

Kurzfassung

Mit der zwingenden Sorge um leichte, energieeffiziente und umweltfreundliche Technik haben Magnesium (Mg)-Legierungen aufgrund ihrer verschiedenen Vorzüge viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Es gilt als wichtiges Material in der Luft- und Raumfahrt, im Sport, in Elektro- und Eisenbahnsystemen und vor allem in der Automobilindustrie, die 80 % des Mg-Verbrauchs ausmacht. Obwohl die Mg-Knetlegierung gute mechanische Eigenschaften aufweist, wird erwartet, dass fast 85–90 % Mg für Gussteile verwendet werden. Durch den Ersatz von Stahl, Aluminium (Al) durch Mg-Legierungen können große Gewichtseinsparungen und Kosteneinsparungen erzielt werden. Um seinen Einsatz zu erweitern, sollten geeignete Schweißverfahren untersucht werden.

Das Nachfüll-Reibrührpunktschweißen (Nachfüll-FSSW) ist eine neuartige Festkörperschweißtechnologie. Aufgrund der erheblichen Vorteile der stichlochfreien Schweißnaht, der verbesserten mechanischen Eigenschaften usw. wurde sie erfolgreich zum Schweißen von ähnlichen und unähnlichen Kombinationen auf Al-Basis verwendet. Studien zu Mg-Legierungen sind jedoch begrenzt.

In der vorliegenden Studie wurde zunächst die Machbarkeit des Nachfüllens von FSSW aus der Mg-Gusslegierung AM50 untersucht. Es wurden fehlerfreie Schweißnähte mit ebener Oberfläche erhalten. Die Schweißnaht wurde in vier mikrostrukturelle Bereiche eingeteilt, Grundmaterial/Wärmeeinflusszone (BM/HAZ), thermisch-mechanisch beeinflusste Zone (TMAZ), Übergangszone (TZ) und gerührte Zone (SZ). In TZ und SZ war eine einzigartige Mikrostruktur, die eine unregelmäßige Mischung aus Kleinwinkel-Korngrenzen (LAGBs) und Großwinkel-Korngrenzen (HAGBs) und die Entwicklung einer starken $\{0002\}$ -B-Faseridealen einfachen Schertextur zeigte identifiziert. "Stop-Action"-Experimente zeigten, dass die mikrostrukturelle Entwicklung und die Texturentwicklung sowohl in der Eintauch- als auch in der Einfahrphase hauptsächlich durch die Eintauchschulter gesteuert wurden, die die texturgesteuerte Mikrostruktur einführte, und die kontinuierliche dynamische Rekristallisation (CDRX) war der wichtigste DRX-Mechanismus. Aufgrund des Vorhandenseins einer starken Textur innerhalb der Schweißnaht wurden während des Tests der Überlappungsscherfestigkeit (LSS) einige Zonen mit unterschiedlichen Verformungsmodi gebildet, d. h. Zwillingszone, basale Gleitzone und die nicht basale Gleitzone. Als Ergebnis trat die plastische Deformationsinkompatibilität sowohl entlang der Grenze zwischen SZ und TMAZ als auch der Grenze zwischen Schulter- und Sondennachfüllbereichen auf. Schließlich versagten die meisten Schweißnähte im „SZ-Schermodus“ mit niedrigem LSS.

Obwohl einige Schweißnähte, die die Festigkeitsanforderungen erfüllten, durch Nachfüllen von FSSW erhalten werden konnten, wurde das Schweißen unter anspruchsvollen Bedingungen durchgeführt, was zu ernsthaftem Werkzeugverschleiß und Materialanhaftung oder sogar Werkzeugbruch führte. Die herkömmliche Nachfüll-FSSW stand vor erheblichen Herausforderungen bei der Herstellung hochwertiger Mg-Schweißnähte. Daher wurde ein modifiziertes Verfahren, differentielles Rotations-Nachfüll-FSSW (DR-Nachfüll-FSSW), entwickelt, um Mg-Legierungsschweißnähte mit hoher mechanischer Leistung zu erhalten. Beim DR-Nachfüll-FSSW drehten sich die Schulter und die Sonde mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in die gleiche oder umgekehrte Richtung. Die Ergebnisse zeigten, dass, wenn Schulter und Sonde in die entgegengesetzte Richtung rotieren und die Rotationsgeschwindigkeit der Sonde höher als die Schulter ist, Schweißnähte mit deutlich verbesserter

