International Science and Technology Journal
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
Volume 37 العدد
Part 1 المجلد
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
International Science and Technology Journal
ISTJ

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

Received	2025/08/20	تم استلام الورقة العلمية في
Accepted	2025/09/16	تم قبول الورقة العلمية في
Published	2025/09/18	تم نشر الورقة العلمية في

دراسة تأثير وسائط تبريد اللحام المختلفة على البنية الداخلية للفولاذ منخفض الكربون

دراسة عملية في المعهد العالي للعلوم والتقنية الزاوية – ليبيا

أ. عبد العظيم محمد عبد الله

قسم الهندسة الطبية – كلية التقنية الطبية – جامعة الزاوية – ليبيا

a.hadi@zu.edu.ly

الملخص

تُعَدّ عملية اللحام من أبرز العمليات الصناعية في القطاعات الهندسية والإنشائية لما لها من دور أساسي في ربط المعادن وضمان كفاءتها غير أن خصائص المعدن بعد اللحام تتأثر مباشرة بطريقة التبريد و قد يؤدي التبريد غير المناسب إلى تشوهات أو إجهادات داخلية تضعف من متانة المعدن.

تهدف هذه الدراسة إلى بيان تأثير طرق التبريد المختلفة على البنية الداخلية للصلب منخفض الكربون (0.2% كربون) بعد اللحام بالقوس الكهربي.

تم تبريد العينات بثلاثة أوساط (الهواء، الماء، الزيت) ثم فحصها بالاختبارات غير الإتلافية والتحليل المجهري بالإضافة إلى اختبار الصلادة. أظهرت النتائج أن التبريد السريع بالماء رفع الصلادة السطحية لكنه سبب إجهادات داخلية وعدم تجانس بنيوي. أما التبريد بالزيت فحقق توازنًا نسبيًا بين الصلادة والمتانة غير أن وضوح التركيب المجهري كان محدودًا. في المقابل أثبت التبريد البطيء بالهواء فعاليته في تحقيق توزيع متجانس لحبيبات الفريت والبرليت وتقليل الإجهادات رغم حدوث أكسدة سطحية طفيفة. خلصت الدراسة إلى أن التبريد بالهواء هو الأمثل للحفاظ على البنية البلورية والخواص الميكانيكية للصلب منخفض الكربون، بينما يُعد التبريد بالزيت بديلًا مقبولًا. وتوصي الدراسة بتوسيع نطاق البحوث المستقبلية ليشمل تحليلًا متقدمًا باستخدام تقنيات مجهرية أكثر دقة، إضافة إلى دراسة تأثير معدلات تبريد وسيطة أو مركبة، وكذلك ربط النتائج بالخواص الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية: معدل التبريد، البنية المجهرية، منطقة التأثير الحراري، التبريد السريع.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

International Science and Technology Journal
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
Volume 37 العدد
Part 1 المجلد
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
International Science and Technology Journal
ISTJ
http://www.doi.org/10.62341/amas1098

Study of the Effect of Welding Cooling Methods on the Microstructure of Low-Carbon Steel

Practical study at the Higher Institute of Science and Technology, Zawia - Libya

. Abdul-Azim Muhammad Abdullah
Department of Biomedical Engineering - Faculty of Medical Technology - University of Zawia - Libya
Abstracta.hadi@zu.edu.ly

Abstract

Welding is one of the most important industrial processes in engineering and construction sectors due to its vital role in joining metals and ensuring their performance.

Even tough, the mechanical and structural properties of metals after welding are directly affected by the cooling method, improper cooling may cause distortions or internal stresses that weaken durability. This study aims to investigate the effect of different cooling methods on the microstructure of low-carbon steel (0.2% C) after arc welding, the welded samples were cooled in three media (air, water, oil) and then examined using non-destructive tests, microscopic analysis, and hardness measurements.

The results showed that rapid water cooling increased surface hardness but caused significant internal stresses and non-uniform distribution of ferrite and pearlite. Oil cooling provided a relative balance between hardness and toughness, yet the microstructural details were less clear. In contrast, slow air cooling provides most effective result, it is producing a uniform ferrite–pearlite structure and minimizing internal stresses, despite slight surface oxidation. The study concludes that air cooling is the optimal method for preserving the crystalline structure and mechanical properties of low-carbon steel after welding, while oil cooling may be considered an alternative cooling method. The study recommends broadening the scope of future research to encompass advanced analyses employing more precise microscopic techniques, as well as examining the influence of intermediate or hybrid cooling rates, and establishing correlations between the obtained results and the corresponding mechanical properties.

Keywords: cooling rate, microstructure, heat-affected zone, rapid cooling.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

مقدمة

تُعَدّ عملية اللحام من العمليات الأساسية في الصناعات الهندسية والإنشائية نظرًا لأهميتها في ربط المعادن وضمان كفاءتها في ظروف التشغيل المختلفة، إلا أن خصائص المعدن الميكانيكية والبنيوية بعد اللحام تتأثر بدرجة كبيرة بطريقة التبريد، حيث إن التبريد السريع قد يؤدي إلى نشوء إجهادات داخلية وتشوهات بنيوية تحد من المتانة والاستقرار، بينما يساهم التبريد البطيء في تحسين توزيع الحبيبات وتقليل العيوب البنيوية (Science Direct، 2018).

