

In-situ Analyse von Phasenumwandlungen und mechanischen Eigenschaften während charakteristischer Temperatur-Zeit-Verläufe aus Wärmeeinflusszonen in einer Aluminiumlegierung

Philipp Wiechmann

Zusammenfassung

Ausscheidungsgehärtete Aluminiumlegierungen sind häufig eingesetzte Leichtbauwerkstoffe in der Produktion von Straßen-, Schienenfahrzeugen sowie im Schiffs- und Flugzeugbau. Neben hohen erreichbaren Festigkeiten bei niedriger Dichte und guter Recyclingfähigkeit zeichnen sich diese Leichtbauwerkstoffe durch vielfältige und wirtschaftliche Verarbeitungsmöglichkeiten aus. Insbesondere Schmelzschweißverfahren wie das Metall-Inertgasschweißen (MIG) sind aufgrund der Wirtschaftlichkeit und Flexibilität verbreitete Fügeverfahren für Aluminiumlegierungen. Die dabei eingebrachte Schweißwärme führt zu starken Festigkeitsverlusten in der Wärmeeinflusszone (WEZ). Für eine Dimensionierung von geschweißten Strukturen aus AlMgSi-Legierungen sind vertiefte Kenntnisse zur Eigenschaftsentwicklung in der WEZ und den zugrundeliegenden werkstofflichen Mechanismen notwendig.

Das Auflösungs- und Ausscheidungsverhalten während der Erwärmung der Legierung EN AW-6082 T651 wurde mit der thermischen Analysemethode Differential Scanning Calorimetry (DSC) untersucht. Die verwendeten Kalorimeter ermöglichten es, die auftretenden Ausscheidungs- und Auflösungsreaktionen im Heizratenspektrum von $0,01 \text{ Ks}^{-1}$ bis 5 Ks^{-1} in-situ zu messen. Damit auch höhere Temperaturraten bis 100 Ks^{-1} , die für das Schweißen relevant sind, betrachtet werden können, wird die indirekte DSC-Methode angewandt. Dadurch konnten Temperaturbereiche der Auflösungsprozesse von relevanten festigkeitssteigernden Teilchen bei schneller Erwärmung ermittelt werden. Zudem konnte mit der indirekten DSC anhand von zwei linearen Erwärmungen sowie einem nichtlinearen Temperaturverlauf gezeigt werden, dass der Einfluss der Spitztemperatur für die Auflösungsprozesse entscheidend ist. In Bezug auf die temperaturabhängige WEZ werden in DSC-Abkühlexperimenten gezielt verschiedene Zustände zu Beginn der Abkühlung über die Glühparameter Temperatur und Dauer eingestellt. Für sechs verschiedenen Glühbedingungen wurden DSC-Abkühlkurven im Kühlratenspektrum von $0,01 \text{ Ks}^{-1}$ bis 5 Ks^{-1} erstellt und daraus Zeit-Temperatur-Ausscheidungsdiagramme entwickelt. Das gemessene Abkühlverhalten ist vor allem davon abhängig, ob zuvor eine vollständige oder unvollständige Auflösung der Legierungselemente stattgefunden hat. Bei unvollständiger Auflösung ermöglichen die vorhandenen Teilchen insbesondere Mg_2Si bei der Abkühlung den sofortigen Beginn von Ausscheidungsreaktionen. Bei vollständiger Auflösung ist zuvor eine Keimbildung erforderlich, was Reaktionen im Hochtemperaturbereich reduziert. Eine unvollständige Auflösung erhöht dadurch die Abschreckempfindlichkeit der Legierung. Es wurden für die unvollständige und die vollständige Auflösung zu Beginn der Abkühlung obere kritische Abkühlraten von 100 Ks^{-1} bzw. 30 Ks^{-1} ermittelt.

Mit der Methode der thermomechanischen Analyse (TMA) wird der Einfluss der Schweißwärme auf die mechanischen Eigenschaften der WEZ untersucht. Dazu

werden in Umformdilatometern Kurzzeit-Wärmebehandlungen durchgeführt, deren Parameter auf in der WEZ gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufen basieren. In dieser Versuchsreihe wurden der Einfluss der Temperatur, der zuvor erreichten Spitztemperatur sowie der Heiz- und Kühlraten untersucht. Die Prüfung der mechanischen Eigenschaften wird mit Hilfe von Stauchversuchen durchgeführt, welche im gleichen Gerät unmittelbar nach Erreichen der gewünschten Temperatur stattfinden. Mit Fließkurven und Dehngrenzen-Verläufen für eine Bandbreite von charakteristischen Schweißwärmebehandlungen wird die Eigenschaftsentwicklung in der WEZ umfassend dargestellt. Diese Ergebnisse lassen sich mit den mittels DSC gemessenen Auflösungs- und Ausscheidungsreaktionen erklären. Die Entfestigung in der WEZ ist vorwiegend von der erreichten Maximaltemperatur abhängig: für höhere Spitztemperaturen werden niedrigere Dehngrenzen während der Erwärmung und nach Abkühlung aufgenommen. Bei Betrachtung der Eigenschaften nach Kaltauslagerung gilt ein ähnlicher Zusammenhang; für zunehmende Spitztemperaturen steigt die Entfestigung bis zu einem Minimum der Dehngrenze und der Härte bei 425 °C bzw. 450 °C. Für höhere Spitztemperaturen tritt während der Auslagerung eine deutliche Verfestigung auf, da hier zuvor ein erneutes lokales Lösungsglühen erfolgt ist. Der mittels indirekter DSC bestimmte Auflösungs- und Ausscheidungsreaktionen bei 450 °C ist als Ursache des Härteminimums zu betrachten. Die Verläufe von Härte und Dehngrenze weisen eine hohe Übereinstimmung mit Härteprofilen realer Schweißverbindungen auf.

Ein mechanisches Materialmodell bestehend aus vier imaginären Phasen, welches auf experimentellen Daten von WEZ und Schweißgut beruht, wurde erstellt. Die Verifikation anhand von numerischen Zugversuchen zeigt, dass dieses Materialmodell die temperatur- und temperaturpfadabhängige Eigenschaftsentwicklung der WEZ dieser Legierung wiedergibt. Eine vereinfachte thermo-mechanisch gekoppelte Schweißsimulation liefert plausible Ergebnisse in Bezug auf die drei Teilbereiche von Schweißsimulationen in Form von imaginären Phasenverteilungen, Temperaturverläufen und Eigenspannungen sowie Verzug.