Festigkeit erhalten werden konnten. Die Bildung einer starken Textur im herkömmlichen Nachfüll-FSSW wurde vermieden, während sich stattdessen eine bimodale Mikrostruktur mit geschwächter Textur entwickelte. "Stop-Action"-Experimente zeigten, dass die mikrostrukturelle Entwicklung und Texturentwicklung sowohl in der Eintauch- als auch in der Rückzugsphase mit dem kombinierten Einfluss von Schulter und Sonde in Zusammenhang standen. Die Deformationsmechanismen im Tauchstadium könnten als CDRX, diskontinuierliches DRX (DDRX) und sekundäre Zwillinge zusammengefasst werden, während die Mechanismen im Rückzugsstadium Twinning Induced DRX (TDRX) und DDRX waren. Während LSS führte die in der SZ vorhandene bimodale Mikrostruktur mit geschwächter Textur zur Bildung von Mikroscherzonen, die Belastung durch Versetzungsschlupf und wiederholtes DRX effektiv aufnehmen könnte. Als Ergebnis wurden die plastischen Verformungsinkompatibilitäten in verschiedenen Bereichen beseitigt und Schweißnähte versagten im „SZ-Auszugsmodus“ mit hoher mechanischer Leistung.

DR-refill FSSW bietet eine neue und effektive Strategie zur Verbesserung der Leistung von Punktschweißungen auf der Grundlage von Mikrostrukturtechnik.

Abstract

With the compelling concern on lightweight, energy-efficient and environmentally-friendly engineering, magnesium (Mg) alloys have attracted much attention due to their various merits. It has been considered as an important material in aerospace, sport, electrical, railway systems and, most importantly, in automotive industry, which comprises 80% of Mg usage. Although the wrought Mg alloy shows high mechanical properties, nearly 85-90% Mg is expected to go towards casting parts. By replacing steel, aluminum (Al) with Mg alloys, great weight saving and cost saving can be achieved. In order to enlarge its usage, appropriate welding methods should be investigated.

Refill friction stir spot welding (refill FSSW) is a novel solid-state welding technology. Due to the significant merits of keyhole-free weld, improved mechanical properties, etc., it has been successfully used for the welding of Al-based similar and dissimilar combinations. However, studies concerned with Mg alloys are limited.

In the present study, firstly, feasibility of refill FSSW of casting Mg alloy AM50 was investigated. Defect-free welds with flat surface were obtained. The weld was classified into four regions, base material/heat affected zone (BM/HAZ), thermal-mechanically affected zone (TMAZ), transition zone (TZ) and stirred zone (SZ). In TZ and SZ, a unique microstructure showing an irregular mixture of low-angle grain boundaries (LAGBs) and high-angle grain boundaries (HAGBs) and the development of strong $\{0002\}$ B-fiber ideal simple shear texture, were identified. "Stop-action" experiments revealed that, the microstructural evolution and texture development at both plunge and retract stages were mainly controlled by plunging shoulder, which introduced texture-controlled microstructure and continuous dynamic recrystallization (CDRX) was the main DRX mechanism. Due to the existence of strong texture within the weld, during lap shear strength (LSS) test, some zones with featuring different deformation modes were formed, i.e. twinning zone, basal slip zone, and the non-basal slip zone. As a result, the plastic deformation incompatibility occurred both along the boundary between SZ and TMAZ and the boundary between shoulder and probe refill regions. Finally, most welds failed in the "SZ shear mode" with low LSS.

Although some welds meeting strength requirement could be obtained by refill FSSW, the welding was conducted under demanding conditions, resulting in serious tool wear and material adhesion, or even tool breakage. The conventional refill FSSW faced significant challenges in producing high quality Mg welds. Thus, a modified method, differential rotation refill FSSW (DR-refill FSSW), was developed to obtain Mg alloy welds with high mechanical performance. In DR-refill FSSW, the shoulder and probe rotated at different speeds in the same or reverse directions. Results showed that, when shoulder and probe rotate in the opposite direction and the probe rotation speed is higher than the shoulder, welds with significantly improved strength could be obtained. The formation of strong texture in the conventional refill FSSW was avoided, while a bimodal microstructure with weakened texture developed instead. "Stop-action" experiments revealed that, the microstructural development and texture evolution at both the plunge and retract stages were related to the combined influence from shoulder and probe. The deformation mechanisms at plunge stage could be summarized as CDRX, discontinuous DRX (DDRX) and secondary twins, while at the retract stage, the mechanisms were twinning induced DRX (TDRX) and DDRX. During LSS, the bimodal microstructure with weakened texture present in the SZ resulted in the formation of

micro-shear zones. which could accommodate strain effectively by dislocation slip and repeated DRX. As a result, the plastic deformation incompatibilities in different regions were eliminated and welds failed in the “SZ pull-out mode” with high mechanical performance.

DR-refill FSSW provides a new and effective strategy for improving the performance of spot welds based on microstructural engineering.