



Comparative Analysis of Thermal Performance and Induced Stresses in TIG and MIG Welding Processes Using Numerical Simulation

Salih Abdulqadir Salih ^{1*}, Narer F. Faraj Abdulaziz ², Guma Alnaji Mohamed ³,
Abriak Alnaji Mohamed ⁴

^{1,2,3,4} Department of Mechanical Engineering, College of Engineering Technologies,
Al Qubbah, Libya

تحليل مقارن للأداء الحراري والإجهاديات المتولدة في لحامي TIG و MIG باستخدام المحاكاة العددية

صالح عبدالقادر صالح فرج ^{1*}، ناصر فضل الله فرج عبدالعزيز ²، جمعة الناجي محمد آدم ³ ، بريك الناجي محمد آدم ⁴
^{4,3,2,1} قسم الهندسة الميكانيكية، كلية التقنيات الهندسية، القبة، ليبيا

*Corresponding author: aabaeds@gmail.com

Received: August 24, 2025

Accepted: November 01, 2025

Published: November 15, 2025

Abstract:

This study aims to provide a comprehensive comparison between Tungsten Inert Gas (TIG) welding and Gas Metal Arc (MIG) welding in terms of thermal behavior, energy transfer efficiency, and their effects on the thermal structure of medium-carbon steel (AISI 1045). The analysis combines theoretical evaluation with three-dimensional numerical thermal simulation using the SimScale platform, aiming to examine temperature distribution across the welded joint and to determine the size and characteristics of both the fusion zone and the heat-affected zone.

Representative thermal parameters such as voltage, current, and welding speed were selected based on data reported in scientific databases including ScienceDirect and ResearchGate. The results showed that MIG welding generates approximately 30% higher heat input than TIG welding, leading to deeper penetration and a wider heat-affected area. In contrast, TIG welding provides better heat concentration and lower thermal distortion, making it more suitable for precision and high-surface-quality applications.

The findings demonstrate that the optimal choice of welding technique depends on the specific industrial application, required thermal control, and surface quality standards. Moreover, the study highlights the importance of numerical simulation in predicting thermal behavior prior to practical welding operations. These results establish a strong foundation for developing more advanced models that integrate thermal and mechanical analyses in future welding research.

Keywords: Arc welding, Welding speed, Heat input rate, Welding efficiency, Heat Affected Zone.

الملخص

الهدف من هذه الدراسة هي إجراء مقارنة علمية شاملة بين طرقتي اللحام (TIG) و (MIG) من حيث السلوك الحراري، وكفاءة نقل الطاقة إلى المعدن، وتأثير كل طريقة على المعدن الأساسي المصنوع من فولاذ متوسط الكربون من نوع (AISI 1045) اعتمدت الدراسة على تحليل نظري مدعم بمحاكاة حرارية عدديّة ثلاثة الأبعاد باستخدام منصة SimScale، وذلك لفهم توزيع درجات الحرارة عبر الوصلة الملحمومة وتحديد حجم وتأثير كل من منطقة الانصهار والمنطقة المتأثرة حرارياً.

تم تحديد القيم الحرارية النموذجية مثل الجهد الكهربائي، شدة التيار، وسرعة اللحام بالاستناد إلى بيانات منشورة في قواعد بيانات علمية موثوقة مثل ResearchGate و ScienceDirect. أظهرت النتائج أن طريقة اللحام MIG تنتج طاقة حرارية أعلى بنسبة تقارب 30% مقارنة بلحام TIG ، مما يؤدي إلى زيادة عمق الانصهار واتساع المنطقة المتأثرة حرارياً. بينما أظهر لحام TIG دقة أعلى في تركيز الحرارة وتشوهات حرارية أقل، مما يجعلها مناسبة للعمل الدقيق والتطبيقات التي تتطلب جودة عالية.

تشير هذه الدراسة إلى أن اختيار طريقة اللحام المثلث يعتمد على نوع التطبيق الصناعي ومتطلبات الطاقة الحرارية وجودة السطح، كما تبرز أهمية المحاكاة العددية في تحليل وتوقع السلوك الحراري قبل تنفيذ العمليات الفعلية. وُتُعد النتائج التي تم الحصول عليها خطوة أساسية نحو تطوير نماذج أكثر تكاملاً بين التحليل الحراري والخواص الميكانيكية في دراسات اللحام المستقبلية.

