

REVISIÓN DEL USO DE CAMPOS MAGNÉTICOS EN LA SOLDADURA

REVIEW OF THE USE OF MAGNETIC FIELDS IN STEEL WELDING

GIOVANNA RODRÍGUEZ
HERNÁNDEZ¹

VENTURA LILIA CRUZ HERNÁNDEZ²

RESUMEN

La soldadura es un proceso para unir o reparar estructuras metálicas mediante la fusión de uno o más materiales con o sin material de aporte. Hay varios procesos de soldadura: 1) Soldadura SMAW, usa un electrodo revestido y es versátil y económico, aunque genera humo. 2) Soldadura GMAW/MIG, utiliza gas inerte y produce un cordón limpio, ideal para la industria automotriz. 3) Soldadura GTAW, ofrece alta calidad para metales no ferrosos, aunque es más lenta. 4) Soldadura SAW, adecuada para materiales de alto calibre y producción en masa, protegida por un fundente. 5) soldadura RSW, empleada para unir placas delgadas en la industria automotriz mediante corriente eléctrica. Los factores que afectan la soldadura son; materiales, parámetros operativos (corriente, voltaje y velocidad de avance, la configuración y posición del electrodo o antorcha). La aplicación de campos magnéticos en soldadura, mejoran la estabilidad del arco, controlan la pileta de fusión y reducen defectos. Son útiles en el proceso GMAW, SAW Y SMAW para obtener un cordón de soldadura de calidad, mejorar la penetración y distribución del calor, reducir salpicaduras y porosidad. Beneficios: aumentar la eficiencia, reducir defectos y versatilidad en diferentes aplicaciones. Su implementación requiere equipos especializados y conocimientos avanzados, lo cual implica un costo inicial elevado y mayor complejidad en el proceso. Sin embargo, con los avances tecnológicos, los campos magnéticos podrían ser cada vez más usados en la soldadura industrial, mejorando la calidad y reduciendo costos. La investigación continua busca superar los desafíos actuales, permitiendo una adopción más amplia de esta tecnología.

Palabras clave: campo magnético; arco eléctrico; electrodo; electromagnetismo; ZAT (zona afectada térmicamente).

1. Facultad de Metalurgia, Unidad Norte, UAdeC.
2. Facultad de Contaduría y Administración, Unidad Norte, UAdeC.

Correspondencia
giovanna_rodriguez@uadec.edu.mx

Fecha de recepción
15 de enero de 2025.

Fecha de aceptación
26 de mayo de 2025.

ABSTRACT

Welding is a process for joining and repairing metal structures by fusing materials together. There are several welding methods, each suitable for different materials and project needs: 1) SMAW welding, uses a coated electrode, although this generates smoke. 2) GMAW/MIG welding, uses inert gas and produces a clean bead. It is widely used in the automotive industry. 3) GTAW/TIG welding, uses a non-consumable tungsten electrode. This process is slower. 4) SAW welding, uses a continuous feed. 5) RSV welding, used to join thin sheets in the automotive industry using electric current. Factors affecting welding are; materials, operating parameters (current, voltage and travel speed, configuration and position of the electrode or torch. Applications of magnetic fields in welding: They improve arc stability, control the molten pool and reduce defects. They are useful in methods such as GMAW, SAW AND SMAW to obtain a higher quality weld bead, improve heat penetration and distribution, and reduce spatter and porosity. Benefits: increased efficiency, reduced defects, and versatility in different applications. However, its implementation requires specialized equipment and advanced knowledge, which implies a high initial cost and greater complexity in the process. However, with technological advances, magnetic fields could be increasingly used in industrial welding, improving quality and reducing costs. Ongoing research seeks to overcome current challenges, enabling wider adoption of this technology.