ويُعَدّ الصلب منخفض الكربون (0.2% كربون) من أكثر السبائك الحديدية استخدامًا في التطبيقات الصناعية مثل الجسور، خطوط الأنابيب، الهياكل المعدنية، وعربات النقل، نظرًا لسهولة تشكيله وقابليته للحام (Research Gate، 2018). غير أن هذه المزايا ترتبط ارتباطًا وثيقًا بمدى التحكم في أسلوب التبريد بعد عملية اللحام، مما يستدعي دراسة معمقة لوسائط التبريد المختلفة مثل الهواء، الماء، والزيت.

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير وسائط التبريد على البنية المجهرية للفولاذ منخفض الكربون، من خلال اختبارات غير إتلافية، وفحوصات مجهرية، وقياسات الصلادة. وتسعى إلى تحديد الوسط الأمثل الذي يحقق توازنًا بين الصلادة والمتانة ويحافظ على التركيب البلوري (JEIRES، 2022). وتتميز هذه الدراسة عن معظم البحوث السابقة بتركيزها على العلاقة المباشرة بين التبريد والبنية الداخلية للفولاذ، وليس فقط على الصلادة أو التحولات الطورية (Springer Open، 2024).

أهمية الدراسة

تعد دراسة تأثير طرق تبريد اللحام على البنية الداخلية للصلب منخفض الكربون ذات أهمية خاصة نظرًا لاستخدامه الواسع في الصناعات الهندسية والإنشائية (أحمد مجيد رشيد، 2025؛ علي الهادي، 2019). إذ ينعكس أسلوب التبريد مباشرة على الخصائص الميكانيكية مثل الصلادة، المتانة، مقاومة الكسر، والاستقرار البنيوي للمعدن (Mao et al., 2019؛ حسين وآخرون، 2010). وتساعد هذه الدراسة في تحديد الطريقة المثلى للتبريد بما يضمن جودة أعلى للخامات ويحد من العيوب البنيوية كالتشققات والمسامية والتشوهات (Martínez-López et al., 2023؛ جاسم وآخرون، 2018). كما تساهم النتائج في تحسين موثوقية القطع في التطبيقات الحرجة مثل الهياكل المعدنية وخطوط الأنابيب، وتقليل التكاليف الناتجة عن الصيانة أو إعادة التصنيع (Zhu et al., 2025؛

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

هاشم إبريك ومنصور بن عروس، 2023). إضافة إلى ذلك، تدعم الدراسة تطوير تقنيات الفحص غير الإتلافي لاكتشاف أي تغيرات مجهرية أو عيوب خفية بعد عمليات اللحام والتبريد، مما يعزز من موثوقية العمليات الصناعية (Moinuddin et al., 2025؛ أبو القاسم الشيخ، 2013).

أهداف الدراسة

تهدف هذه الدراسة إلى إجراء سلسلة من التجارب على عينات من الصلب منخفض الكربون يتم لحامها بالقوس الكهربي ثم تبريدها بطرق مختلفة، وذلك للتعرف على التغيرات البنيوية والميكانيكية الناتجة (Putra et al., 2023؛ أحمد فرج باكير ومعمر بن عيسى، 2023). كما تسعى إلى تحليل الاختلافات بين الخصائص الظاهرية والداخلية للعينة وفقًا لطريقة التبريد المستخدمة، بما يتيح تحديد أنسب الطرق للحفاظ على جودة المعدن (Callister & Rethwisch, 2018؛ منكيلة ويوسف، 2021). ويهدف البحث كذلك إلى تقييم مدى فاعلية أساليب الفحص المجهري وغير الإتلافي في الكشف عن التغيرات، وتقديم توصيات عملية تساهم في تطوير عمليات اللحام وتحسين الاعتمادية في التطبيقات الصناعية المختلفة (Caruso & Godet, 2010؛ الحديدي، 2012).

الدراسات السابقة

بحثت دراسة Science Direct (2018) في تأثير ظروف التبريد المختلفة على إعادة التبلور والنمو الحبيبي للفولاذ منخفض الكربون بعد إعادة التسخين، وأظهرت أن التبريد السريع بالماء يؤدي إلى صلادة أعلى نتيجة تكون المارتنسيت، لكن على حساب زيادة الهشاشة، بينما التبريد البطيء بالهواء يحافظ على حجم الحبيبات ويقلل الإجهادات الداخلية (Science Direct, 2018). ، حللت دراسة Research Gate (2018) تأثير التبريد بالماء والزيت والهواء على البنية المجهرية وسلوكيات الشد والصلادة في معادن لحام الفولاذ منخفض الكربون، ووجدت أن التبريد بالماء أعطى أعلى صلادة، لكن التبريد بالهواء والزيت أظهر خواص مطيلية أفضل مع احتفاظ نسبي بالتركيب الميتالوجرافي الأصلي (Research Gate, 2018).

