

## Abstract

Friction Stir Welding (FSW) is a proven technology that is primarily used to join aluminium alloys. This process was modified by applying a variable axial force along the tool rotation axis and patented as Impulse Friction Stir Welding (IFSW). The specific parameters of IFSW, impulse force and impulse frequency, define the thermal load and intensity of deformation, which affect the microstructural development. The present work establishes the evolution of the microstructure and mechanical performance of heat-treatable aluminium alloys, AA6082-T6 and AA2024-T351, during IFSW.

Two IFSW machines, which implement impulses in different modes, were qualified in this study. It has been established that the force control mode provides a higher reproducibility of the joints compared to the position control mode. The weld formation was found to be essentially unaffected by IFSW. IFSW exerted no influence on the grain structure in the thermo-mechanically affected zone (TMAZ) and heat affected zone (HAZ); however, it facilitated the recrystallisation process in the stir zone (SZ), generating a finer grain structure in relation to FSW. An increase in the impulse force and frequency enhanced this effect. The dispersoid phases remained stable in all weld zones regardless of the impulse parameters. The constituent phases were fragmented and re-distributed within the SZ more efficiently with IFSW compared to FSW.

The presented investigation systematically explores the development of  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si and S-Al<sub>2</sub>CuMg strengthening precipitates in IFSW of AA6082 and AA2024 alloys, respectively. In the case of AA6082 welded with the position control mode, IFSW had a pronounced effect on re-precipitation in the SZ. The precipitation evolution in the TMAZ and HAZ was not affected by IFSW. In the SZ and TMAZ of the AA2024-T351 impulse joints obtained with the force control mode, the same precipitation transformations occurred in FSW and IFSW performed at different impulse parameters. However, IFSW initiated the formation of strengthening precipitates in the HAZ.

Using Gleeble physical simulation, the effect of plastic deformation on precipitation in FSW and IFSW was determined. Severe alteration of the structure in the SZ due to deformation was found to control the precipitation characteristics in both alloys. It was shown that the effect of plastic deformation on the precipitation evolution in the TMAZ and HAZ of AA6082 can be neglected, but it should be considered in the case of AA2024.

Position control IFSW performed at a lower impulse force had no effect on the tensile properties of the joints, while a higher impulse force decreased the properties of the joint compared to FSW. IFSW implemented with the force control mode significantly increased the tensile characteristics and showed the potential to enhance the fatigue performance of the joints. The properties were correlated with metallurgical factors to establish an impulse parameters-structure-property model for IFSW.

## Zusammenfassung

Das Rührreißschweißen (*engl. FSW – Friction Stir Welding*) ist eine bewährte Technologie, die hauptsächlich zur Verbindung von Aluminiumlegierungen verwendet wird. Dieser Prozess wurde durch Anwendung einer variablen axialen Kraft entlang der Werkzeugrotationsachse erweitert und als Impuls-Rührreißschweißen (IFSW) patentiert. Die Parameter des IFSW-Prozesses, Impulskraft und Impulsfrequenz, bestimmen die Temperatur und die Verformung, die die Entwicklung der Mikrostruktur beeinflussen. Die vorliegende Arbeit untersucht die Entwicklung der Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften von aushärtbaren Aluminiumlegierungen, AA6082-T6 und AA2024-T351, während des IFSW.

In dieser Untersuchung wurden zwei IFSW-Maschinen qualifiziert, die Impulse in verschiedenen Modi umsetzen. Es wurde festgestellt, dass die kraftgeregelte Anlage eine höhere Reproduzierbarkeit im Vergleich zu der weggeregelte Anlage hat. Die Bildung der Schweißnaht ist im Wesentlichen nicht durch den IFSW-Prozess beeinflusst. Das IFSW hat keinen Einfluss auf das Korngefüge in der thermomechanisch beeinflussten Zone (TMEZ) und in der Wärmeeinflusszone (WEZ). In der Rührzone (RZ) beschleunigt das IFSW die Rekristallisation und hieraus eine feinere Kornstruktur im Vergleich zum FSW resultiert. Es wurde festgestellt, dass mit steigenden Impulsparametern dieser Effekt ausgeprägter ist. Die Dispersionphasen bleiben in allen Schweißzonen unabhängig von den Impulsparametern stabil. Die Primärphasen in der RZ sind bei IFSW im Vergleich zu FSW effizienter fragmentiert und verteilt.

Die vorliegende Untersuchung erforscht systematisch die Entwicklung von  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si-Ausscheidungen in der Legierung AA6082 sowie S-Al<sub>2</sub>CuMg-Ausscheidungen in der Legierung AA2024. Der weggeregelte IFSW-Schweißprozess hat einen deutlichen Einfluss auf die Ausscheidungsentwicklung in der RZ von AA6082, jedoch nicht in der TMEZ und WEZ. In der RZ und TMEZ von kraftgeregelt verschweißter AA2024-T351-Legierung treten während FSW und IFSW die gleichen Ausscheidungsumwandlungen auf. Der IFSW-Prozess begünstigt jedoch die Bildung von Ausscheidungen in der WEZ.

Die Bewertung des Einflusses der plastischen Verformung auf die Ausscheidungsentwicklung während FSW und IFSW erfolgt durch systematische physikalische Simulationen des Schweißgefüges mit einer Gleeble®. Die Ergebnisse zeigen, dass die plastische Verformung die Ausscheidungsumwandlungen in der RZ von beiden Legierungen stark beeinflusst. In der TMEZ und WEZ von AA6082 kann der Einfluss der plastischen Verformung vernachlässigt werden. Im Gegensatz dazu sollte die Wirkung der plastischen Verformung in der Legierung AA2024 berücksichtigt werden.

Das weggeregelte IFSW hat keine Auswirkung auf die Zugfestigkeit der Verbindungen bei geringerer Impulskraft, während eine höhere Impulskraft im Vergleich zum FSW die mechanischen Eigenschaften der Verbindung verringert. Das kraftgeregelte IFSW erhöht die Zugfestigkeit und zeigt das Potenzial zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit der Schweißverbindungen. Der Einfluss von metallurgischen Faktoren auf die statischen und dynamischen Eigenschaften der IFSW-Verbindungen werden in dieser Arbeit umfangreich diskutiert.