Keywords: magnetic field; electric arc; electrodo; electromagnetism; ZAT.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la soldadura ha evolucionado de ser un simple método de unión de materiales a convertirse en un pilar fundamental para múltiples sectores industriales, como la automotriz, gasoductos, petroquímica, la construcción, marítima, entre otras. La constante búsqueda de perfeccionar este proceso ha impulsado el desarrollo de tecnologías avanzadas que no solo mejoran la calidad de las uniones, sino que también optimizan la eficiencia y reducen los costos operativos. Entre estas tecnologías, el uso de campos magnéticos ha emergido como una alternativa prometedora y revolucionaria (Cueva Jiménez, 2024).



Los campos magnéticos (CM) ofrecen la capacidad de influir directamente en varios aspectos críticos del proceso de soldadura. Desde estabilizar el arco eléctrico y controlar la distribución del metal fundido hasta reducir defectos como porosidades y grietas, su implementación ha demostrado un impacto positivo en la calidad y consistencia de las uniones soldadas. Además, su capacidad para ajustar parámetros operativos y la geometría del cordón de soldadura, amplía las posibilidades para abordar desafíos específicos en diferentes materiales y preparaciones de la unión (Queiroz y col., 2020; Xiao y col., 2020).

Este artículo profundiza en los principios físicos que rigen la interacción entre los CM y los procesos de soldadura, abordando cómo estas interacciones pueden aprovecharse para maximizar los resultados. Asimismo, se examina la interacción de los CM en diversos tipos de procesos de soldadura. Sin embargo, como toda innovación, el uso de CM presenta desafíos que deben superarse, desde la complejidad en la implementación hasta la necesidad de un control preciso de los parámetros.

En conjunto, esta revisión busca proporcionar una visión integral sobre el estado actual de esta tecnología, destacando su potencial transformador en la industria de la soldadura y señalando las oportunidades futuras para seguir explorando sus límites.

SOLDADURA

Este método es un proceso metalúrgico y de fusión, la soldadura se logra suministrando calor a un área entre el electrodo y la pieza de trabajo, de esta forma se empiezan a fundir las superficies del metal hasta llegar a su unión. Dependiendo la técnica, se puede utilizar algún metal de aporte. Es importante analizar la morfología y propiedades mecánicas de las piezas soldadas, ya que puede haber cambios microestructurales tanto en el metal base como en el cordón de soldadura debido a la transferencia de calor (Cueva Jiménez, 2024; Fathi y col., 2019).

El proceso de soldadura da como resultado tres zonas básicas en las piezas soldadas (ver Figura 1):

1. La zona centro del cordón: La unión de los componentes
2. La zona afectada térmicamente (ZAT): Área del metal base que no se funde durante el proceso, pero si se ve afectada en sus propiedades físicas debido al calor y contiene la zona de grano grueso, zona de grano fino, zona de recristalización incompleta.
3. La zona del metal base (MB): Área adyacente a la ZAT, no se ve afectada por el calor generado durante el proceso.

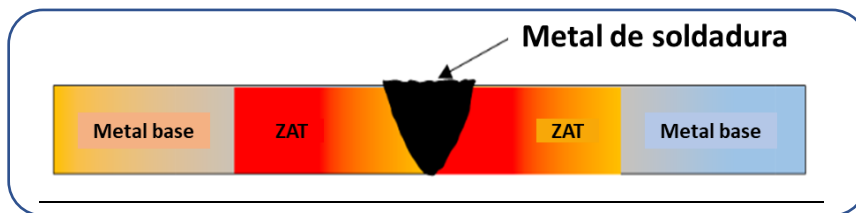


Figura 1. Perfil de la soldadura que muestra MB, HAZ y MS.

La temperatura de la unión o el calor de aporte (Heat input) determinará la estructura de la ZAT (Figura 2). Entre mayor sea el calor de aporte, más afectada estará la zona adyacente a la línea de fusión (Fathi y col., 2019).

