

انجمن جوشکاری ایران

خبرنامه

مرداد ماه 1405 ، شماره 34

همکار این شماره :

دکتر حسن شریفی

مروری بر فرایندهای FSW و GTAW برای اتصالات
آلیاژهای آلومینیوم گروه‌های 2000 و 6000

2



انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب ایران

اصفهان - خیابان شمس آبادی - ساختمان شمس -

طبقه 4- واحد 413

تلفن: 03132240325

info@iwnt.com

جوشکاری :

علم و هنر اتصال مواد

Welding: The Art and Science of Material Joining



مروری بر فرایندهای FSW و GTAW برای اتصالات آلیاژهای آلومینیم

گروه‌های 2000 و 6000 (قسمت دوم)

دکتر حسن شریفی

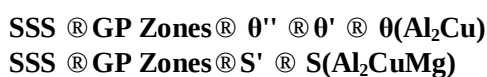
عضو هیئت علمی گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه شهر کرد

-فرایند FSW

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (Friction Stir Welding - FSW)، یک روش جدید از جوشکاری اصطکاکی برای اتصال قطعات در حالت جامد است که در آن از یک ابزار مصرف نشدنی با حرکت دورانی، برای تولید اصطکاک و حرارت حاصل از آن و نیز تغییر شکل پلاستیکی در موضع جوشکاری بهره برده می‌شود. این روش یک جهش روبه جلو در فناوری اتصال فلزات و بخصوص آلومینیم و منیزیم به شمار آمده و کاربرد گسترده‌ای در صنایع نیرومحرکه به‌طور عام و صنعت هواپیماسازی به‌طور خاص دارد. فرایند FSW هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد و موجب صرفه‌جویی در وزن سازه نهایی می‌شود. اتصالات معمولاً شامل پوسته تا اسپار، ستون و تیر عرضی است. این فرایند را می‌توان برای تولید بال، بدنه، دم، پانل‌های کف و درهای فرود هواپیما، مخازن سوخت برودتی برای وسایل نقلیه فضایی و مخازن سوخت هوانوردی استفاده کرد. در صنعت راه آهن FSW برای تولید قطارهای سریع السیر، واگن‌های زیرزمینی، تراموا، تانکرها و واگن، بدنه کانتینر، صفحات سقف و کف استفاده می‌شود. فرایند FSW در حال حاضر در تولید قطعات مکانیکی خودرو استفاده می‌شود، زیرا برای تولید جوش‌های مختلف، طولانی، مستقیم و منحنی مناسب است. قطعات زیر را می‌توان با استفاده از FSW تهیه کرد: تیرهای تریلر، کابین و درها، اسپویلر، دیوارهای جلویی، بدنه یا پرده‌های بسته، دیوارهای جانبی، قاب‌ها، کف، سپرها، شاسی، ظروف سوخت و هوا، قطعات موتور، سیستم‌های تعلیق هوا، محورهای محرک، موتور و گهواره شاسی [8].

با استفاده از روش FSW می‌توان عمده آلیاژهای آلومینیم را جوشکاری کرد. آلیاژهای گروه 7000 که از طریق فرایند ذوبی، جوش‌پذیری مطلوب ندارند با استفاده از فرایند FSW قابل جوشکاری هستند. برای آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر نیز از فرایند استفاده می‌شود. میزان استحکام اتصال در این فرایند به استحکام فلز پایه نیز می‌رسد. این فرایند برخلاف جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیم به تمیزکاری پیش از جوشکاری حساس نیست. از این روش برای اتصال آلیاژهای آلومینیم به دیگر فلزات نیست استفاده می‌شود. برای نمونه اتصال آلیاژهای مس و آلومینیم به یکدیگر در صنایع الکترونیک و آلومینیم به فولاد زنگ نزن در لوله‌های تحت فشار و صنایع لوله‌سازی با فرایند FSW قابل انجام است [9].

پژوهش‌های مختلفی در زمینه جوشکاری آلیاژهای آلومینیم از جمله آلیاژهای سری 2000 و 6000 انجام شده است. آلیاژهای آلومینیم سری 2000 (Al-Cu-Mg) آلیاژهای رسوب سخت شونده با چندین فاز ناپایدار هستند که در فرایند تجزیه فازی تشکیل می‌شوند. تجزیه فازی به صورت زیر است [10]:



فازهای رسوبی در آلیاژهای Al-CuMg به نسبت مس به منیزیم بستگی دارد. اگرچه، توالی رسوبگذاری کامل هنوز مورد بحث است، به طور کلی پذیرفته شده است که ریزساختار آلیاژهای AlCu-Mg در حالت T351 شامل مناطق GP یا GPB است [11].