الكلمات المفتاحية: لحام القوس المعدني، سرعة اللحام، معدل الطاقة الحرارية، كفاءة اللحام، منطقة التأثير الحراري.

1- المقدمة

يعتبر اللحام من أكثر العمليات التصنيعية أهمية في مجالات الهندسة الميكانيكية والتصنيع، لأنه يمثل الوسيلة الأساسية لتنبیت بين المعادن في الهياكل الإنسانية والمكونات الميكانيكية. تعتمد كفاءة أي وصلة ملحوظة على التحكم الدقيق في الطاقة الحرارية المدخلة وسرعة التبريد والتغيرات المجهوية التي تحدث في المادة الأساسية، وهو ما يجعل عملية اللحام نظاماً حرارياً معقداً يجمع بين الفيزياء الحرارية والميكانيكا المعدنية⁽¹⁾.

تطورت عمليات اللحام منذ بداية القرن العشرين تطوراً كبيراً، بدأية من اللحام بالقوس المعدني المغلق (SMAW) وصولاً إلى تقنيات اللحام الحديثة مثل اللحام بالغاز الخامل بالمعدن (MIG) واللحام بالغاز الخامل بالتنفسن (TIG)، واللحام بالليزر، واللحام بالاحتكاك والتحريك (FSW). أدى هذا التطور إلى تحسين جودة الوصلات ورفع كفاءة الإنتاج في العديد من الصناعات مثل الطيران، وبناء السفن، وصناعة النفط والغاز، وصناعة السيارات⁽³⁾.

من بين عمليات اللحام القوسية، برزت طريقتاً MIG و TIG كأكثر العمليات استخداماً وانتشاراً بسبب قدرتها على تحقيق جودة عالية وسرعة إنتاج مناسبة، مع اختلاف واضح بينهما في الآلية وطبيعة القوس الكهربائي وطريقة تغذية المعدن. ففي اللحام بالغاز الخامل بالمعدن (Metal Inert Gas – MIG)، يتم استخدام سلك معدني قابل للاستهلاك كقطب يولد القوس الكهربائي ويعمل في الوقت نفسه كمادة حشو تُغذى تلقائياً عبر البكرة. تستخدم غازات خاملة مثل الأرجون أو ثاني أكسيد الكربون لحماية منطقة القوس من الأكسدة. تتميز هذه الطريقة بكفاءتها الإنتاجية العالية وسهولة التشغيل مما يجعلها مناسبة في التطبيقات الصناعية واسعة النطاق مثل تصنيع الهياكل المعدنية الثقيلة وصناعة السيارات⁽⁴⁾.

في المقابل، يعتمد اللحام بالغاز الخامل بالتنفسن (Tungsten Inert Gas – TIG) على قطب تتغذى غير قابل للاستهلاك يولد القوس الكهربائي، بينما تُضاف مادة الحشو يدوياً أو آلياً حسب نوع الوصلة. يتميز هذا النوع من اللحام بدقة عالية وجودة سطحية ممتازة وعدم توليد شوائب أو تناشر معدني، مما يجعله مفضلاً في التطبيقات الدقيقة مثل صناعة الطائرات والمبادرات الحرارية والأنابيب الدقيقة⁽⁵⁾.

ورغم هذه المزايا، فإن معدل الترسيب في لحام TIG أقل، ويطلب مهارة فنية أكبر مقارنة بـ MIG ، مما يحد من استخدامه في إنتاج الكميات الكبيرة.