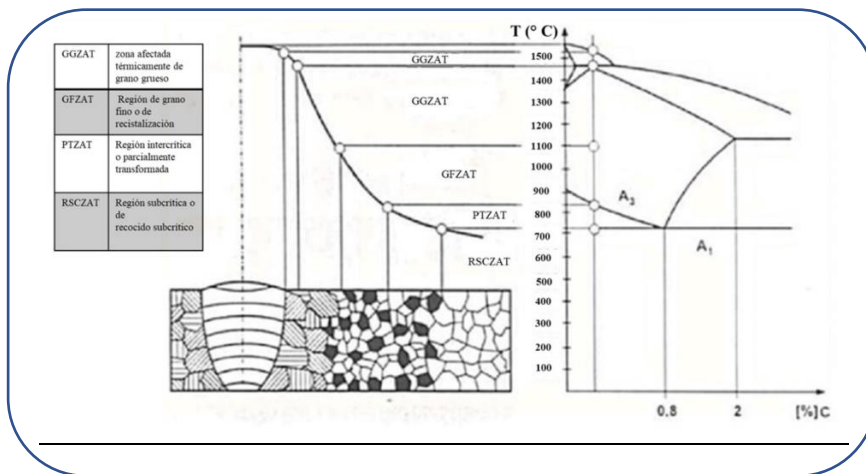


Figura 2. Efecto del gradiente de temperatura en la estructura de la ZAT. Fuente: Elaboración propia.

El proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés) es el más utilizado y más sencillo a comparación con el proceso de soldadura por rayo láser (por sus siglas en inglés LBW), ya que el equipo es más económico y fácil de utilizar, permite soldaduras para grandes estructuras. Sin embargo, debido a la transferencia de calor a las piezas de

trabajo, la técnica de soldadura por arco generalmente conlleva a una gran ZAT y tiende a la formación de poros (Giudice y col., 2024).

Existen diversos procesos de soldadura, cada uno con características y aplicaciones específicas, que se eligen en función del tipo de material, el grosor, y los requisitos del proyecto. (Baghel, 2022; Madavi y col., 2022; Pathak y col., 2022; Zhou & Takahashi, 2024) Nos definen los principales métodos de soldadura, los cuales son (Tabla 1):

Tabla 1. Los procesos de soldadura

Principales métodos	Resumen	Aplicación	Ventajas	Desventajas
Soldadura SMA W	Soldadura con electrodo revestido, utiliza un arco eléctrico entre el metal de aporte y el de base	Se utiliza en la industria aeroespacial, en automóviles y electrodomésticos	Muy utilizada debido a su versatilidad y costo relativamente bajo	El proceso puede generar más humo y requiere de una buena ventilación.
Soldadura GMAW/MIG	Emplea un arco eléctrico entre un metal de aporte y el metal base, protegido por un gas inerte	Se usa en las industrias automotriz y de construcción	Es eficiente, produce un cordón de soldadura limpio y con menor cantidad de escoria	Agrietamiento por solidificación
Soldadura GTAW/TIG	Utiliza un electrodo de tungsteno no consumible y un gas inerte para proteger el arco. Ofrece alta calidad de soldadura	Se usa para unir tuberías de acero inoxidable en las industrias del petróleo y el gas	Ofrece alta calidad de soldadura, ideal para metales no ferrosos	La velocidad de soldeo es menor en comparación con los otros procesos

La calidad de la soldadura es fundamental para el rendimiento y la durabilidad de las piezas soldadas, por lo que deben tomarse en cuenta estos factores al momento de realizar una soldadura, como por ejemplo para aceros el AWS D1.1/D1.1 M:2002 Structural Welding Code-Steel.

Factores a controlar para una mayor eficiencia durante la soldadura

1. Materiales base: la composición química y las propiedades del material base influyen en la elección del método de soldadura y los parámetros de proceso.
2. Configuración y posición: la posición en la que se realiza la soldadura (plana, vertical, sobre cabeza) afecta la facilidad del

proceso y la calidad de la soldadura.