جدول 1- نتایج آزمون کشش برای فرایندهای مختلف [6]

	0.2% Yield strength/ MPa	Tensile strength /MPa	Elongation in 50 mm gauge length/%	Notch tensile strength/ MPa	Notch strength ratio (NSR)	Joint efficiency/ %	Fracture location
BM	282	397	15.4	428	1.07	-	-
GTAW	220	305	12.2	289	0.95	77	WM
GMAW	154	278	10.7	244	0.88	70	WM

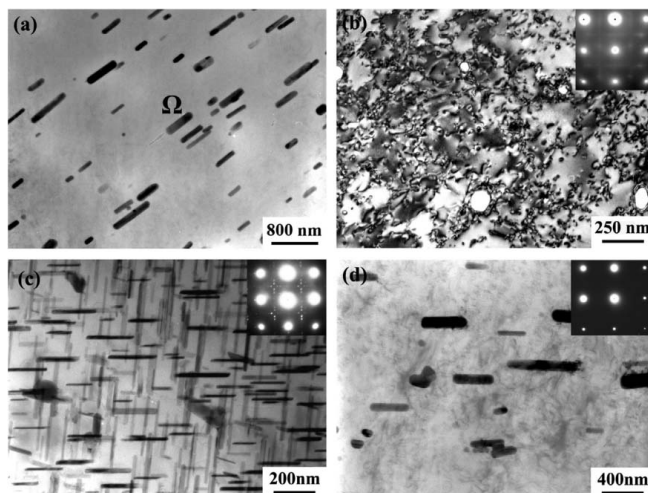
جنویس و همکاران [11] گزارش کردند که در ناحیه اغتشاش (NZ) آلیاژ 2024 افزایش دما باعث تشکیل فازهای S می شود و پس از جوشکاری فازهای GP می توانند جوانه زنی کنند که این امر منجر به افزایش سختی در این ناحیه می شود. البته لازم به ذکر از توزیع سختی در این ناحیه به توزیع رسوبات، اندازه دانه و چگالی نابجایی ها بستگی دارد. جونز و همکاران [12] گزارش کردند که در کاهش سختی در ناحیه متأثر از حرارت آلیاژ آلومینیم 2024 به فرایبری فازهای S و حل شدن رسوبات در این ناحیه بستگی دارد.

لیتینسکا و همکاران [13] گزارش کردند که در فرایند FSW آلیاژ $\text{Al-6Cu0.75-Mg-0.65Ag (wt.%)}$ فازهای استحکام بخش اولیه که فلز پایه وجود داشتند در ناحیه اغتشاش حل شدند. در حالی که این فازها در ناحیه متأثر از حرارت به شکل قابل توجهی درشت شده اند. رسوبات Al_2Cu در ناحیه متأثر از حرارت درشت شده اند و مقدار آن ها کاهش یافته است.

