

**Thermomechanische Finite Elemente Analyse von  
Mehrlagenschweißungen unter Berücksichtigung  
der lokalen Gefügeumwandlungen**

**Thermomechanical Finite Element Analysis of Multi-  
Pass Weldments Considering the Local  
Microstructure Transformations**

Gancho Genchev

## Zusammenfassung

Komplexe Konstruktionen werden oft mit mehrlagigen oder sich kreuzenden Schweißnähten gefügt. Die mehrfache Temperatureinwirkung beeinflusst lokale Bereiche der Schweißnaht und führt zu neuen Gefügeumwandlungen. Dies bewirkt eine Veränderung der thermomechanischen Eigenschaften des Gefüges und beeinflusst die Entstehung und Verteilung der Schweißspannungen.

Die vorliegende Doktorarbeit befasst sich mit der Bereitstellung der Grundlagen für numerische Untersuchungen von mehrlagigen Lichtbogenschweißungen aus dem Baustahl S355J2+N. Den Schwerpunkt der Analysen bildet die Berücksichtigung der Gefügeumwandlungen und die daraus resultierenden Gefügeeigenschaften und Eigenspannungszustände aufgrund der mehrfachen Temperatureinwirkung. Für die Simulation wird ein neues Modell entwickelt, validiert und angewendet. Dieses erweiterte Mehrmalig-Spitzentemperatur Austenitisierungs- und Abkühlzeit (M-STAAZ) Modell beschreibt die resultierenden Gefügeeigenschaften als eine Funktion des Ausgangsgefüges sowie der vorliegenden Maximaltemperatur und der Abkühlzeit.

Die Bewertung des Einflusses der mehrfachen Erwärmung auf die Gefügeumwandlungen und auf die mechanischen Eigenschaften erfolgt durch systematische physikalische Simulationen des Schweißgefüges mit einer Gleeble®. Die ermittelten Zusammenhänge und gefügeabhängigen thermomechanischen Werkstoffkennwerte dienen der Kalibrierung des M-STAAZ Modells.

Die begleitenden experimentellen Untersuchungen an den Mehrlagenschweißungen liefern umfassende Messdaten für die Validierung der numerischen Simulationen. Aus den Messungen liegen Daten über Temperatur-Zeit-Verläufe, Härteverteilung und Schweißspannungen vor.

Mit dem entwickelten Modell lassen sich lokale Gefügeumwandlungen und -eigenschaften wie Härte und Dehngrenze in Abhängigkeit der lokal vorliegenden Temperaturzyklen vorhersagen. Der grundsätzliche Vorteil des M-STAAZ Modells zeigt sich in der Eigenspannungssimulation. Die Berücksichtigung der lokalen Gefügeeigenschaften führt zur signifikanten Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit. Als Haupteinfluss-faktor für die Eigenspannungsbildung erweist sich die Änderung der Dehngrenze durch neue Austenitisierung und Anlasseffekte der nachfolgenden Schweißlagen.

Für die Validierung der entwickelten Simulationsvorgehensweise und Bewertung der Ergebnisgenauigkeit werden die gemessenen Eigenspannungen herangezogen.

## Abstract

Complex welded structures consist of overlapping or multi-pass welds. As a result of the repeated heat treatment, the local areas of the Heat Affected Zone (HAZ) are subjected to cumulative thermo-mechanical influences. This affects in a complex way the local thermo-mechanical properties and thus the residual stresses formation.

This work draws attention to the development of a methodology for the numerical investigation of multi-pass arc welded S355J2+N steel joints. The study focuses on the microstructure transformations and the resulting residual stresses due to the multiple temperature effects. For the simulations, a new approach is developed, validated and applied. The multiple peak temperature austenitisation cooling time (abbreviated from German as M-STAAZ) model considers the change of the local material properties due to multiple reheating as a function of the initial microstructure, maximum temperature and cooling time.

To investigate the influence of multiple thermal treatment on the thermo-mechanical properties, the microstructure in the HAZ is reproduced by means of Gleeble® simulation. The determined material data and correlations for different microstructures are stored in a database and used for the calibration of the M-STAAZ model.

With the developed model another numerical study is done and calculations of the hardness distribution in the multi pass weldments are performed. The accuracy of the simulation results is estimated by comparison with hardness measurements in the cross section of the weldments.

Using the developed model, local microstructure transformations and properties such as hardness and yield strength can be predicted depending on the local temperature cycles. The results explain the influence of the welding thermal history on the resulting local thermo-mechanical properties in the heat-affected zone and, thus, on the residual stress distribution.

Taking into consideration the local microstructure properties in the welding simulation leads to a significant increase in the accuracy of the numerical results. The fundamental advantage of the M-STAAZ model is detected in the simulation of residual welding stresses. A major influence factor on the residual stress formation is the change in the interpass microstructure yield strength due to reaustenitisation and tempering effects.

An experimental stress study is carried out using a neutron diffraction method. The measured data are used for validation of the simulation results.