

## Kurzfassung

Das Fügen von Faserverbunden und Metallen durch Induktionsschweißen ist ein neuartiges Verfahren, das im Rahmen einer DFG-Forschergruppe entwickelt wurde. In dieser Arbeit werden auf solche Weise hergestellte Fügungen zwischen einer Aluminiumlegierung (AlMg3) und CFK (kohlenstofffaserverstärktes Polyamid) experimentell und simulativ untersucht. Detaillierte Kenntnisse über das mechanische Verhalten und den Einfluss der Prüfgeschwindigkeit und der Temperatur darauf sind für einen späteren Einsatz der Fügetechnik bei der Verbindung von Bauteilen wichtig. Die begleitend durchgeführten Simulationen auf Basis der Finiten Elemente (FE) ermöglichen einen Blick in das Innere der Fügezone und stellen nach der Validierung mit Hilfe der Experimente eine Erweiterung der Messtechnik dar. Besondere Anforderungen an die Messtechnik entstehen bei diesen Untersuchungen aus den geringen Abmessungen des Fügebereiches. Ergänzend durchgeführte makroskopische und mikroskopische (Rasterelektronenmikroskop) Bruchflächenanalysen untermauern die Schlüsse und Erläuterungen aus den experimentellen und simulativen Untersuchungen.

Abgeleitet von kritischen Lastfällen wird das mechanische Verhalten an Grundlagenexperimenten in Quer-Druck- und Schubversuchen untersucht und simuliert. Für die globale und lokale Verschiebungsanalyse, die eine detaillierte Versuchsauswertung und einen Abgleich mit den Simulationen ermöglicht, wird das Grauwertkorrelationsverfahren eingesetzt. Die wichtigsten experimentellen Ergebnisse sind:

Bei den Quer-Druck-Versuchen kommt es zu einer normalspannungsdominierten Schälbelastung in der Fügezone mit einem konstant wachsenden Riss. Die Temperaturvariationen im Bereich von  $-30\text{ °C}$  und  $80\text{ °C}$  haben fast keinen Einfluss auf das mechanische Verhalten. Die Prüfgeschwindigkeitsvariationen im Bereich von  $0,03\text{ mm/s}$  bis  $1500\text{ mm/s}$  zeigen bei steigenden Prüfgeschwindigkeiten einen deutlichen Anstieg der maximalen Kräfte und Verschiebungen. In den Versuchen ist ein adhäsiver Versagensmode zu beobachten. Eine Ausnahme bilden die Versuche bei höheren Prüfgeschwindigkeiten, bei denen ein grenzschichtnahes Versagen in der Fügezone auftritt.

In den Schubversuchen kommt es zu einem stärker mehrachsialen Spannungszustand in der Fügezone, der von Schub- und Normalzugspannungen dominiert wird.

Die erreichten Kräfte liegen deutlich über denen der Quer-Druck-Versuche. Dieses Kraftniveau ist kaum beeinflusst von den Temperaturvariationen zwischen  $-30\text{ °C}$  und  $80\text{ °C}$ . Die Prüfgeschwindigkeitssteigerungen bis zu  $1500\text{ mm/s}$  haben einen signifikanten Einfluss auf die Kräfte und besonders auf die maximalen Verformungen. Die Bruchflächen sind in den meisten Versuchen adhäsiv dominiert. Bei Temperaturen von  $-30\text{ °C}$  und Prüfgeschwindigkeiten von  $500\text{ mm/s}$  und  $1500\text{ mm/s}$  bilden sich hingegen Bereiche mit grenzschichtnahe Versagen und köhasiven Anteilen. Die REM-Untersuchungen der Bruchbilder zeigen, dass mechanisches Interlocking einen maßgeblichen Beitrag zur Haftung zwischen Polyamid und Aluminium leistet.