أجرت دراسة EIRES (2022) لمقارنة كمية بين التبريد في الماء والزيت والهواء من حيث توزيع الصلادة عبر مقطع العينة، وأكدت أن التبريد البطيء بالهواء يقلل التدرج في الخواص الميكانيكية عبر السمك (JEIRES, 2022). ، و اظهرت دراسة Research

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

Gate (2023)تأثير وسط التبريد على الصلادة والتغيرات المجهرية في فولاذ S45C أثناء المعالجة الحرارية، وأكدت أن التبريد السريع يرفع الصلادة بشكل ملحوظ لكنه يسبب إجهادات داخلية عالية وتشققات سطحية محتملة .(Research Gate, 2023)، قامت دراسة Hrcak (2023) بتحليل التأثير المزدوج لوسيط التبريد ودرجة حرارة ما بعد اللحام على البنية البلورية، وأشارت إلى أن الجمع بين تبريد بطيء ومعالجات لاحقة يمكن أن يحسن مقاومة التآكل ويحافظ على البنية الأصلية.(Hrcak, 2023)، ركزت دراسة Springer Open (2024)على ربط سرعة التبريد بالتحولات الطورية في الفولاذ، وبيّنت أن التبريد البطيء يقلل من التشوهات البنيوية ويحافظ على التوزيع المتجانس لحجم الحبيبات، وهو ما يقترب من نتائج الدراسة الحالية.(Springer Open, 2024)، وضحت دراسة MDPI (2025)التغيرات المجهرية في الفولاذ منخفض الكربون تحت ظروف تبريد مختلفة، وبيّنت أن تبريد الزيت يعطي توازنًا مقبولًا بين الصلادة والمطيلية، لكنه قد ينتج مناطق غير متجانسة في البنية المجهرية، خصوصًا قرب مناطق اللحام

التعقيب على الدارسات والابحاث السابقة.

معظم الدراسات السابقة ركزت على تأثير سرعة التبريد في الصلادة أو التحولات الطورية، مع الإشارة المحدودة للجوانب المجهرية غير أن القليل منها تناول مدى محافظة طرق التبريد على التركيبة البلورية للفولاذ منخفض الكربون بعد اللحام. ما يميز الدراسة الحالية هو تركيزها على هذا الجانب تحديدًا وربطه بوسيلة التبريد. وقد بينت النتائج أن التبريد البطيء بالهواء يقلل تباين حجم الحبيبات بين السطح والعمق وبذلك أضافت الدراسة بُعدًا جديدًا يتمثل في تحليل استقرار البنية البلورية بدقة عبر المقطع.

منهجية الدراسة

اعتمدت الدراسة على منهج تجريبي عملي حيث تم اجراء الدراسة في ورش المعهد العالي للعلوم والتقنية، تم في هذه الدراسة اختيار عينات من الصلب منخفض الكربون (0.2%) وتجهيزها بإجراء اللحام بثلاثة أنواع من الوصلات هي (تراكبية، تناكبية، وحرف T.)

عُرضت العينات لثلاث طرق تبريد مختلفة باستخدام الهواء والماء والزيت لدراسة تأثير معدلات التبريد المتباينة على البنية المجهرية.

تم إجراء اختبارات غير إتلافية للكشف عن جودة اللحام باستخدام الصبغة النافذة (Penetrant Testing) للكشف عن العيوب السطحية.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

كما جرى فحص العينات باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح لمقارنة التركيب البلوري الناتج مع المعدن الأساسي قبل اللحام.

تمت دراسة التغيرات في حجم الحبيبات وحدودها من السطح إلى العمق لتحديد تأثير التبريد على خصائص المعدن.

وبذلك اعتمدت المنهجية على الربط بين طرق اللحام والتبريد والاختبارات المجهرية والميكانيكية للوصول إلى نتائج دقيقة.

الدراسة العملية

تتلخص الدراسة العملية بأخذ عينات من الصلب المنخفض الكربون 0.2 % وإجراء عمليات اللحام بثلاثة طرق على المعدن وهي (تراكبية – تناكبية – حرف T) وتبريد العينات بثلاثة موائع (الهواء – الماء – الزيت) (أحمد فرج باكير ومعمر بن عيسى، 2023؛) كما تم إجراء عمليات الكشف عن جودة اللحام باستخدام الصبغة النافذة (Dye Penetrant Testing) وفحص التركيب البلوري للعينات بالمجهر الإلكتروني، وذلك لمقارنتها بالتركيب البلوري للمعدن الأصلي (Moinuddin et al., 2025).

يُظهر الصلب المنخفض الكربون خصائص مشابهة للحديد الطري، إذ يتميز بسهولة التشكيل، بينما يؤدي ارتفاع محتوى الكربون إلى زيادة الصلادة والقوة مع انخفاض الاستطالة وصعوبة اللحام (الحديدي، 2012؛ أحمد مجيد رشيد، 2025).

ويُستخدم هذا النوع من الصلب على نطاق واسع في مكونات الشاحنات والمركبات والروافع والجسور والهياكل الأخرى المصممة لتحمل مستويات عالية من الإجهاد عند درجات الحرارة المرتفعة والمنخفضة جدًا (Zhu et al., 2025؛ حسين وآخرون، 2010). وتشمل تطبيقات هذا النوع من الصلب أيضًا أنابيب البترول والغاز، وهياكل الماكينات، ومستودعات التخزين مثل خزانات النفط الخام والغاز المسال، بالإضافة إلى فواصل النفط وعربات السكك الحديدية، وغيرها من التطبيقات الصناعية (Mao et al., 2019؛ أبو القاسم الشيخ، 2013).

