

## **Bewertung der Heißrissanfälligkeit von Nickelbasis-Superlegierungen mit einem hohen Anteil an Ausscheidungsphasen beim Elektronenstrahlschweißen**

### Zusammenfassung

Das Schweißen von ausscheidungshärtbaren Nickelbasislegierungen ist, aufgrund ihrer Neigung zur Heißrissigkeit, äußerst anspruchsvoll. Speziell für Verbindungen, bei denen kein Zusatzwerkstoff verwendet werden soll, sind hier komplexe Überwachungssysteme für den Wärmeeintrag nötig, die aber Heißrisse nicht immer verhindern. Das Elektronenstrahlschweißen im Vakuum kombiniert einen steuerbaren und minimal notwendigen Wärmeeintrag mit einer konstruktiv vorteilhaften Schweißnahtform und ohne Notwendigkeit eines Schutzgases. Untersuchungen bei unterschiedlichen Schweißgeschwindigkeiten ergaben Hinweise für eine signifikante Reduzierung von Heißrissen durch Erhöhung der Streckenenergie. Dies widerspricht der gängigen Meinung, dass ein sehr schnelles und hochenergetisches Strahlschweißen für Nickelbasis-Superlegierungen vorteilhaft ist.

Die vorliegende Arbeit ist der Aufklärung und quantitativen Erfassung der Heißrissneigung gewidmet. Sie basiert auf der Kombination experimenteller und numerischer Methoden zur Bewertung der Heißrissigkeit und zeigt prozesstechnische und konstruktive Einschränkungen für das Elektronenstrahlschweißen am Stumpfstoß von konventionell vergossenem Alloy247LCcc ohne Zusatzwerkstoff. Dabei wurde die Schweißgeschwindigkeit variiert, um das Temperaturfeld und die entstehenden Dehnungen im Zusammenhang mit den erzeugten Schmelzbadformen und dem Auftreten von Heißrissen zu korrelieren. Es wurde ein numerisches Modell für eine Temperaturfeldsimulation mit prozess-adaptierter Wärmequelle entwickelt, welche sowohl für quasi-stationäre als auch für transiente Berechnung umsetzbar ist. Die Wärmequelle leitet sich zum Einen aus der entstehenden Schmelzbadform in Schweißnahtlängsrichtung, die mittels Hochgeschwindigkeits-Filmaufnahmen sichtbar gemacht wurde und zum Anderen aus der Bewertung von Querschliffen und Temperaturfeldern bei unterschiedlichen Schweißgeschwindigkeiten her. Für die Kalibrierung der Wärmequelle wurde eine Methodik entwickelt, die analytische, numerische und statistische Berechnungsschritte beinhaltet. Zugleich ist eine Methode konzipiert, die das quasistationäre numerische Modell analytisch koppelt und mittels statistischer Analyse eingrenzt.

Systematische thermomechanische Simulationen begründeten eine notwendige konstruktive Adaption des Houldcroft-Heißrissversuches zur Ermittlung kritischer Dehnungen, deren Eingrenzung die Basis für das Kriterium zur Heißrissigkeit bildet. Die benötigten Werkstoffkennwerte für den Hochtemperaturbereich wurden simuliert und mittels Sensitivitätsanalyse beurteilt. Für die Bewertung der Heißrissneigung wurden Ergebnisse der Temperaturfeldsimulationen und der thermomechanischen FE-Analysen verwendet. Im Temperaturfeld bestimmen die entstehenden Gradienten die Richtung des sekundären Dendritenwachstums und begrenzen die maximale Temperaturänderungsgeschwindigkeit aus dem statistischen Vergleich des Auftretens von Heißrissen. Die thermomechanischen Simulationen zeigten den signifikanten Einfluss der Dehnungen in Strahlrichtung auf die Heißrissneigung. Diese Dehnungen entstanden während der Abkühlung im validierten Sprödigkeitsintervall und ergründen die Grenzbedingungen für den Start eines Heißrisses aus der Kombination von kritischen Mindestwerten und der temperaturbezogenen Verformungsgeschwindigkeit.