Die Simulationen wurden mit Hilfe der globalen und lokalen Verschiebungszustände in den Grundlagen- und zusätzlich durchgeführten Versuchen validiert und zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Experimenten. Die Spannungszustände im Inneren der Fügezone sind wegen der unterschiedlichen Fügeworkstoffe und Steifigkeiten unsymmetrisch und stark inhomogen. Es bilden sich in allen simulierten Versuchen am Rand Spannungsspitzen, die zum Versagen führen, während in der Fügezonemitte ein niedriges Spannungsniveau vorherrscht. Mit wachsendem Riss steigen die Spannungen im Inneren der Restfügezone in geringem Maße, bis es zur vollständigen Trennung des AlMg<sub>3</sub>- und des CFK-Fügeteils kommt. Eine Parameterstudie mit dem validierten Simulationsmodell der Schweißung zeigt, wie eine erhöhte Dicke des AlMg<sub>3</sub>-Fügeteils oder ein Anstieg der CFK-Steifigkeit zu einer günstigeren Spannungsverteilung in der Fügezone und so zu höheren Versagenskräften führt.

Die in dieser Arbeit erzielten experimentellen und simulativen Ergebnisse tragen zum Verständnis der Vorgänge bei mechanisch belasteten induktionsgeschweißten Fügungen zwischen Faserverbunden und Metallen bei. Der eingeschlagene Weg und die zum Einsatz gebrachten Methoden sind auch auf andere Verbindungen übertragbar. Das aufgebaute und validierte Simulationsmodell kann dabei für weiterführende Parametervariationen oder zur mikromechanischen Analyse der Schweißungen eingesetzt werden.

## Abstract

Joining of fiber reinforced plastics (FRP) and metal by induction welding process is a new technique developed in a research group founded by the German Research Foundation (DFG). Induction welded joints of carbon fiber reinforced polyamid (CFRP) and aluminum were determined by experiment and simulation within this thesis. Detailed knowledge of the mechanical behaviour and the influence of testing speed and temperature are essential for the future use of induction welding in components. Validated simulation using finite elements (FE) gains insight to the interior of the welding zone. This leads to an extrapolation of the measuring technique. Due to small geometric length of the specimens special requirements to the displacement measurement were needed. In addition, the macroscopic and microscopic (SEM) analysis of the destroyed specimens' surfaces confirmed the conclusions and explanations based on the experiment and simulation studies.

Deviated from the most critical load cases the mechanical behaviour is investigated in normal pressure and shear tests by a basic test program. The grey scale correlation method is used for the analysis of global and local deformation state and enables a detailed analysis and a good comparison to the simulated deformations. The most important experimental results are:

Transverse compression tests led to a stress state dominated by peel stresses resulting in a constantly increasing crack. Variation of temperature from 30 °C to 80 °C has nearly no influence on the mechanical behaviour. Variation of testing speed from 0.03 mm/s to 1500 mm/s shows a strong increase in maximal forces and deformations with increasing testing speeds. Mainly adhesive failure occurs in the tests with the exception of the experiments at higher testing speeds. In this case a near substrate failure mode within the welding zone can be observed.

The stress state of the shear tests can be described as rather multi axial within the joint zone, dominated by shear and tension stresses. The maximum forces are significant higher than in transvers compression tests. This force level is not influenced by temperature variation between -30°C and 80°C. However, higher testing speeds up to 1500 mm/s have a large influence on the failure loads and especially on the maximal deformations. In most tests failure surfaces are dominated by adhesive failure. In contrast, at a temperature of -30 °C and high testing speeds area of near

substrate failure and cohesive failure can be observed. SEM analyses of fracture surfaces prove that mechanical interlocking effects have a significant contribution to bonding between polyamide and aluminum.

Simulation models could be validated using the basic test program and additional tests by comparing the global and local deformation states. They are in agreement with the experiments. Joints of different materials and stiffnesses result in an asymmetric and highly inhomogeneous stress state within the welding zone. In all simulations high stress peaks can be observed in the outer sections of the welding zone. In contrast, in the middle of the welding zone a low stress level can be seen. The growing crack leads to a small increase of the stresses in the remaining welding zone and finally to the total separation of the aluminum and CFRP part. A parameter study based on the validated simulation indicates that a thicker aluminum part or an increase in the stiffness of CFRP leads to a better stress distribution within the welding zone and to higher failure loads.

The experimental and simulation results contribute to the understanding of the mechanism of mechanically loaded joints of CFRP and metals manufactured by induction welding. The analysis method can be transferred to other joint forms. The established and validated simulation model can be used for further parameter variations or micromechanical analysis of welded joints.