المعدن موضوع الدراسة: الصلب منخفض الكربون

الصلب منخفض الكربون (0.2% كربون) يُعد من السبائك الحديدية الأساسية التي يشكّل الكربون العنصر السبائكي الرئيسي فيها، ويُصنّف الصلب على أنه "صلب كربوني" عندما لا يُشترط وجود حد أدنى من العناصر السبائكية الأخرى مثل الكروم، الكوبالت، النيكل،

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

الموليبدينوم، الفاناديوم، أو غيرها، شريطة ألّا تتجاوز نسبة النحاس فيه 0.40%، أو محتوى المنجنيز 1.65%، والسيليكون 0.60% (Callister & Rethwisch, 2018؛ الحديدي، 2012). كما يُطلق أحيانًا مصطلح "الصلب الكربوني" على أي نوع من الصلب غير المقاوم للصدأ حتى وإن احتوى على نسب محدودة من العناصر السبائكية (أبو القاسم الشيخ، 2013).

تزداد صلادة الصلب وقوته الميكانيكية مع ارتفاع نسبة الكربون فيه، خاصة بعد المعالجات الحرارية، إلا أن ذلك يقابله انخفاض في ليونته وقابليته للتشكيل (منكيلة ويوسف، 2021؛ كما أن قابلية اللحام تنخفض مع زيادة محتوى الكربون في حال عدم إجراء المعالجات الحرارية، وقد يؤدي ارتفاع نسبة الكربون إلى خفض درجة انصهار السبيكة (Martínez-López et al., 2023؛ حسين وآخرون، 2010).

يُعد الكربون العامل الرئيس في التحكم بخواص الصلب الميكانيكية، حيث تذوب ذراته في المواقع البينية لشبكة الحديد ذات البنية المكعبة متمركزة الجسم. (BCC)هذا التوزع الذري يعيق حركة الانخلاعات داخل البنية البلورية، مما يساهم في تقوية السبيكة. ولتحريك هذه الانخلاعات يلزم بذل جهد ميكانيكي مرتفع، نتيجة التشوهات الناتجة عن وجود ذرات الكربون البينية التي تسبب اضطرابًا في خلايا الحديد (Zhu et al., 2025؛ 2025).

و الجدول رقم (1) يوضح التركيب الكيميائي ونسبة السبائك في الصلب الكربوني المستخدم في هذه الدراسة. كما يوضح الجدول رقم (2) بعض الخواص الميكانيكية والفيزيائية للصلب الكربوني.

جدول رقم (1) التركيب الكيميائي لعينات الصلب الكربوني المنخفض الكربون(C25)

C	Si	S	Mn	Ni
0.1952	0.299	0.0094	0.656	0.081
Cr	Ti	Pb	Zn	Fe
0.139	0.0030	0.0037	0.0056	98.44

(أحمد مجيد رشيد، 2025؛ Callister & Rethwisch, 2018)

جدول (2) الخواص الميكانيكية والفيزيائية للصلب منخفض الكربون المستخدم في الدراسة

الحديدي، محمود (2012). **علم المعادن والهندسة المعدنية، دار الفكر العربي**

	الخاصية	القيمة / المدى	الملاحظات
1	درجة الانصهار	700 – 850 °م	أقل من الصلب النقي نتيجة وجود الكربون والشوائب
2	محتوى الكربون	0.2%	يصنف ضمن الصلب منخفض الكربون
3	الكثافة	7.75 – 8.0جم/سم^3	متوسطة مقارنة بالسبائك الفولاذية الأخرى
4	النمط البلوري	مكعب مركزي الجسم (BCC)	مستقر في درجة حرارة الغرفة

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

5	معامل الاكتظاظ الذري	0.68	يعكس نسبة شغل الذرات داخل الخلية
6	نصف القطر الذري	0.23أنجستروم	لقيمة الذرة المفردة للحديد
7	مقاومة الشد	250 – 400 ميغاباسكال	تزداد مع المعالجات الحرارية والتشوهات الباردة
8	المرونة (معامل يونغ)	190 – 210 غيغاباسكال	يمثل صلابة المادة تحت التحميل
9	الصلادة(برينيل)	120 – 180 HB	منخفضة مقارنة بالصلب المتوسط والعالي الكربون
10	الموصلية الحرارية	60 – 50واط/م.ك	جيدة نسبيًا لتفريغ الحرارة
11	المقاومة الكهربائية	$9.7 – 10.5 \times 10^{-8}$ Ω.m	متوسطة مقارنة بالمعادن الأخرى

المعالجة الحرارية للصلب منخفض الكربون والتغير في أطوار الصلب

الغرض من المعالجة الحرارية للصلب الكربوني هو تغيير الخصائص الميكانيكية للصلب، وخاصة الليونة والصلادة ومقاومة الخضوع أو مقاومة الصدمات، لكن تأثيرها على الموصلية الكهربائية والحرارية محدود (الحديدي، 2012؛)