3. Parámetros del proceso: la velocidad de soldadura, la corriente, el voltaje y la técnica de aplicación afectan la calidad de la soldadura.
4. Elección del proceso adecuado para realizar la soldadura.
5. Conocer la exposición de los componentes soldados que tendrán durante el servicio (Ramdam & Klimecka-Tatar, 2024).

CAMPOS MAGNÉTICOS (CM)

PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

La aplicación de campos magnéticos (CM) en la soldadura se basa en los principios del electromagnetismo y la interacción del campo magnético con el arco eléctrico de soldadura. En la soldadura existen flujos de corriente en el arco, el electrodo, el tipo de transferencia y la pileta de soldadura, que pueden verse influenciados por el campo magnético externo (CME) para generar fuerzas electromagnéticas externas. Cuando se aplica un campo magnético externo, las partículas cargadas en el arco experimentan una fuerza de Lorentz, que puede desviar, estabilizar o controlar de forma flexible mediante el diseño de la distribución espaciotemporal de los campos electromagnéticos (Queiroz y col., 2020; Wang y col., 2020; Wu y col., 2017). El efecto del campo electromagnético externo (CEME) puede ser constante o por pulsos. Puede ser considerado un imán permanente o inducido por una bobina (Liu y col., 2016; Wang y col., 2016). En la figura 3 se muestra como es colocada la bobina y por donde es la entrada de corriente eléctrica para generar el campo electromagnético.

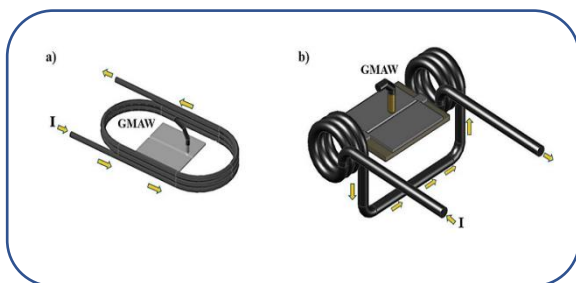


Figura 3. Arreglo de los campos magnéticos para el proceso de soldadura GMAW a) CEMA y b) CEMP (Cruz-Hernández y col., 2022).

Esta tecnología está diseñada para mejorar los resultados de la soldadura, la estabilidad del arco y controlar mejor la geometría del cordón de soldadura (Chen y col., 2011; Garcia y col., 2015; Jiang y col., 2012; Liu y col., 2024). En los procesos de soldadura, un gran gradiente de temperatura y un intenso cambio de fases causan tensiones y deformación en la soldadura. Al controlar la forma del arco mediante el CEME, el gradiente de temperatura disminuye (Zhong y col., 2012) y, por ende, reduce la ZAT, y previene el agrietamiento durante el enfriamiento (García Rentería y col., 2013; Hailong y col., 2014; Janaki Ram y col., 1999; Nikzad y col., 2016; Thomy & Vollertsen, 2005).

Por otra parte, la aplicación de los CEME también ha tenido impacto sobre la solidificación de la soldadura, el control de la transferencia del metal de aporte, la microestructura y propiedades mecánicas (Luo y col., 2010; Reis y col., 2013; Wu y col., 2017).

Normalmente los campos magnéticos se aplican de dos formas; campo electromagnético transversal (CEMT) o campo electromagnético longitudinal (CEML) al arco de soldadura. La aplicación transversal ayuda a estabilizar el arco de soldadura, reduciendo fluctuaciones y mejorando la calidad del cordón. Los campos magnéticos longitudinales afectan la transferencia de metal y la distribución del calor, lo que puede resultar en una soldadura más uniforme y con menos defectos (Liu y col., 2024).

Por otro lado, también se ha utilizado el campo electromagnético rotacional (CEMR) y el campo electromagnético axial (CEMA) (Liu y col., 2024; Liu y col., 2016; Wang y col., 2016). A continuación, se muestra la Figura 4 de las diferentes formas que se pueden aplicar los campos electromagnéticos en el proceso de soldadura.

