

Multi-material components can play an essential role in addressing the issue of weight reduction without a drastic increase in vehicle prices. Especially the combination of steel and aluminum is vital for modern lightweight design concepts. The continually growing need for steel-aluminum hybrid structures requires the development of new, more efficient joining methods. It triggered the intense research on the laser welding of steel to aluminum.

The current dissertation aims to develop an efficient finite element (FE) model for the structural simulation of dissimilar St-Al overlap joints. In particular, a prediction of residual stresses and distortions after welding is of interest. In the thesis, the known computational methods were analyzed and expanded regarding their application for the deep laser welding of dissimilar St-Al joints in steel-on-aluminum overlap configuration. The influence of the mixing in the weld pool on the mechanical properties of the St-Al weld metal and the subsequent influence of the weld on the structural behavior of the joints are the central questions of the study.

The developed temperature FE model enables accurate computation of the temperature distribution in the overlap joint as well as a calculation of fractions of melted alloys in the St-Al weld. Special attention was paid to the development of the hybrid heat source model and the formulation of the irreversible thermal contact in the overlap area.

The steel and aluminium alloy were extensively characterized by physical simulations. Typical laser welding temperature cycles with various maximum temperatures were applied to large-volume flat samples, which were then subjected to mechanical testing. It was found that both alloys exhibit a significant decrease in yield strength (softening) after heating. The developed material models use the direct correlation between the maximum temperatures and thermomechanical properties.

The presented experimental investigation provides the first insight into the elastic-plastic behavior of St-Al weld metal. The mechanical properties were determined using the indentation technique and then correlated to aluminum concentration. Hardness and yield strength showed a nonlinear increase with an increasing aluminum concentration. Young's modulus and strain hardening exponent were found to be nearly insensitive to changes in weld chemical composition. Based on the obtained relations, the weld material model was designed and coupled with the FE thermomechanical model.

The structural simulations of the St-Al overlap joints were validated on welding experiments through the comparison of measured and computed distortions. Good agreement was affirmed. The performed sensitivity analyses indicated that the application of the developed weld material model is crucial for achieving reliable accuracy of structural simulations for St-Al joints.

Die Reduktion des Fahrzeuggewichts spielt eine entscheidende Rolle, um den Herausforderungen eines schonenden Umgangs mit Energie und Ressourcen gerecht zu werden. Die Gewichtsreduzierung lässt sich durch den zielgerichteten Einsatz von Leichtbauwerkstoffen in gefügten Hybridstrukturen aus unterschiedlichen Werkstoffkombinationen realisieren. Für moderne Leichtbaukonzepte sind Kombinationen aus Stahl und Aluminium von besonderer Bedeutung. Der stetig wachsende Bedarf an diesen Hybridstrukturen erfordert die Entwicklung neuer, effizienterer Verbindungsmethoden. Dies löste die intensive Forschung zum Laserstrahlschweißen von Stahl-Aluminium Mischverbindungen aus.

Diese Dissertation zielt darauf ab, ein effizientes Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) für die strukturelle Simulation der St-Al Überlappverbindungen zu entwickeln. Insbesondere ist eine Vorhersage von Eigenspannungen und Verzüge nach dem Schweißen von Interesse. In der Arbeit wurden die bekannten Berechnungsmethoden hinsichtlich ihrer Anwendung für das Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen in Stahl-auf-Aluminium Überlappkonfiguration analysiert und erweitert. Der Einfluss der Vermischung im Schweißbad auf die mechanischen Eigenschaften des St-Al Schweißgutes und der anschließende Einfluss des Schweißgutes auf das strukturelle Verhalten der Verbindungen sind die zentralen Fragen dieser Arbeit.

Das entwickelte FE-Modell ermöglicht eine Berechnung der Temperaturverteilung in der St-Al Überlappverbindung sowie der Vermischungen in dem Schweißgut. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf die Entwicklung des Hybridwärmequellenmodells und die Formulierung des thermischen Kontakts im Überlappungsbereich gelegt.

Der Stahl und die Aluminiumlegierung wurden durch physikalische Simulationen umfassend charakterisiert. Typische für das Laserstrahlschweißen Temperaturzyklen mit verschiedenen Maximaltemperaturen wurden auf großvolumige flache Proben angewendet, die dann mechanischen Tests unterzogen wurden. Dabei wurde herausgefunden, dass beide Legierungen nach der Erwärmung eine signifikante Abnahme der Streckgrenze (Erweichung) aufweisen. Die entwickelten Werkstoffmodelle nutzen die direkte Korrelation zwischen den Maximaltemperaturen und den thermomechanischen Eigenschaften.

Die durchgeführte experimentelle Untersuchung liefert den ersten Einblick in das elastisch-plastische Verhalten von St-Al Schweißgut. Die mechanischen Eigenschaften wurden durch Nanoindentierung bestimmt und anschließend mit der Aluminiumkonzentration korreliert. Härte und Streckgrenze haben einen nichtlinearen Anstieg mit zunehmender Aluminiumkonzentration gezeigt. Der Elastizitätsmodul und der Verfestigungsexponent erwiesen sich als nahezu unempfindlich gegenüber Änderungen der chemischen Zusammensetzung des Schweißgutes. Basierend auf den erhaltenen Beziehungen wurde das Schweißgutmodell entworfen und mit dem thermomechanischen FE-Modell gekoppelt.

Die Struktursimulationen von St-Al Überlappverbindungen wurden durch den Vergleich von gemessenen und berechneten Verzügen validiert. Gute Übereinstimmung wurde bestätigt. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass die Anwendung des entwickelten Schweißgutmodells entscheidend ist, um eine zuverlässige Genauigkeit zu erreichen.