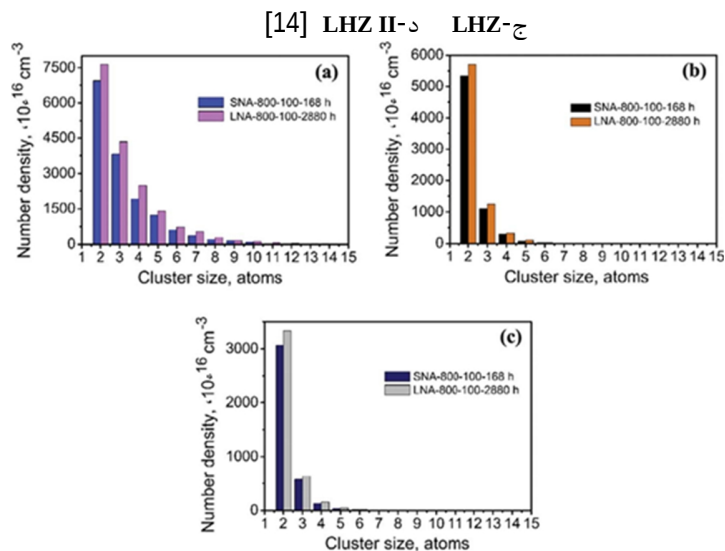
اخیرا، ژنگ و همکاران [14] پژوهشی را در مورد تکامل ریزساختاری اتصالات T351-2024 ایجاد شده توسط FSW در حین جوشکاری و پیری طبیعی پس از آن انجام دادند. مشابه گزارش جونز و همکاران، 196 دو ناحیه کم سختی (LHZs) در HAZ در هر دو AS و RS شناسایی شدند. LHZ های نزدیک و دور از NZ به ترتیب به عنوان LHZ I و LHZ II در نظر گرفته شدند. مشخص شد که LHZ I با انحلال مناطق GPB و خوشه های رسوبات، و همچنین تشکیل و درشت شدن فازهای S، فرایند فرایبری را تجربه کرد، در حالی که انحلال مناطق GPB و تجزیه خوشه های رسوبات در LHZ II رخ داد (شکل 1). در حین پیری طبیعی طولانی مدت پس از جوشکاری، هیچ گونه تشکیل مناطق GPB در LHZ I و LHZ II مشاهده نشد، با این حال، چگالی تعداد خوشه های Cu-Mg ، Cu و Mg در LHZ II افزایش یافت که این امر تجزیه و تحلیل فاز S توسط توموگرافی کاوشگر اتمی (APT) نشان داده شد (شکل 2). این امر منجر به بازیابی آهسته سختی می شود.

بوسکت و همکاران [15] تاثیر فرایند FSW بر ریزساختار و خواص اتصال آلیاژ آلومینیم 2024 را بررسی کردند. شکل ریزساختار نواحی مختلف اتصال و اندازه دانه را نشان می دهد. ریزساختار فلز پایه و HAZ مشابه بوده و از دانه های بزرگ تبلور مجدد یافته به موازات جهت نورد (L) تشکیل شده بود. طول دانه حدود 200 ± 50 میکرون در جهت نورد (L) بود. در TMAZ، دانه ها با تغییر شکل پلاستیک در طول

طول فرایند جوشکاری بدون تغییر اندازه دانه پیچیده شدند. برای منطقه اغتشاش، دانه‌ها گرد، کاملاً تبلور مجدد یافته و کوچک (حدود 5 میکرون) بودند.



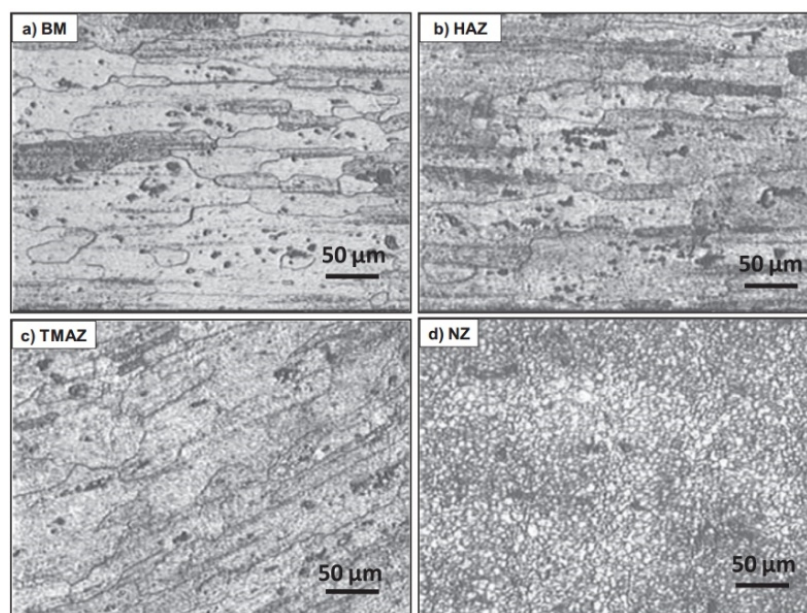
شکل 1- تصاویر TEM و الگوهای پراش مرتبط با اتصال آلیاژی (800 rpm-100 mm/min) FSW 2024Al-T351 با محور ناحیه [100]: الف-ب- BM