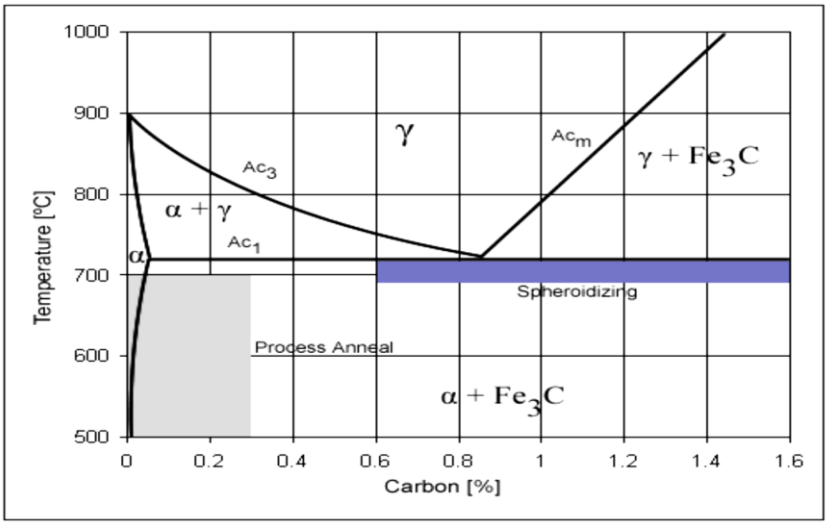
الصلب لديه قابلية أعلى لإذابة الكربون في طور الأوستنيت، وبالتالي كل المعالجات الحرارية ما عدا تكوير السمنتيت والتخمير دون الحرج تبدأ بتسخين الصلب إلى طور الأوستنيت (Caruso & Godet, 2010؛ أبو القاسم الشيخ، 2013). المعدل الذي يتم تبريد الصلب فيه من خلال تفاعل الأيوتيكتويد يؤثر على المعدل الذي يغادر فيه الكربون الأوستنيت. انظر الى الشكل (1).

وبصفة عامة، عند التبريد السريع للأوستنيت ستكون البنية المجهرية المتكوّنة هي حبيبات البرليت الصغيرة الحجم حتى يصل إلى درجة الحرارة الحرجة التي يتكون عندها المارتنسيت، في حين أن التبريد البطيء سيعطي حبيبات برليت كبيرة الحجم (Mao et al., 2019؛ أحمد مجيد رشيد، 2025).

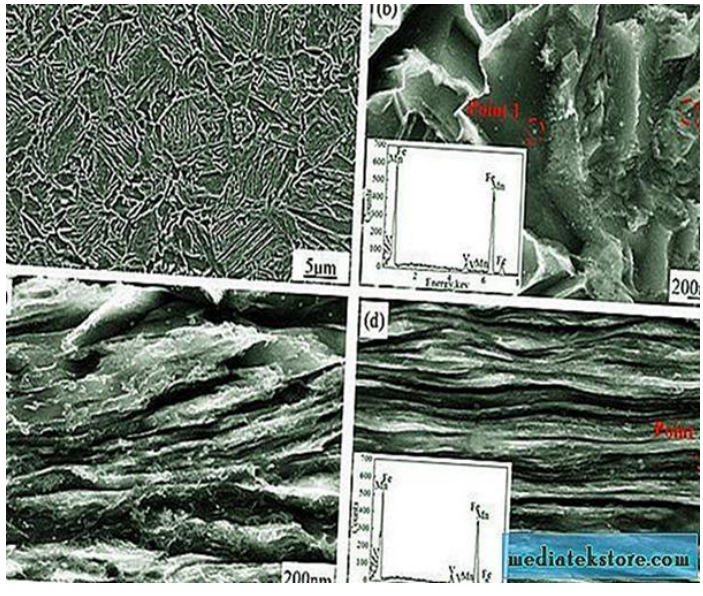
عند تبريد الصلب الذي يحتوي على كربون أقل من 0.77%، ستكون البنية المجهرية لحبيبات الصلب من البرليت مع وجود الفيريت على حدود الحبيبات. أما إذا زاد محتوى الكربون عن 0.77% فستكون البنية المجهرية لحبيبات الصلب من البرليت مع وجود السمنتيت على حدود الحبيبات (منكيلة ويوسف، 2021؛ Martínez-López et al., 2023). انظر الى الشكل (2).

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098



شكل (1) يوضح م ا رحل تحول الصلب المنخفض الكربون
(allister, W. D., & Rethwisch, D. G., 2018, M)



الشكل رقم (2) الثبات الحراري للصلب منخفض الكربون .{Caruso, M., & Godet, S}
(200)

توصيف المجهرية

التحضيرات المجهرية وتحليل التركيب الكيميائي

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

تم تلميع العينات الخاصة بالدراسات المجهرية لتعكس النهاية السطحية باستخدام إجراءات الفحص المعياري للمعادن، والتي تتضمن استخدام ورق SiC ذو خشونة سطحية متفاوتة، تليها عملية التلميع النهائي باستخدام معجون الماس بحجم جسيمات 2.5 ميكرون (Callister & Rethwisch, 2018؛ الحديدي، 2012).

تم حفر العينات المصقولة بمحلول ناتج بنسبة 4٪، ورُصِدت باستخدام مجهر Zeiss Ultra 55 SEM بجهد تسارع 15 كيلو فولت (Mao et al., 2019؛ Martinez-) لوحظ أن الجزء الأكبر من العينة يمثل سمك 4/1، كما تم الحصول على تجانس مجهري عالي على طول السماكة نتيجة الخفض الكبير بواسطة الدلفنة الباردة (أحمد مجيد رشيد، 2025).