Warmzugversuche dokumentieren eine Verschiebung des Duktilitätsabfalls für Temperaturraten beim Elektronenstrahlschweißen im Hochtemperaturbereich. Das Fließverhalten des Werkstoffs wurde entsprechend im Hochtemperaturbereich variiert und mittels Sensitivitätsrechnungen als unkritisch bewertet.

Die Validierung der thermomechanischen Simulationen erfolgte an einer instrumentierten und modifizierten Houldcroft-Probe. Sowohl die vorausgerechneten Verschiebungen als auch die vorhergesagten Heißrissneigungen stimmen für alle getesteten Schweißgeschwindigkeiten mit den Experimenten sehr gut überein. Anhand der Untersuchungen am Temperatur- und Verformungsfeld sind Heißrissbedingungen abgeleitet. Die Verwendbarkeit dieser heißrissfördernden Bedingungen für die Bemessung von Elektronenstrahlschweißungen wurde an Schweißungen verschiedener Wanddicken nachgewiesen.

## **Evaluation of hot cracking susceptibility of nickel-based superalloys with a high content of precipitated phases during electron beam welding**

### **Abstract**

Welding of precipitation-hardenable nickel-base alloys is extremely demanding due to their tendency to hot cracking. Especially for joints where no filler metal is to be used, complex monitoring systems for heat input are required here, but these do not always prevent hot cracking. Electron beam welding in a vacuum combines a controllable and minimally necessary heat input with a constructively advantageous weld shape and without the need for a shielding gas. Investigations at different welding speeds showed evidence for a significant reduction of hot cracks by increasing the line energy. This contradicts the conventional wisdom that very fast, high-energy beam welding is beneficial for nickel-base superalloys.

The present work is dedicated to the determination and quantitative assessment of the hot cracking tendency. It is based on the combination of experimental and numerical methods for the evaluation of hot cracking and shows process and design constraints for welding at the butt joint of conventionally cast Alloy247LCcc without filler using the electron beam. The welding speed was varied to correlate the temperature field and the resulting strains with the generated weld pool shapes and the occurrence of hot cracks. A numerical model was developed for a temperature field simulation with a process-adapted heat source, which can be converted between quasi-steady-state and transient calculations. The heat source was derived firstly from the resulting weld pool shape in the longitudinal direction of the weld visualized by high-speed recordings and secondly from the evaluation of cross-sections and temperature fields at different welding speeds. For the calibration of the heat source, a methodology has been developed that includes analytical, numerical, and statistical calculation steps. A method has been designed coupling analytically the quasi-stationary numerical model and constrained by statistical analysis.

Systematic thermomechanical simulations provided the reason for a necessary design adaptation of the Houldcroft hot cracking test to determine critical strains, the containment of which forms the basis for the hot cracking criterion. The required material parameters for the high-temperature range were simulated and evaluated by means of sensitivity analysis. The temperature field simulations and thermomechanical FE analysis were used to evaluate the hot crack tendency. In the temperature field, the resulting gradients determine the direction of secondary dendrite growth and limit the maximum rate of temperature change in the statistical comparison of hot crack occurrence. Thermomechanical simulations demonstrate a significant influence on the hot cracking tendency of strains in the beam direction. This strain formation during cooling in the validated brittleness interval establish limiting conditions as a combination of critical minimum values and the temperature-related deformation rate for the start of a hot crack. Thermomechanical test results demonstrate a shift of the ductility drop for temperature rates in electron beam welding within the high temperature range. The flow behavior of the material is modified accordingly and considered uncritical for sensitivity in the analysis. The validation of the thermomechanical simulations was performed on an instrumented and modified Houldcroft specimen. The calculated displacements and the predicted hot cracking tendency match very well with the experiments for all tested weld speeds. The usability of these hot cracking conditions for the design of electron beam welds has been demonstrated on different wall thicknesses.