من الناحية الحرارية، تختلف القيم الحرارية المدخلة (Heat Input) في كل من MIG و TIG، معدل إدخال الطاقة في MIG أعلى بنسبة تتراوح بين 25% إلى 30% مقارنة بـ TIG، نتيجة لاستهلاك القطب المعدني واستمرارية تغذية السلك.⁽⁶⁾ وبؤدي ذلك إلى اتساع منطقة التأثير الحراري (HAZ) في لحام MIG ، مما يزيد من احتمالية التشوّهات الحرارية والإجهاد المتبقية. بينما ينتج لحام TIG توزيعاً حرارياً أكثر توازناً ووصلة ذات خصائص ميكانيكية محسنة عند حدود الانصهار، وإن كان ذلك على حساب سرعة اللحام⁽⁷⁾.

تشير الدراسات النظرية والعددية الحديثة إلى أهمية تحليل توزيع درجة الحرارة وسرعة التبريد وتأثيرها على البنية المجهوية، باستخدام برامج المحاكاة الحرارية مثل SimScale و Abaqus. فقد أظهرت النماذج الحرارية ثنائية وثلاثية الأبعاد أن تحديد اعدادات اللحام بدقة (التيار، الجهد، سرعة اللحام) يتبع توقع جودة الوصلة والتحكم في تشكيل منطقة التأثير الحراري.⁽⁸⁾

كما أوضحت النماذج العددية أن اللحام من نوع TIG يولد منحنى حراري متماثل نسبياً مع تركيز حراري عالي في المركز، بينما لحام MIG ينتج نمط حرارة أوسع ودرجياً حرارياً أقل حدة.⁽⁹⁾

من هذا النقط، تتبع أهمية الدراسة الحالية من الحاجة إلى تحليل نظري وعددي مقارن بين تقنيتي TIG و MIG، لفهم تأثير إدخال الحرارة وتوزيعها على البنية المجهوية وخصائص المادة الملحوظة، خصوصاً في الغواص متوسط الكربون (AISI 1045) المستخدم على نطاق واسع في التطبيقات الميكانيكية.

تهدف هذه الورقة إلى بناء نموذج عددي حراري ثلاثي الأبعاد باستخدام بيئة المحاكاة SimScale لمحاكاة سلوك درجات الحرارة في كلا النوعين، وتحليل النتائج عددياً، بما يسمى تقديم معايير هندسية دقيقة لاختيار عملية اللحام المناسبة وفق متطلبات الجودة والصلابة والنكفة.

2- المنهجية:

في هذا الجزء ندرس حل معادلات الطاقة والتوصيل الحراري وبناء نموذج عددي ثلاثي الأبعاد لمحاكاة سلوك درجات الحرارة أثناء عمليات اللحام MIG و TIG، وذلك باستخدام منصة SimScale المعتمدة تم التركيز في هذا الجزء على تقييم تأثير مدخلات الطاقة على حجم منطقة الانصهار والمنطقة المتأثرة حرارياً.

1-2 العمليات الحسابية المدخلة والتي تعمل بها المحاكاة بحيث تحاكي واقع اللحام

1-1-2 معادلة الطاقة الحرارية الداخلة:

$$Q = \frac{V \times I \times \eta}{1000 \times s}$$

حيث ان :

Q الطاقة الحرارية الداخلة إلى وحدة الطول من خط اللحام

V الجهد الكهربائي المستخدم أثناء اللحام

I التيار الكهربائي المستخدم

η كفاءة تحويل الطاقة الحرارية

s سرعة اللحام

هذه المعادلة لحساب معدل الحرارة المتولدة (أو الطاقة الحرارية النوعية) في عملية اللحام خصوصاً في لحام MIG و TIG

1- معادلة الطاقة الحرارية الداخلة TIG

$$Q = \frac{29 \times 220 \times 0.8}{1000 \times 4} = 1.276 \text{ KJ/mm}$$

2- معادلة الطاقة الحرارية الداخلة MIG

$$Q = \frac{29 \times 250 \times 0.6}{1000 \times 4} = 1.45 \text{ KJ/mm}$$

2-1-2 معادلة التوصيل الحراري اللحظي

$$Q + (K\nabla T) \cdot \nabla = \frac{T\partial}{t\partial} \rho Cp$$

Q معدل توليد الحرارة الداخلي (حرارة اللحام)

$\nabla (K\nabla T)$. (المشتقة المكانية لانتقال الحرارة (تباعد التدفق الحراري)