تم تحديد التركيب الكيميائي للرواسب من خلال التحليل الطيفي للأشعة السينية (EDX) مع جهد تسارع 15 كيلو فولت وحجم تحقيق فوري أصغر من 10 نانومتر (Zhu et al., 2025؛ أبو القاسم الشيخ، 2013).

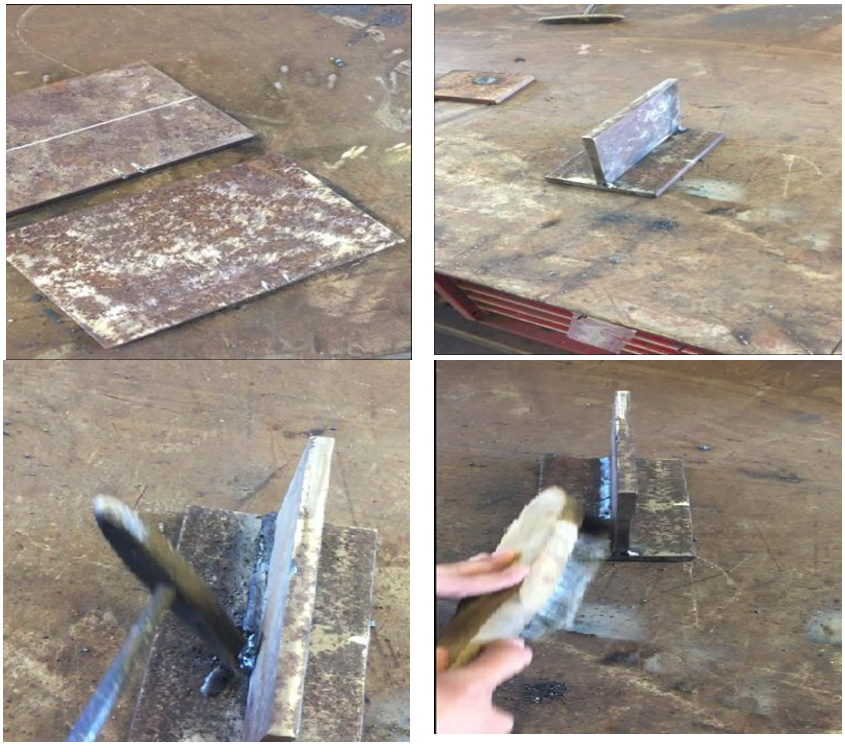
كما تمت دراسة الحسابات النظرية المتعلقة بتطور المراحل المختلفة مع درجة الحرارة، مثل الفيريت، السمنتيت، وVC وN، باستخدام برنامج Thermo-Calc مع قاعدة بيانات TCFE6 لحساب الديناميكا الحرارية في حالة التوازن, (Moinuddin et al., 2025).

خطوات اعداد العينات

- بعد اختيار العينات المطلوبة للدراسة يتم اختيار آلة قطع المعادن ذو الرأس المتحرك و المزودة بمصدر التبريد للمحافظة على خصائص المعدن اثناء عملية القطع
- يلي ذلك عملية تنظيف العينات (انظر الى الشكل 3) ويشمل تنظيف أسطح العينات من الصدأ و الشوائب قبل عملية اللحام لإزالة ما يعلو سطحها من ملوثات واكاسيد وشوائب وتستخدم المذيبات لإزالة الزيوت والشحوم وتزال الأكاسيد ومخلفات الصدأ بالوسائل الكيميائية بالأحماض المخففة ثم التنظيف بالوسائل الميكانيكية للبرادة والفرشة المعدنية ووسائل الكشط الخفيف .

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098



الشكل رقم (3) خطوات اعداد العينات للحام

- لتجهيز الوصلات لعملية اللحام (العينات المطلوبة) يجرى تثبيت العينات في مكانها ثم اجراء اللحام في المكان المحدد حسب نوع وصلة اللحام.
- لضمان الحصول على وصلة متينة ومتماسكة بواسطة اللحام يلجأ في كثير من الاحيان عمل شغفات بأشكال مختلفة وعلى الجوانب التي عليها خط اللحام وذلك لضمان توفير فراغ مناسب لسمك القطع المراد لحامها ويكون الفراغ كافي لتغلغل المعدن المنصهر ونفاذه وتماسكه بشكل فعال.
- بعد اكمال تجهيز العينات بشكل جيد نقوم بإجراء عملية اللحام المطلوب للدراسة

الاختبارات

الاختبارات غير الإتلافيه (NDT), هي طرق لاختبار جودة اللحام باستخدام القواعد الفيزيائية لكشف العيوب والفجوات في خط اللحام دون الحاجة لتشويه أو إتلاف المشغولة (أبو القاسم الشيخ، 2013؛ Callister & Rethwisch, 2018).