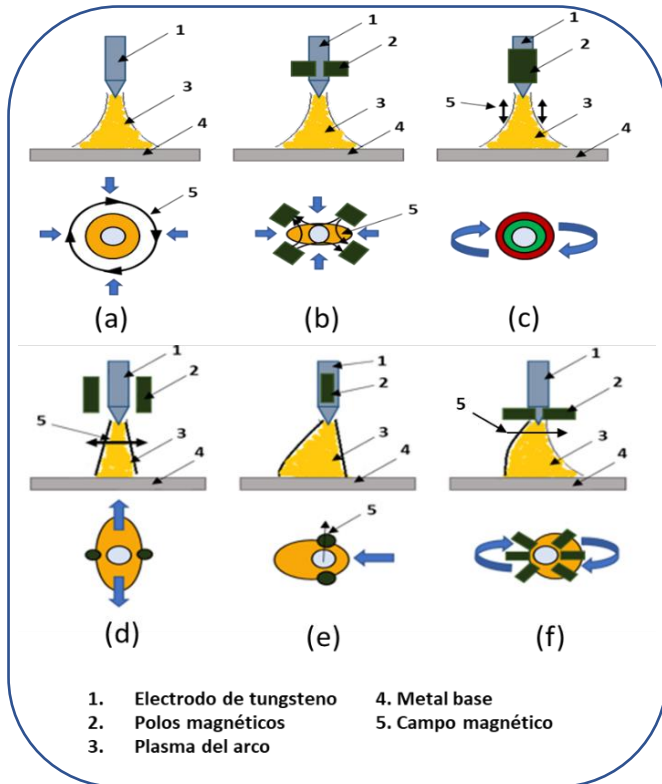


Figura 4. Influencia de los campos magnéticos sobre la forma del arco durante el proceso de soldadura: a) sin campo. b) corona de campos magnéticos. c) CEMA. d) CEML. e) CEMT. f) CEMR. Fuente: Elaboración propia.

APLICACIONES DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS EN DIFERENTES PROCESOS DE SOLDADURA

SOLDADURA GMAW

En el proceso de soldadura por arco metálico con gas de protección (GMAW, por sus siglas en inglés) los campos magnéticos (CM) se utilizan principalmente para estabilizar el arco y controlar la transferencia de metal. La estabilidad del arco es crucial para obtener una soldadura de alta calidad, y la aplicación de campos magnéticos ha demostrado ser eficaz en la reducción de salpicaduras y en el control de la penetración del calor. Los estudios han demostrado que un campo magnético transversal puede estabilizar el arco y reducir la fluctuación, mejorando así la consistencia del cordón de soldadura (Xiao y col., 2020).

SOLDADURA SMAW

Aunque el uso de CM en el proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés) es menos común, su aplicación puede ser beneficiosa en situaciones donde se requiere un mayor control del arco, como en soldaduras en posiciones complejas. Los campos magnéticos pueden ayudar a estabilizar el arco y reducir la cantidad de escoria producida durante el proceso, mejorando la calidad del cordón de soldadura y reduciendo el trabajo de limpieza posterior (Pathak y col., 2022).

SOLDADURA GTAW

En la soldadura por arco con tungsteno y gas de protección (GTAW, por sus siglas en inglés) los campos magnéticos pueden influir en la estabilidad del arco y el calentamiento del electrodo. Un CM aplicado adecuadamente puede mejorar el control de la geometría del cordón de soldadura y reducir las deformaciones térmicas, lo que es crucial en aplicaciones donde se requiere alta precisión, como en la industria aeroespacial y electrónica (Luo y col., 2015; Yin y col., 2012).

A continuación, se muestra la Tabla 2 de patentes relacionados al “Uso de campos magnéticos en la soldadura” de diferentes autores, aplicados a diferentes instituciones en la última década y años pasados.