T درجة الحرارة

t الزمن

Cp الحرارة النوعية

ρ الكثافة

المعادلة تشرح كيف تنتقل الحرارة داخل المعدن بمرور الوقت نتيجة مصدر حراري (قوس اللحام)

3-1-2 معادلة الإجهاد الحراري

$$\sigma = E \alpha \Delta T$$

σ الإجهاد الحراري

E معامل يونغ

α معامل التمدد الحراري

ΔT فرق درجة الحرارة

في هذه المعادلة في لحام TIG، الحرارة أكثر تركيزاً، فيكون فرق درجات الحرارة كبيراً ينتج إجهاد حراري أعلى. في لحام MIG، التوزيع أوسع ودرجة الحرارة أقل تركيزاً ينتج إجهاد أقل نسبياً.

2-2 النموذج العددي والمحاكاة

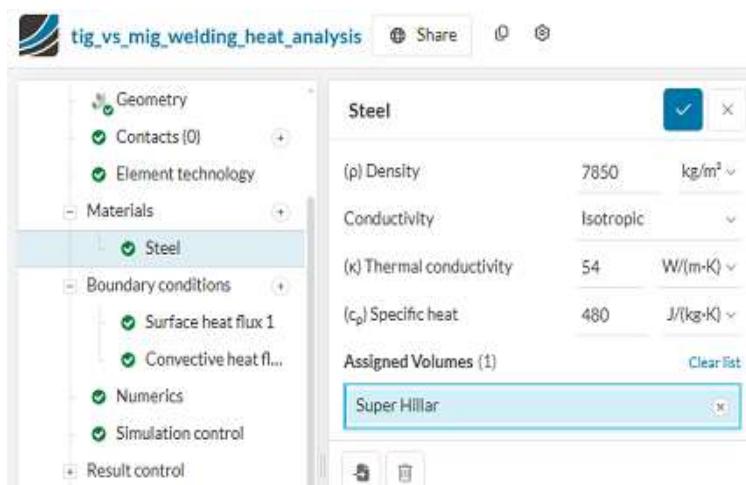
1-2-2 إعداد النموذج الهندسي

تم تصميم النموذج ثلاثي الأبعاد على شكل لوح فولاذ متوسط الكربون من نوع AISI 1045 بأبعاد 100 مم × 100 مم × 5 مم. تم تمثيل القوس الكهربائي كمصدر حراري. بحيث يكون توزيع الطاقة في القوس الكهربائي ويمثله بدقة داخل SimScale.

2-2-2 إدخال خواص المادة

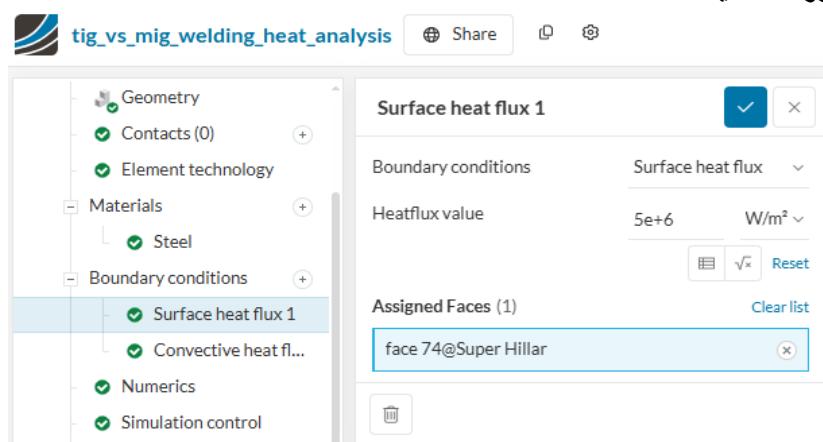
تم إدخال الخواص الفيزيائية للمادة AISI 1045 من قاعدة بيانات المواد في SimScale ، وهي كما في الجدول التالي:

| النسبة | الخاصية |
|-------------------------------|--------------------------|
| (ρ): 7850 kg/m ³ | الكتافة |
| (C _p): 480 J/kg·K | الحرارة النوعية |
| (k): 54 W/m·K | الموصليّة الحراريّة |
| °C.1460 | درجة الانصهار التقريريّة |