الاحتياج للاختبارات غير الإتلافيه في ازدياد مستمر ومتسارع، خصوصاً مع زيادة الحاجة إلى تصنيع منتجات موثوقة وذات جودة عالية، حيث تضمن هذه الاختبارات أن كل جزء

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

من اللحام قد تم وفق المواصفات والمعايير المقبولة؛ (أحمد فرج باكير ومعمر بن عيسى، 2023). وتمتاز الاختبارات غير الإتلافيه بسرعة النتائج وموثوقيتها العالية (Zhu et al., 2025؛ حسين وآخرون، 2010)

يوجد العديد من أنواع الاختبارات غير الإتلافيه، وسيتم التركيز في هذه الدراسة على خمسة اختبارات رئيسية وهي كالتالي:

* الفحص البصري (Visual Inspection) (أبو القاسم الشيخ، 2013)
* اختبار السوائل النافذة (Liquid Penetrant Testing) (جاسم وآخرون، 2018)
* اختبار الجسيمات الممغنطة (Magnetic Particle Testing)(Mao et al., 2019)
* اختبار الموجات فوق الصوتية (Ultrasonic Testing) (Mao et al., 2019)
* التصوير الإشعاعي (Radiography) (Zhu et al., 2025)

الفحص البصري Visual Inspection

الفحص البصري هو احد طرق الاختبارات غير الإتلافيه ويتم فيه فحص جودة اللحام باستخدام البصر وبمساعدة ادوات القياس والمحددات. ويعتبر الفحص البصري من اكثر الاختبارات غير الإتلافيه شيوعاً واستخداماً. ويستخدم لفحص اللحام غير الحرج والهام و يساعد على اكتشاف عيوب اللحام مبكراً، ويمتاز بسهولة تطبيقه و سرعة اجرائه، ورخص تكلفته ، ويعتبر ذو فعالية عالية جداً لاكتشاف عيوب اللحام السطحية. كما ويمكن استخدامه خلال عملية انتاج خط اللحام بالكامل (قبل واثناء وبعد اللحام) ولكنه يحتاج الى تدريب ومهارة عالية ولا يكتشف العيوب الداخلية لخط اللحام.

استخدام الصبغة النفاذة(Dye Penetrant Testing) اللون الأحمر يوضح أماكن العيوب الموجودة باللحام كما بالشكل (4).

شكل (4) يوضح استخدام الصبغة النفاذة للكشف عن العيوب

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

تجهيز العينات للكشف المجهري

لتجهيز العينات للكشف المجهري تم استخدام جهاز نوع (ME-LUX) دقة عدسة الجهاز الكشف المجهري بين (100/0.80 -160/0) حيث يتم وضع العينة في المكان المخصص لذلك وهو عبارة عن سطح مسطح يتم وضع العينة عليه ثم يتم اختيار انسب وادق عدسة توضح تركيب المعدن ثم يتم اخذ صورة للعينة حتي يتم اخذ القراءات المطلوبة لها وذلك لغرض المقارنة بين العينات. تمر عملية تجهيز العينات للكشف المجهري ببعض الخطوات قبل الكشف المجهري.

خطوات تجهيز العينات للكشف المجهري

- قطع عينة من عينة اللحام بواسطة آلة القطع.
- يتم وضع العينة مع المسحوق للحصول على الشكل الاسطواني (حاملة العينة).
- تنظيف وتنعيم وتجفيف أسطح العينات قبل عملية الاختبار كما موضحة بالشكل (5)

شكل (5) يوضح خطوات تجهيز العينات

ويوضح الشكل رقم (6) الأجهزة و المعدات المستخدمة في اجراء اختبار الفحص المجهري وهي عبارة عن :

1) يوضح الجهاز الذي يتم وضع العينة مع المسحوق للحصول على الشكل الاسطواني (حاملة العينة).
2) العينات بعد تثبيتها داخل الحاملة
3) جهاز الميكروسكوب المستخدم في الكشف المجهري
4) عدسة جهاز الميكروسكوب

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

(2)

(1)

(4)

(3)

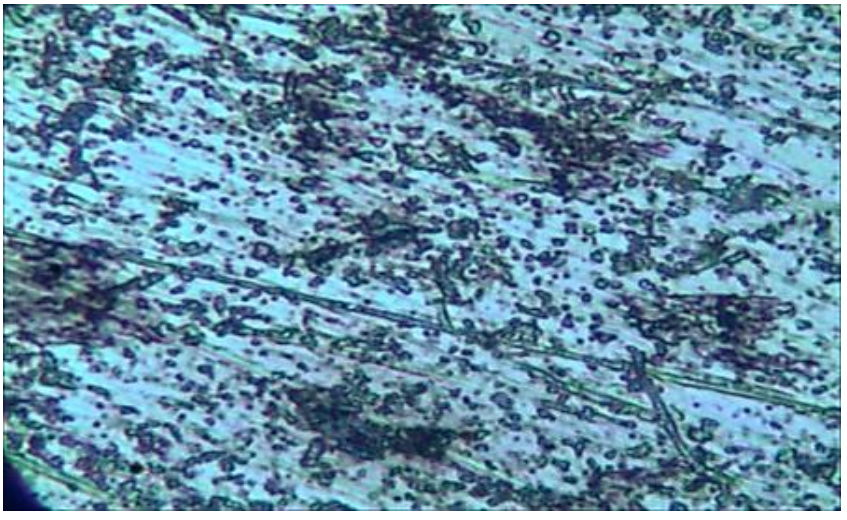
الشكل رقم (6). الأجهزة والمعدات المستخدمة في اجراء اختبار الفحص المجهري