Tabla 2. Patentes relacionadas al uso de campos magnéticos en la soldadura

Título de patente	Autor	Año	País	Empresa
GB2158758 Soldadura por arco	Blakeley Philip John	1985	Reino Unido	Welding Int.
CNI06312252 Método para superar el golpe de deflexión magnética de los campos magnéticos en el arco eléctrico de soldadura	Zhu Ning, He Yaofei, Wu Rongshan, Lu Xiaoxin	2017	China	Pangang Group Engineering Technology Co. LTD
CN115007974 Método de soldadura por arco de tungsteno de argón con restricción de presión negativa por arco	Wang Ying, Luo Jian	2022	China	Sangai University of Engineering Science
Soldadura MIG-plasma	Gerogiy Ignatchenko, Igor Dykhno	2005	Estados Unidos	Plasma Laser Tech LTD
Método de soldadura MIG y dispositivo de soldadura MIG	Kengo Hyoma, Yoshihiro Tanabe, Yutaka Kodama, Kotaro Inose	2017	Japón	HIH Corp



US4336441- Welding Process	Goday Tomakazu, Sugiyama Tohru, Nishikawa Yutaka	1982	Estados Unidos	Kobe Steel LTD
CN102848058 Método y dispositivo para refinar las estructuras de las uniones soldadas mediante el uso de campos magnéticos pulsados en el proceso de soldadura	Zhou Yueming, Fu Jianquin	2013	China	Baoshan Hierro y Acero Co. LTD
Metodología de la interacción electromagnética de baja intensidad aplicada en la soldadura de aceros inoxidables austeníticos de doble fase para disminuir la corrosión localizada e intergranular	Rafael García Hernández, Víctor Hugo López Morelos	2016	México	Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo
US20190037651- Métodos y aparatos para proporcionar campos magnéticos asimétricos y calentamiento por inducción utilizando campos magnéticos asimétricos	Michael Hoeger	2019	Estados Unidos	Illinois Tool Works Inc.

CONCLUSIONES

El uso de campos magnéticos en la soldadura representa un avance significativo en la tecnología de unión de materiales, ofreciendo una serie de beneficios que mejoran tanto la calidad como la eficiencia del proceso de soldadura. Este enfoque innovador ha ganado atención en la industria por su capacidad para controlar y mejorar el proceso de soldadura mediante la manipulación de campos magnéticos alrededor del arco de soldadura y la pileta de fusión.

Uno de los principales beneficios del uso de campos magnéticos en la soldadura es la mejora en la estabilidad del arco de soldadura. La estabilidad del arco es crucial para asegurar una unión uniforme y duradera entre los materiales. Los campos magnéticos, especialmente cuando se aplican transversalmente al arco, ayudan a reducir las fluctuaciones del arco, lo que resulta en una soldadura con mejor geometría del cordón y libre de defectos. Esta estabilidad es fundamental para evitar problemas como salpicaduras y porosidad, que pueden comprometer la calidad del cordón de soldadura.

Además, el control del flujo del metal fundido y la distribución del calor en la ZAT se ven beneficiados, lo que reduce defectos como grietas y porosidad.

El uso de campos magnéticos también permite un control más preciso de la penetración y la distribución del calor. La capacidad de ajustar estos

parámetros con mayor precisión ayuda a minimizar el sobrecalentamiento o la formación de grandes zonas afectadas por el calor (ZAT) que puedan debilitar la soldadura.

DESAFÍOS Y LIMITACIONES

A pesar de los beneficios significativos, la implementación de campos magnéticos en la soldadura no está exenta de desafíos. Uno de los principales obstáculos es el costo asociado con la instalación y el mantenimiento de equipos especializados. La generación y el control de campos magnéticos requieren inversiones en tecnología avanzada, lo que puede ser una barrera para su adopción generalizada.

