch eine Wasserstoff-Sauerstoffflamme erzeugte Wärmeströme können mit ProSimFRT semiempirisch ermittelt werden. Die hierfür angewandte Methodik der Simulationskalibrierung bedarf jedoch einer experimentellen Verifikationsmöglichkeit. Daher wird eine neu entwickelte Experimentalplattform vorgestellt. Ein spezieller Thermodynamikprüfstand erlaubt die Ermittlung der Prozessparameter und eine flexible Möglichkeit zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Simulation. Die Integration dieser Parameter zu einem ganzheitlichen Prozessmodell am Beispiel des Thermoplasttapelegens mit kohlenstofffaserverstärktem Polyetheretherketon und die ableitbaren Hinweise für die Prozessentwicklung bilden abschließend die Grundlage für die zukünftige Integration der Simulation in die Gesamtprozesskette.

Abstract

The aerospace industry and the off-shore oil industry are facing the introduction and evolution of fiber reinforced thermoplastics. Performance enhancements as well as cost and weight savings are the drivers behind this development. The high level of requirements concerning the quality of components leads to a need for applicable manufacturing technologies. Filament winding and tape placement are examples for such processes. Both have been successfully industrialized for thermoset materials. Thermoset components for high temperature or primary structure applications are typically manufactured in a multi-step approach. After a geometry determining step consolidation and curing are introduced as further processing steps towards the final component, often using ovens or autoclaves. Being weldable, thermoplastics give the possibility to integrate this multi-step thermoset processes. Hence the complexity of thermoplastic processing is increased, but the potential of saving manufacturing time is obvious. This leads to the need of theoretic background know how about the physical, thermodynamical and chemical phenomena behind the thermoplastic manufacturing technologies. Due to that, since many years worldwide efforts are carried out concerning the understanding, abstraction and simulation of this processes. But, the developed models hardly have a direct relation to real processes.

The present work overcomes the gap between simulation and experimental process development. Based on a widely used mathematical description of the thermodynamics within the processes, an energy balance equation, which is enhanced with radiative boundary conditions for the first time in this context, the present work describes the development of a process simulation tool. The newly developed finite-element program ProSimFRT, which is based on a non-linear discretization of the energy balance equation, serves as kernel of a modular process simulation environment. This package allows the parametric calculation of the temperature fields throughout the whole process and for all process participants. Thermodynamic aspects, hardly available by analytical theory as convective boundary conditions or heat fluxes generated by oxygen-hydrogen flames can be determined semi-empirically with ProSimFRT. The method used for that needs a possibility for experimental investigations. Hence, a thermodynamic test rig is introduced.

This test rig allows the determination of process parameters and delivers a flexible possibility for the validation and verification of the simulation. The integration of this parameters into an overall process model for the thermoplastic tape placement process using carbon fiber reinforced polyetheretherketone and derivable hints for the process development conclude the present work. They are a baseline for the future integration of the simulation into the manufacturing process.