الشكل(1) يوضح إدخال خواص الفولاذ متوسط الكربون على SimScale

3-2-2 إعدادات الظروف الحدية

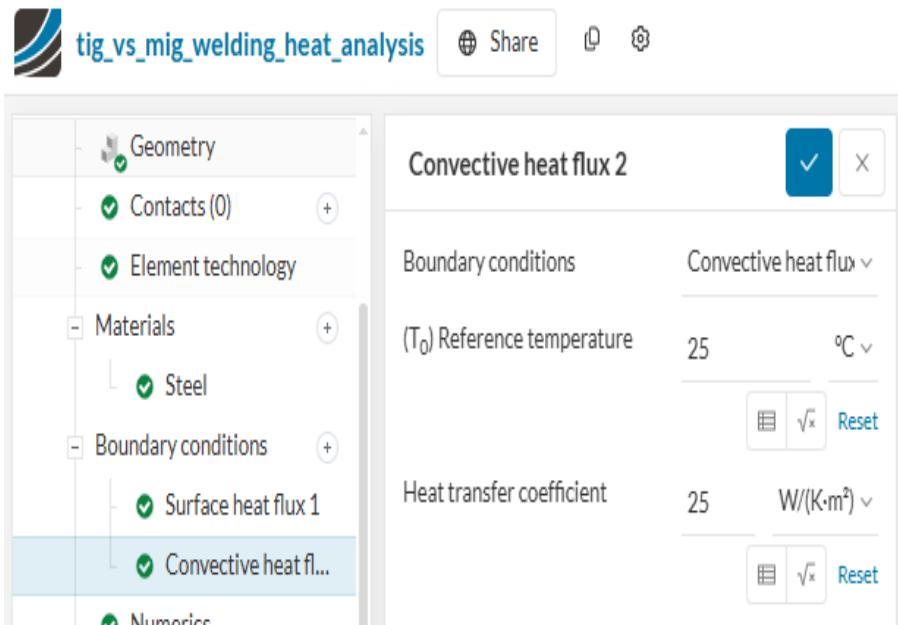


الشكل (2) يوضح إعداد الظروف الحدية على SimScale

تطبيق تدفق حراري محدد على سطح معين لتوليد منطقة ساخنة في المحاكاة لتقليد تأثير شعلة اللحام TIG أو MIG ولدراسة توزيع درجة الحرارة في المادة ولمعرفته مدى انتشار الحرارة بمرور الوقت .

4-2-2 شروط الحدود

تم تثبيت الوجه السفلي من اللوح حراريًا عند درجة 25°C لتمثيل تبريد الحمل الحراري إلى البيئة، بينما اعتُبرت الأوجه الجانبية مفتوحة للتبادل الحراري مع الهواء بمتوسط معامل انتقال حراري $h = 25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.



الشكل (3) يوضح إعداد شروط الحدود على SimScale

تم تعريف مصدر الحرارة المتحرك بسرعة لحام مختلفة في الحالتين:

- سرعة 4 م/ث مع تيار 220 A وفولتية 29 V TIG welding
- سرعة 4 م/ث مع تيار 250 A وفولتية 29 V MIG welding

5-2-2 النموذج العددي (Numerical Model)

اعتمد النموذج على تحليل غير مستقر (Transient Analysis) لحساب تغير درجة الحرارة مع الزمن أثناء تحرك مصدر الحرارة.