Otro desafío es la complejidad operativa que implica el uso de campos magnéticos. La correcta implementación de esta tecnología requiere un conocimiento técnico avanzado y una capacitación específica para los operadores. Los ajustes precisos y la calibración de los sistemas magnéticos son fundamentales para obtener los mejores resultados.

REFERENCIAS

- Baghel, P. K. (2022). Effect of SMAW process parameters on similar and dissimilar metal welds: An overview. *Heliyon*, 8(12): e12161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12161>
- Chen, Y., Sui, F., Cong, K., Yan, X., Zhang, G., & Guan, S. (2011). Effects of Shielding Gas and Magnetic Field on Characteristics of AZ31 Magnesium Alloy by TIG Welding. *Materials Science Forum*, 704-705: 1186-1196. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.704-705.1186>
- Cruz-Hernández, V. L., García-Hernández, R., López-Morelos, V. H., García-Rentería, M. A., & González-Sánchez, J. (2022). Intergranular corrosion of AISI 347 stainless steel welds obtained under electromagnetic interaction of low intensity. *Materials Letters*, 312: 131679. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131679>
- Cueva Jiménez, G. F. (2024). ANALYSIS OF WELDING TYPES THROUGH NON-DESTRUCTIVE. *Aula Virtual*, 5(12): 446-465. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.11521698>

- Fathi, M. S. A., Ismael, Q., & Saleh, K. A. (2019). An effect of welding type on the mechanical properties of welding joints. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9(4): 699-707.
- García, M., López, V., Rafael, G., Bedolla, E., & González-Sánchez, J. (2015). Electrochemical Characterization of AISI 2205 Duplex Stainless Steel Welded Joints with Electromagnetic Interaction. *Procedia Materials Science*, 8: 950-958. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.156>
- García Rentería, M. A., López Morelos, V. H., García Hernández, R., Curiel López, F., & Lemus-Ruiz, J. (2013). Effect on the Microstructure and Mechanical Properties of the Electromagnetic Stirring during GMA Welding of 2205 DSS Plates. *Materials Science Forum*, 755: 61-68. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.755.61>
- Giudice, F., Missori, S., Scolaro, C., & Sili, A. (2024). A Review on Fusion Welding of Dissimilar Ferritic/Austenitic Steels: Processing and Weld Zone Metallurgy. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 8(3): 96. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmmp8030096>
- Hailong, L., Lixiang, W., & Yunhai, S. (2014). The Research on Microstructure and Properties of WQ960 Welded Joints under Longitudinal Magnetic Field. *Proceedings of the 2014 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering*, 1: 92-95 <https://doi.org/10.2991/meic-14.2014.21>
- Janaki Ram, G. D., Murugesan, R., & Sundaresan, S. (1999). Fusion zone grain refinement in aluminum alloy welds through magnetic arc oscillation and its effect on tensile behavior. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 8(5): 513-520. <https://doi.org/10.1007/s11665-999-0002-x>
- Jiang, S., Wang, X., Chen, H., & Liu, P. (2012). The Impact of Adscitious Longitudinal Magnetic Field on CO2 Welding Process. *Advanced Materials Research*, 538-541: 1447-1450. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.1447>
- Liu, Y., Ding, H., Luo, J., Bair, D., Xu, X., & Chang, Y. (2024). Numerical and experimental study of TIG welding arc in high frequency longitudinal magnetic field. *Journal of Materials Research and Technology*, 33: 5253-5262. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.181>
- Liu, Y., Sun, Q., Wang, H., Zhang, H., Cai, S., & Feng, J. (2016). Effect of the axial external magnetic field on copper/aluminium arc weld joining. *Science and Technology of Welding and Joining*, 21: 1-6. <https://doi.org/10.1080/13621718.2015.1125406>
- Luo, J., Luo, Q., Wang, X., & Wang, X. (2010). EMS-CO2 Welding: A New Approach to Improve Droplet Transfer Characteristics and Welding Formation. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(11): 1233-1241. <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.481000>
- Luo, J., Zongxiang, Y., & Keliang, X. (2015). Anti-gravity gradient unique arc behavior in the longitudinal electric magnetic field hybrid tungsten inert gas arc welding. *The*