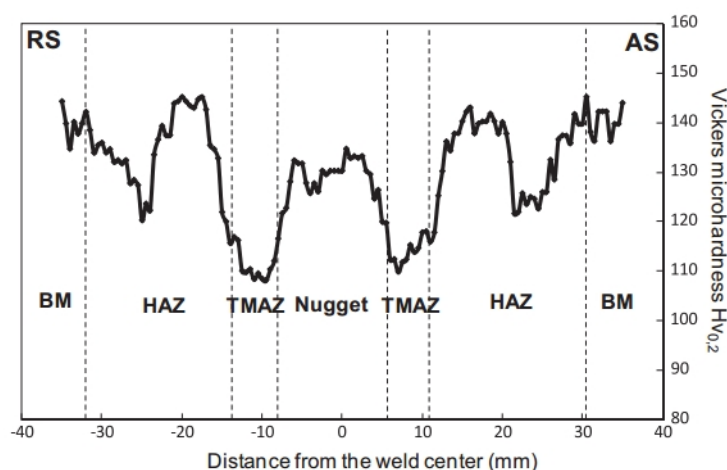
شکل 2- تأثیر زمان پیری بر تراکم تعداد خوشه‌های نمونه‌های اتصال آلیاژی: FSW 2024Al-T351 (800 rpm-100 mm/min): الف - خوشه‌های Cu-Mg، ب- خوشه‌های مس و ج- خوشه‌های منیزیم. [14]

شکل (3) نمودار تغییرات سختی برای نواحی مختلف اتصال را نشان می‌دهد. تغییرات زیاد (افزایش یا کاهش) ریزسختی در هر منطقه مشاهده شد. بیشترین مقدار ریزسختی در فلز پایه و مرکز ناحیه HAZ

مشاهده شد (144 ویکرز)، در ناحیه TMAZ و اغتشاش میزان سختی به ترتیب 109 و 130 ویکرز گزارش شد.



شکل 3- ریزساختار نواحی مختلف اتصال. الف - فلز پایه. ب - ناحیه HAZ ج - ناحیه TMAZ د - ناحیه اغتشاش [15]



شکل 4- نمودار تغییرات سختی برای نواحی مختلف اتصال [15]

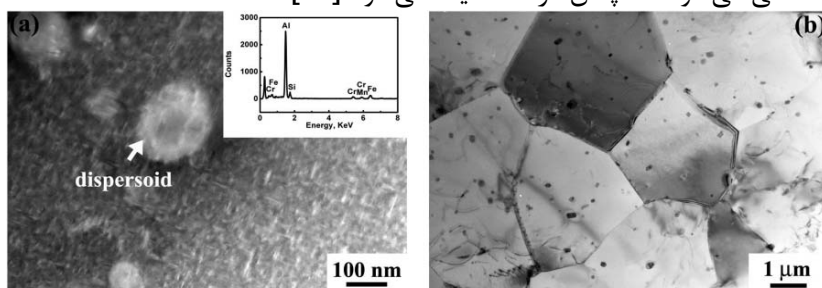
اتصال جوش داده شده با اصطکاک AA2024-T351 تکامل ریزسختی قابل توجهی را از طریق جوش به نمایش می‌گذارد. این تحول مربوط به تغییرات ریزساختار است. ریزسختی عمدتاً تحت تأثیر رسوبات یعنی مناطق GPB و فازهای درون دانه‌ای $S'(S)$ قرار می‌گیرد. در فلز پایه، مقدار بالای سختی به چگالی بالای

مناطق همدوس **GPB** مربوط می‌شود و حرکت نابجایی را کند می‌کند. در **HAZ** نزدیک به مواد پایه، کاهش سختی ناشی از انحلال برخی از مناطق **GPB** است. در مرکز **HAZ** مقدار سختی زیاد به دلیل چگالی بالای رسوبات سخت $S'(S)$ درون دانه‌ای است. نزدیک به **TMAZ**، رسوبات درشت و فراپیر شده $S'(S)$ چرخه حرارتی تجربه شده در این منطقه منجر به کاهش سختی می‌شود [16و 17].

درشت شدن فازهای $S'(S)$ که در **TMAZ** گسترش یافته‌اند، کاهش مقادیر ریزسختی را به حداقل مقدار توضیح می‌دهد. در منطقه اغتشاش، اندازه دانه کوچک حدود 5 میکرون منجر به سخت شدن (رابطه هال - پچ) و همچنین چگالی زیادی از مناطق **GPB** کمک می‌کند. با این حال، درشت شدن رسوبات $S'(S)$ تمایل به کاهش مقادیر ریزسختی را در بر دارد. این تعادل بین اندازه دانه، رسوب **GPB** و درشت شدن رسوبات $S'(S)$ است که مقادیر میکروسختی را در ناحیه اغتشاش کمتر از فلز پایه می‌کند.