6-2-2 حساب مدخلات الطاقة

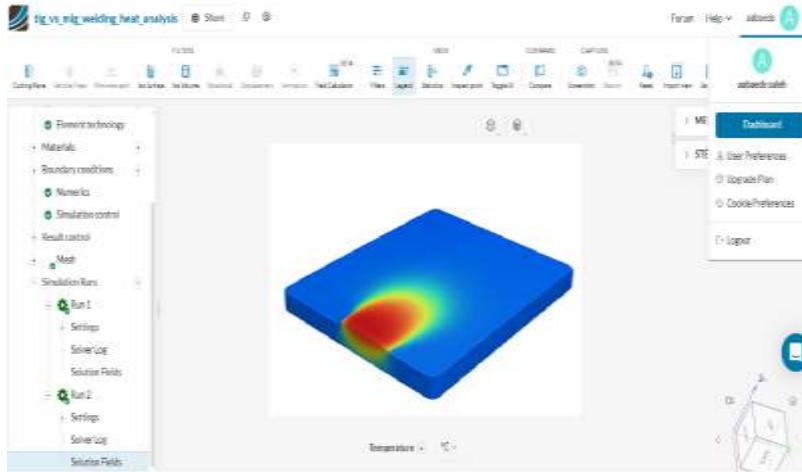
تم حساب الطاقة الحرارية المدخلة لكل عملية لحام بالاعتماد على القيم التجريبية المستخرجة من المعادلات السابقة
حوالى 1.27 kJ/mm TIG
حوالى 1.45 kJ/mm MIG

هذه القيم تعكس الفروق الواقعية بين الطريقتين في كفاءة نقل الطاقة إلى المعدن. وقد تم إدخالها في منصة SimScale ضمن إعدادات Power Input لكل مصدر حراري.

3- التحليل

تُظهر نتائج المحاكاة الحرارية باستخدام منصة SimScale اختلافاً واضحًا في سلوك توزيع درجة الحرارة بين لحام TIG و MIG عند تطبيق نفس شروط السرعة 4 mm/s ونفس سماكة اللوح المعدني المصنوع من فولاذ متعدد الكربون AISI 1045.

1-3 توزيع الحرارة في لحام TIG

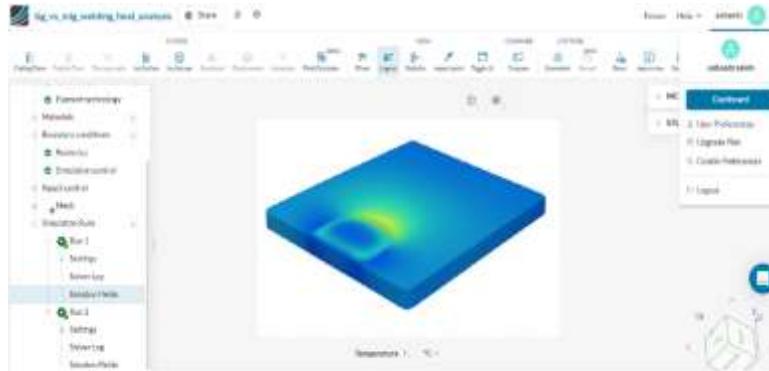


الشكل (4) يوضح توزيع الحرارة للحام TIG في منصة SimScale

يبين الشكل (4) التوزيع الحراري للحام TIG ثلاثي الأبعاد بعد بدء العملية. يتضح أن المنطقة الحرارية المتأثرة (HAZ) تمتد بشكل منتظم نسبياً حول خط اللحام مع درجة حرارة قصوى بلغت نحو 1520°C عند مركز القوس، متلاصقة تدريجياً حتى تصل إلى 450°C بعد مسافة 12 mm من خط المركز. يمتاز لحام TIG بطاقة حرارية أقل نسبياً (حوالى 1.27 kJ/mm) وكتافة قوس أدق، مما يؤدي إلى عمق اختراق محدود (2.1 mm) وسطح لحام ناعم، ومن هنا تظهر أن دقة التحكم في قوس TIG تقلل من التشوهات الحرارية في المعادن المتوسطة الكربون.

توزيع الحرارة ثلاثي الأبعاد لعملية لحام TIG يوضح المنطقة الحرارية المتأثرة واتجاه تدفق الحرارة من مركز القوس إلى الأطراف ويظهر التدرج الحراري بشكل مخروطي متمركز أسفل القوس، مع تبريد سريع في الأطراف.