International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84: 647–661.
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7728-4>

Madavi, K. R., Jogi, B. F., & Lohar, G. S. (2022). Metal inert gas (MIG) welding process: A study of effect of welding parameters. *Materials Today: Proceedings*, 51: 690-698.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.206>

Nikzad, S., Ashuri, H., Kokabi, A., Shafizadeh, M., & Ferasat, K. (2016). Newly Developed Technique to Eliminate Hot Cracking with Electromagnetic Vibration for Joining of 2024 Aluminum Alloy. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 5(1): 7-15.
<https://doi.org/10.1007/s13632-016-0255-3>

Pathak, D., Pandey, S. P., Singh, R. P., & Balu, V. (2022). Influence of external axial magnetic field on shielded metal arc weld properties for high strength low alloy steel. *Materials Today: Proceedings*, 62: 2748-2754. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.296>

Queiroz, A. V., Fernandes, M. T., Silva, L., Demarque, R., Xavier, C. R., & Castro, J. A. (2020). Effects of an External Magnetic Field on the Microstructural and Mechanical Properties of the Fusion Zone in TIG Welding. *Metals*, 10(6): 714. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/met10060714>

Ramdani, K., & Klimecka-Tatar, D. (2024). Quality Assurance in Special Processes on the Example of the Welding Process. *Materials Research Proceedings*, 45: 67-74.
<https://doi.org/https://doi.org/10.21741/9781644903315-9>

Reis, R., Scotti, A., Norrish, J., & Cuiuri, D. (2013). Investigation on Welding Arc Interruptions in the Presence of Magnetic Fields: Arc Length, Torch Angle and Current Pulsing Frequency Influence. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41:133-139.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2012.2230650>

Thomy, C., & Vollertsen, F. (2005). Influence of Magnetic Fields on Dilution during Laser Welding of Aluminium. *Advanced Materials Research*, 6-8: 179-186.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.6-8.179>

Wang, L., Chen, J., Wu, C., & Luan, S. (2020). Numerical analysis of arc and droplet behaviors in gas metal arc welding with external compound magnetic field. *Journal of Materials Processing Technology*, 282: 116-638. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116638>

Wang, L., Chen, J., Wu, C. S., & Gao, J. (2016). Backward flowing molten metal in weld pool and its influence on humping bead in high-speed GMAW. *Journal of Materials Processing Technology*, 237: 342-350. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.028>

Wu, H., Chang, Y., Lu, L., & Bai, J. (2017). Review on magnetically controlled arc welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9): 4263-4273. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0068-9>



- Xiao, L., Fan, D., Huang, J., Tashiro, S., & Tanaka, M. (2020). 3D Numerical Study of External Axial Magnetic Field-Controlled High-Current GMAW Metal Transfer Behavior. *Materials*, 13(24): 5792. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/24/5792>
- Yin, X., Gou, J., Zhang, J., & Sun, J. (2012). Numerical study of arc plasmas and weld pools for GTAW with applied axial magnetic fields. *Journal of Physics D-applied Physics - J PHYS-D-APPL PHYS*, 45: 285203. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/28/285203>
- Zhong, Q. L., Jiang, S. Y., Chen, H. M., & Liu, P. (2012). 3D FEM Simulation Analysis for the Residual Stress to GTAW Welded Joints Based on Adscitifious Magnetic Field. *Applied Mechanics and Materials*, 138-139: 775-779. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.138-139.775>
- Zhou, B., & Takahashi, A. (2024). Implementation of Non-Backing Gas GTAW Welding for Stainless Steel Process Piping in Oil and Gas Industries Pressure Vessels and Piping Conference. PVP2024-122575: V004T06A086. <https://doi.org/10.1115/PVP2024-122575>