در آلیاژهای آلومینیم سری 6000، منیزیم و سیلیسیم به عنوان عناصر آلیاژی اصلی، باعث رسوب سختی می‌شوند عناصر آلیاژی مانند سیلیسیم، منگنز، آهن و غیره می‌توانند تأثیر قابل توجهی در تشکیل فازهای بین فلزی داشته باشند. ذرات درشت بین فلزی مختلف (معمولاً 1 درصد) با اندازه‌های 10 میکرون بسته به ترکیب شیمیایی آلیاژ، به صورت فاز Al_7Cu_2Fe ، Al_5FeSi ، $Al_{12}(Fe,Cr,Mn)_3Si$ یا فاز پایدار $b (Mg_2Si)$ در سری آلیاژی 6000 شناسایی شدند [18]، [19]. به طور معمول، کرم، منگنز و روی به آلیاژهای آلومینیم برای کنترل تبلور مجدد و ساختار دانه اضافه شد. حضور عنصر ریزدانه کننده کرم منجر به توزیع رسوبات $Al_{12}Mg_2Cr$ می‌شود. [20-22]

به عنوان مثال، شکل (5-الف) یک تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی (**STEM**) از چگالی بالایی از رسوبات سوزنی شکل ظریف و پراکندهای درشت در یک آلیاژ **T361-6061** را با یک فلش سفید نشان می‌دهد که از آهن، سیلیسیم، آلومینیم، کرم، منگنز تشکیل شده است پس از **FSW** آلیاژ **NZ** آلیاژ **FSW 6061-T651** با ساختار دانه‌های تبلور مجدد ریز و هم محور مشخص شد. و رسوبات سوزنی شکل به طور کامل در زمینه آلومینیم حل شدند. با این حال، پراکندهای درشت به دلیل تثبیت حرارتی بالا که از نقطه ذوب بالای آن‌ها ناشی می‌شود، همچنان در **NZ** دیده می‌شوند [18].



شکل 5- ریزساختار آلیاژ **FSW 6061Al-T651** الف- تصویر **STEM** که پراکندهای درشت و رسوبات ریز توزیع یکنواخت در **BM** - تصویر **TEM** که دانه‌های ریز و هم محور **NZ** [18]

نتیجه گیری

در این پژوهش به مروری بر فرایندهای FSW و GTAW برای اتصالات آلیاژهای آلومینیم به ویژه سری 2000 و 6000 پرداخته شد. در فرایند FSW ناحیه اتصال به سه ناحیه متأثر از حرارت، ناحیه ترمومکانیکی و ناحیه اغتشاش دسته بندی می شود. عامل مهم در ایجاد اتصال در فرایند FSW تغییر شکل شدید پلاستیک است در حالی که در فرایند GTAW عامل اتصال ذوب و انجماد است. تغییرات خواص مکانیکی در اتصالات ایجاد شده توسط فرایند FSW برای آلیاژهای سری 2000 و 6000 تشکیل رسوبات و ترکیبات بین فلزی، و حل شدن رسوبات در نواحی مختلف می باشد.