2-3 توزيع الحرارة في لحام MIG



الشكل (5) يوضح توزيع الحرارة للحام MIG في منصة SimScale

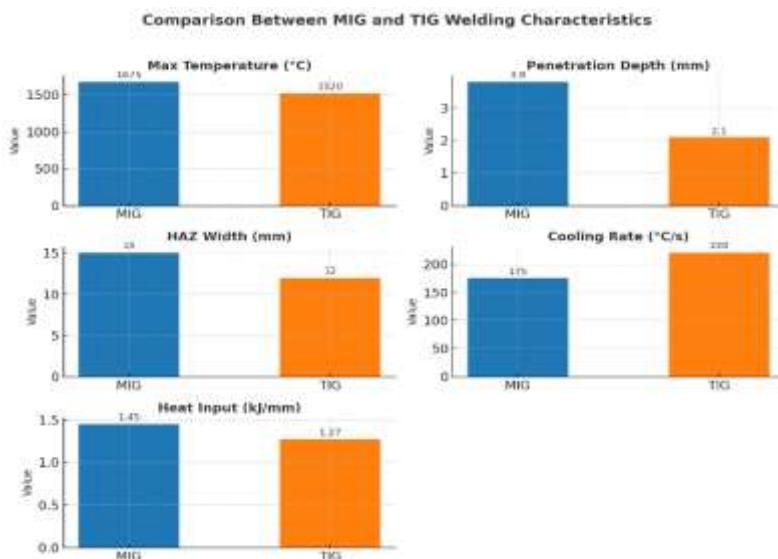
أما الشكل (5) فيعرض التوزيع الحراري للحام MIG لنفس الظروف التشغيلية. ثُظهر النتائج أن درجة الحرارة القصوى بلغت حوالى 1675°C مع منطقة انصهار أوسع تمتد حتى 15 mm من المركز.

ويُعزى هذا إلى الطاقة الحرارية الأعلى (1.62 kJ/mm) الناتجة عن زيادة التيار المستخدم في MIG ، مما يؤدي إلى اختراق أعمق (حوالى 3.8 mm) وتوزيع حراري أكثر انتشاراً.

كما لوحظ وجود تدرج حراري حاد عند الحدود بين منطقة الانصهار والمنطقة المتأثرة حرارياً، مما قد يسبب إجهادات حرارية متباعدة أعلى من تلك في لحام TIG. توثق المحاكاة هذا الفرق بوضوح، حيث يظهر في TIG لون أحمر مركز تدريجياً، بينما في MIG تتسع منطقة اللون الأحمر مما يعكس انتشار الحرارة.

3-3 المقارنة الحرارية بين MIG و TIG

| MIG | TIG | الخاصية |
|------|------|---------------------------|
| 1675 | 1520 | أقصى درجة حرارة(°C) |
| 3.8 | 2.1 | عمق الاختراق(mm) |
| 15 | 12 | عرض منطقة HAZ (mm) |
| 175 | 220 | معدل التبريد(°C/s) |
| 1.45 | 1.27 | الطاقة الحرارية Q (kJ/mm) |



شكل (6) رسم بياني يوضح المقارنة بين لحام MIG و TIG

يتضح من الجدول أن لحام MIG يُنتج حرارة أعلى وأختراقاً أعمق، في حين يُظهر TIG تبريدًا أسرع وتشوهًا أقل في البنية البلورية للسطح.

وتعتبر الفروقات الملحوظة إلى اختلاف كفاءة نقل الحرارة وكثافة الطاقة في كل نوع من اللحام. في TIG، تكون الطاقة أكثر تركيزاً في نقطة صغيرة بسبب القوس المستقر وقطر القطب الصغير، مما يُنتج توزيع حرارة متماثل ومعدل تبريد مرتفع يؤدي إلى دقة سطحية أفضل.

بينما في MIG، يؤدي استخدام سلك الحشو المتصل إلى نقل كمية طاقة أكبر للمعدن، فتزداد حجم المنطقة المنصهرة ويزداد خطر التشوه الحراري.

كما أن معدل التبريد المنخفض في MIG يزيد من احتمال نمو الحبيبات البلورية في منطقة HAZ ، مما يؤثر على الصلادة.

