

Kurzfassung

Das Induktionsschweißen ist ein Verfahren zum Fügen von thermoplastischen Faser/Kunststoff-Verbunden. Mittels eines elektromagnetischen Wechselfeldes wird die zum Schweißen notwendige Energie berührungslos und schnell in die zu verbindenden Bauteile eingebracht. Bei Vorliegen einer geeigneten Verstärkungsstruktur erfolgt die Wärmeerzeugung direkt im Laminat. Dabei ist das Temperaturfeld durch eine vollständige Erwärmung in Dickenrichtung im Bereich unterhalb der Induktionsspule gekennzeichnet. Die resultierende Temperatur wird durch den Abstand zum Induktor beeinflusst, wobei die Temperatur mit steigendem Abstand abnimmt. Daraus folgt, dass in der dem Induktor zugewandten Seite die höchsten und auf der gegenüberliegenden Seite des Laminates die niedrigsten Temperaturen auftreten.

Das beschriebene Temperaturfeld erschwert den Schweißprozess erheblich. Aufgrund der Durchwärmung muss das Laminat zur Vermeidung von Delaminationen mit Druck beaufschlagt werden, was den Einsatz von komplexen und teuren Schweißvorrichtungen nötig macht. Zudem kann die Temperaturdifferenz zwischen Induktorseite und gegenüberliegender Seite größer als das durch die Eigenschaften des Matrixpolymers vorgegebene Prozessfenster sein.

Der Induktionsschweißprozess wird durch eine Vielzahl von Parametern bestimmt. Aufgrund der Komplexität erfolgt die Prozessentwicklung im Wesentlichen auf Basis experimenteller Studien. Untersuchungen zu Parametereinflüssen und Wechselwirkungen sind somit aufwändig und die Messung von qualitätsrelevanten Parametern, insbesondere in der Fügezone, ist schwierig. Die Prozesssimulation kann dazu beitragen, den Aufwand von Parameterstudien zu verringern und den Induktionsschweißprozess weiter zu analysieren.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Verfahrensvariante des Induktionsschweißens ohne vollständige Durchwärmung des Laminats in Dickenrichtung. Für einen optimalen Schweißprozess muss die Fügezone auf Schweißtemperatur erwärmt werden, während die übrigen Bereiche zur Vermeidung von Delaminationen die Schmelztemperatur des Matrixpolymers nicht überschreiten sollten.

Zur Beeinflussung der Temperaturverteilung wurde eine lokale Kühlung an der dem Induktor zugewandten Seite mittels Druckluftprallströmung realisiert. Zur Beurteilung der Wirkungsweise wurden statische Aufheizversuche an kohlenstoffaserverstärkten

Polyetheretherketon- (CF/PEEK) und Polyphenylsulfid-Laminaten (CF/PPS) durchgeführt.

Durch den Einsatz der lokalen Kühlung konnte die Temperaturverteilung in Dickenrichtung des Laminats an die Erfordernisse des Schweißprozesses angepasst werden. Das Temperaturmaximum wurde von der Induktorseite auf die gegenüberliegende Seite verlagert. Dies ermöglicht die Erwärmung auf Schweißtemperatur in der Fügezone und verhindert gleichzeitig das Aufschmelzen und die damit verbundenen Effekte in den außenliegenden Bereichen.

Die induktive Erwärmung sowie die Verfahrensvariante mit lokaler Kühlung wurden in dreidimensionalen Prozessmodellen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode abgebildet. Hierfür wurden mit der Software Comsol Multiphysics 4.1 vollständig gekoppelte elektromagnetische-thermische Modelle entwickelt und experimentell validiert. In einer Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss von verschiedenen Prozessparametern auf die induktive Erwärmung analysiert. Dabei wurden der Spulenstrom, die Feldfrequenz sowie die Wärmekapazität als signifikante Parameter identifiziert. Die Kühlwirkung der Prallströmung wurde dabei mittels angepasster Konvektionskoeffizienten realisiert.

Zur Übertragung der entwickelten Prozessvariante der induktiven Erwärmung auf den kontinuierlichen Induktionsschweißprozess wurde ein entsprechendes Prozessmodell erstellt. Dieses bildet die Erwärmung einer einfach überlappten Schweißnaht bei kontinuierlichem Vorschub ab. Mit Hilfe der Prozesssimulation wurde ein zum Verschweißen von CF/PEEK geeigneter Parametersatz ermittelt und zur Herstellung von Schweißproben verwendet. Dabei konnte das zum Schweißen optimale Temperaturprofil eingestellt und ein Aufschmelzen der Außenschicht verhindert werden.

Abstract

Induction welding is a technique for joining of thermoplastic composites. An alternating electromagnetic field is used for contact-free and fast heating of the parts to be welded. In case of a suitable reinforcement structure heat generation occurs directly in the laminate with complete heating in thickness direction in the vicinity of the coil. The resulting temperature field is influenced by the distance to the induction coil with decreasing temperature for increasing distance. Consequently, the surface facing the inductor yields the highest, the opposite surface the lowest temperature.

The temperature field described significantly complicates the welding process. Due to complete heating the laminate has to be loaded with pressure in order to prevent delamination, which requires the usage of complex and expensive welding tools. Additionally, the temperature difference between the inductor and the opposite side may be greater than the processing window, which is determined by the properties of the matrix polymer.

The induction welding process is influenced by numerous parameters. Due to complexity process development is mainly based on experimental studies. The investigation of parameter influences and interactions is cumbersome and the measurement of quality relevant parameters, especially in the bondline, is difficult. Process simulation can reduce the effort of parameter studies and contribute to further analysis of the induction welding process.

The objective of this work is the development of a process variant of induction welding preventing complete heating of the laminate in thickness direction. For optimal welding the bondline has to reach the welding temperature whereas the other domains should remain below the melting temperature of the matrix polymer.

For control of the temperature distribution localized cooling by an impinging jet of compressed air was implemented. The effect was assessed by static heating experiments with carbon fiber reinforced polyetheretherketone (CF/PEEK) and polyphenylenesulfide (CF/PPS).

The application of localized cooling could influence the temperature distribution in thickness direction of the laminate, according to the specifications of the welding process. The temperature maximum was shifted from the inductor to the opposite

side. This enables heating of the laminate to welding temperature in the bondline and concurrently preventing melting and effects connected to this on the outer surface.

Inductive heating and the process variant with localized cooling were implemented in three-dimensional finite-element process models. For that purpose, the finite-element-software Comsol Multiphysics 4.1 was used for the development of fully coupled electromagnetic-thermal models which have been validated experimentally. A sensitivity analysis for determination of different processing parameters of inductive heating was conducted. The coil current, field frequency, and heat capacity were identified as significant parameters. The cooling effect of the impinging jets was estimated by appropriate convection coefficients.

For transfer of the developed process variant to the continuous induction welding process, a process model was created. It represents a single overlap joint with continuous feed. With the help of process modeling a parameter set for welding of CF/PEEK was determined and used for joining of specimens. In doing so, the desired temperature field was achieved and melting of the outer layers could be prevented.