منابع

- 1-C. L. Jenney and A. O'Brien, *Welding handbook*, vol. 1. 1991.
- 2-M. Abbass and J. Abd Ul-Qader, "Effect of Filler Metals on Microstructure and Mechanical Properties of GTAW Welded Joints of Aluminum Alloy (AA2024-T3)," *Engineering and Technology Journal*, vol. 38, no. 8, pp. 1236–1245, 2020.
- 3-T. Rodríguez-Hernández et al., "First assessment on the microstructure and mechanical properties of gtaw-gmaw hybrid welding of 6061-t6 AA," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 59, no. 1, pp. 658–667, 2020.
- 4-J.-B. Wang, H. Nishimura, S. Katayama, and M. Mizutani, "Evaporation phenomena of magnesium from droplet at welding wire tip in pulsed MIG arc welding of aluminium alloys," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, no. 5, pp. 418–425, 2011.
- 5-I. Semenov et al., "Modelling of binary alloy (Al-Mg) anode evaporation in arc welding," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, vol. 20, no. 5, pp. 55–64, 2012.
- 6-K. Vasu, H. Chelladurai, A. Ramaswamy, S. Malarvizhi, and V. Balasubramanian, "Effect of fusion welding processes on tensile properties of armor grade, high thickness, non-heat treatable aluminium alloy joints," *Defence Technology*, 2019.
- 7-S. Yan et al., "Characteristics of microstructure and fatigue resistance of hybrid fiber laser-MIG welded Al-Mg alloy joints," *Applied Surface Science*, vol. 298, no. 12, pp. 12–18, 2014.
- 8-R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, 2005.
- 9-Hobart filler Metals, "Guide for Aluminum Welding," *The Welder's Choice for Quality Aluminum Weld Wire*, 2011. [Online.]
- 10-F. Zhang et al., "In situ structural characterization of ageing kinetics in aluminum alloy 2024 across angstrom-to-micrometer length scales," *Acta Materialia*, vol. 111, pp. 385–398, 2016.
- 11-C. GENEVOIS, A. DESCHAMPS, A. DENQUIN, and B. DOISNEAUCOTTIGNIES, "Quantitative investigation of precipitation and mechanical behaviour for AA2024 friction stir welds," *Acta Materialia*, vol. 53, no. 8, pp. 2447–2458, 2005.
- 12-M. J. Jones, P. Heurtier, C. Desrayaud, F. Montheillet, D. Allehaux, and J. H. Driver, "Correlation between microstructure and microhardness in a friction stir welded 2024 aluminium alloy," *Scripta Materialia*, 2005.

12-M. J. Jones, P. Heurtier, C. Desrayaud, F. Montheillet, D. Allehaux, and J. H. Driver, "Correlation between microstructure and microhardness in a friction stir welded 2024 aluminium alloy," *Scripta Materialia*, 2005.

13-L. Lityńska, R. Braun, G. Staniek, C. Dalle Donne, and J. Dutkiewicz, "TEM study of the microstructure evolution in a friction stir-welded AlCuMgAg alloy," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 81, no. 2–3, pp. 293–295, 2003.

14-Z. Zhang, B. L. Xiao, and Z. Y. Ma, "Hardness recovery mechanism in the heat-affected zone during long-term natural aging and its influence on the mechanical properties and fracture behavior of friction stir welded 2024Al-T351 joints," *Acta Materialia*, vol. 73, pp. 227–239, 2014.

15-E. Bousquet, A. Poulon-Quintin, M. Puiggali, O. Devos, and M. Touzet, "Relationship between microstructure, microhardness and corrosion sensitivity of an AA 2024-T3 friction stir welded joint," *Corrosion Science*, vol. 53, no. 9, pp. 3026–3034, 2011.

16-M. Jones, P. Heurtier, C. Desrayaud, F. Montheillet, D. Allehaux, and J. Driver, "Correlation between microstructure and microhardness in a friction stir welded 2024 aluminium alloy," *Scripta Materialia*, vol. 52, no. 8, pp. 693–697, 2005.

17-C. Genevois, A. Deschamps, A. Denquin, and Doisneaucottignies, "Quantitative investigation of precipitation and mechanical behaviour for AA2024 friction stir welds," *Acta Materialia*, vol. 53, no. 8, pp. 2447–2458, 2005.

18-A. H. Feng, D. L. Chen, and Z. Y. Ma, "Microstructure and Low-Cycle Fatigue of a Friction-Stir-Welded 6061 Aluminum Alloy," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 41, no. 10, pp. 2626–2641, 2010.

19-C. RAVI, "First-principles study of crystal structure and stability of Al₂Mg₃Si₂(Cu) precipitates," *Acta Materialia*, vol. 52, no. 14, pp. 4213–4227, 2004.

20-G. Sha, K. O'Reilly, B. Cantor, R. Hamerton, and J. Worth, "Effect of Grain Refiner on Intermetallic Phase Formation in Directional Solidification of 6xxx Series Wrought Al Alloys," *Materials Science Forum*, vol. 331–337, pp. 253–258, 2000.

21-A. L. Dons, E. K. Jensen, Y. Langsrud, E. Trømborg, and S. Brusethaug, "The alstruc microstructure solidification model for industrial aluminum alloys," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 30, no. 8, pp. 2135–2146, 1999.

22-H. Tanihata, T. Sugawara, K. Matsuda, and S. Ikeno, "Effect of casting and homogenizing treatment conditions on the formation of Al-Fe-Si intermetallic compounds in 6063 Al-Mg-Si alloys," *Journal of Materials Science*, 1999.