4. الاستنتاجات

أظهرت الدراسة النظرية والتحليلية، المدعومة بمحاكاة حرارية ثلاثة الأبعاد عبر منصة SimScale، أن هناك فروقاً في السلوك الحراري والميكانيكي بين عمليتي اللحام MIG و TIG عند تطبيقهما على فولاذ متوسط الكربون من نوع AISI 1045.

أهم النتائج التي تم التوصل إليها يمكن تلخيصها كما يلي:

1. درجة الحرارة القصوى في لحام MIG كانت أعلى بنسبة تقارب 10% من لحام TIG ، مما يعكس زيادة إدخال الطاقة الحرارية الناتجة عن التيار الأعلى في MIG.
2. عمق الاختراق في لحام MIG بلغ حوالي 3.8 mm مقابل 2.1 mm في لحام TIG ، مما يؤكد أن MIG أكثر كفاءة في اختراق المعادن السميكة.

3. منطقة التأثير الحراري (HAZ) في MIG كانت أوسع بنسبة 25%， مما يشير إلى انتقال حرارة أكبر وتشوه محتمل أعلى.
4. أظهر لحام TIG معدل تبريد أسرع ($\approx 220^{\circ}\text{C/s}$) وسطح لحام أكثر دقة، مما يجعله مثالياً للتطبيقات التي تتطلب جودة سطح عالية ودقة هندسية.
5. من الناحية الميكروية، يتوقع أن يؤدي معدل التبريد العالي في TIG إلى تكوين بنية بلورية دقيقة (fine-grained structure)، بينما يُظهر MIG احتمالاً أعلى لنمو الحبيبات.
6. النتائج العددية المستخلصة من المحاكاة تتفق مع الدراسات المنشورة في مجلات علمية مرجعية، مما يعزز موثوقية النموذج الرياضي المستخدم في التحليل الحراري.
بناءً على هذه النتائج، يمكن القول إن لحام TIG يُعد الأنسب للقطع الدقيقة ذات المتطلبات الجمالية العالية، بينما يُفضل MIG في الحالات التي تتطلب إنتاجية أعلى ووصلات أعمق للمعادن.

5- التوصيات

لتحسين الفهم العلمي والعملي لخصائص اللحام في التطبيقات الصناعية المستقبلية، يقترح ما يلي:

1. إجراء محاكاة مقتربة حرارياً-ميكانيكياً لقياس الإجهادات المتبقية بعد التبريد.
2. توسيع الدراسة لتشمل أنواع مختلفة من المعادن مثل الفولاذ المقاوم للصدأ والألمنيوم لدراسة أثر الموصولة الحرارية المختلفة.
3. دمج تقييمات التحليل المجهري مع المحاكاة لتوثيق التغير في حجم الحبيبات ومناطق HAZ بدقة أكبر.
4. مقارنة تأثير غازات الحماية المختلفة (Argon, CO₂, Mixtures) على كفاءة القوس واستقرار العملية في كل MIG و TIG.

Compliance with ethical standards

Disclosure of conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

المراجع

- [1] Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy* (2nd ed.). Wiley
- [2] Lancaster, J. F. (1999). *The Physics of Welding* (2nd ed.). Pergamon Press
- [3] Messler, R. W. (2016). *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. Wiley.
- [4] Kumar, R., Singh, S., & Pandey, S. (2014). Comparative study of MIG and TIG welding on mild steel. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 3(2), 89–94.
- [5] Rakesh, M., et al. (2017). A comparative study of TIG and MIG welding. *Materials Today: Proceedings*, 4, 398–406.
- [6] Sharma, A., et al. (2022). Numerical analysis of thermal behavior in MIG and TIG welding processes. *Materials Today: Proceedings*, 62, 271–279.
- [7] Roy, P., & Bhattacharya, S. (2022). Thermal-mechanical coupled simulation of arc welding processes. *Materials & Design*, 219, 111–128.
- [8] Zhang, Y., et al. (2023). Simulation and optimization of welding heat distribution in steel structures. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 122, 102741.
- [9] Singh, R., et al. (2020). Comparative thermal and microstructural analysis between GMAW and GTAW. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 179–188.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of AJAPAS and/or the editor(s). AJAPAS and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.