النتائج :-

شكل (7) يوضح البنية المجهرية للمعدن الأساسي المستخدم في الاختبارات قبل عملية اللحام وعمليات التبريد المختلفة بالماء والزيت والهواء. يتبين من الصورة أن السبيكة مصنوعة من صلب منخفض الكربون لا تتجاوز نسبة الكربون فيه 0.2%، حيث يقتصر التوزيع البنائي على أطوار الفيريت (باللون الأسود) والبرليت (باللون الأبيض). كما تبدو حدود الحبيبات متجانسة وذات مظهر مائل إلى النعومة، مما يشير إلى أن المادة قد خضعت لعمليات تصنيف وتحول حراري جيدة. إضافة إلى ذلك، يظهر توزيع الفيريت والبرليت متوازنًا على امتداد حدود العينة، وهو ما يعكس استقرار البنية الداخلية للمعدن الأساسي قبل عمليات اللحام والتبريد.

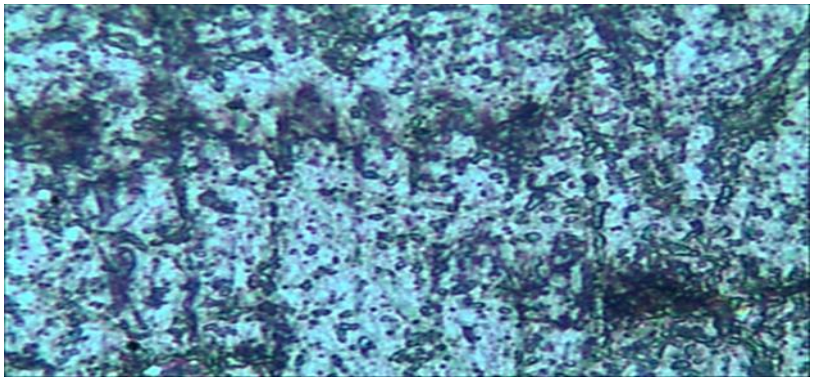
Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098



شكل (7). صورة للمعدن الأساسي

شكل (8) يوضح العينة بعد تبريدها بالماء، حيث يظهر التباين في توزيع الفيريت والبرليت من السطح باتجاه العمق ضمن المنطقة المتأثرة باللحام. ويُلاحظ أن بنية العينة أكثر خشونة عند السطح وتقل تدريجيًا نحو العمق. هذا السلوك انعكس على زيادة الصلادة في الطبقات السطحية نتيجة التكوّن السريع لوحدات الخلايا قبل أن تنتظم الذرات بشكل متوازن داخلها. أما في المناطق الأعمق، فقد تكوّنت الخلايا بعد وصول الذرات إلى حالة من الاتزان البيني. وبسبب سرعة التبريد العالية عند السطح، تصبح المساحة المتاحة لتطور الخلايا في العمق محدودة للغاية، مما يؤدي إلى حدوث انكماش ناتج عن تراكم مستويات إضافية محصورة داخل الشبكة البلورية على طول الحبيبات ممتدة في الأبعاد الثلاثة (x, y, z) ينتج عن ذلك ظهور إجهادات داخلية واضحة في البنية، كما يتضح في الصورة.

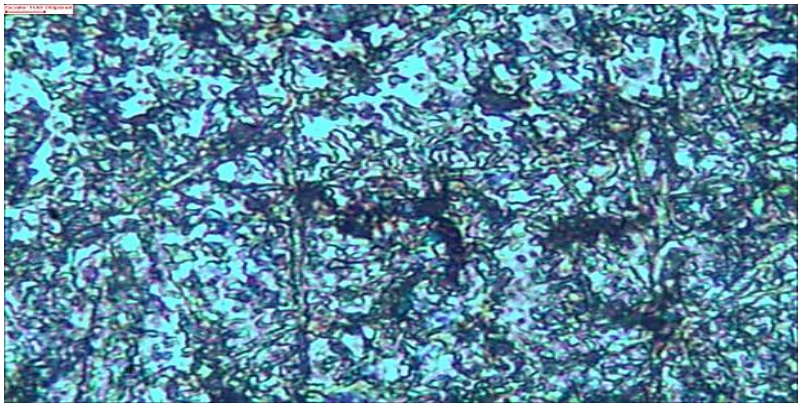


شكل (8). الصورة المجهرية للعينة بعد التبريد بالماء

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

يوضح الشكل (9) صورة العينة بعد التبريد بالهواء، حيث يظهر أن التكوين البنيوي لحدود الحبيبات من السطح إلى العمق لم يشهد اختلافات كبيرة. ويُعزى ذلك إلى بطء عملية التبريد التي وفرت وقتًا كافيًا لتشكل حدود الحبيبات والوحدات الخلوية في المنطقة المتأثرة باللحام بشكل متزامن تقريبًا. ومع ذلك، لوحظ وجود إجهادات داخلية وانكماش طفيف عند حدود الحبيبات، إلا أن تأثيرها كان محدودًا مما ساهم في تقليل مستوى الإجهاد الداخلي. كما أذى التبريد بالهواء إلى حدوث تأكسد طفيف في الطبقة الخارجية للحام، ومع ذلك تظل البنية الناتجة مقبولة وتشابه إلى حد كبير بنية العينة الأصلية.

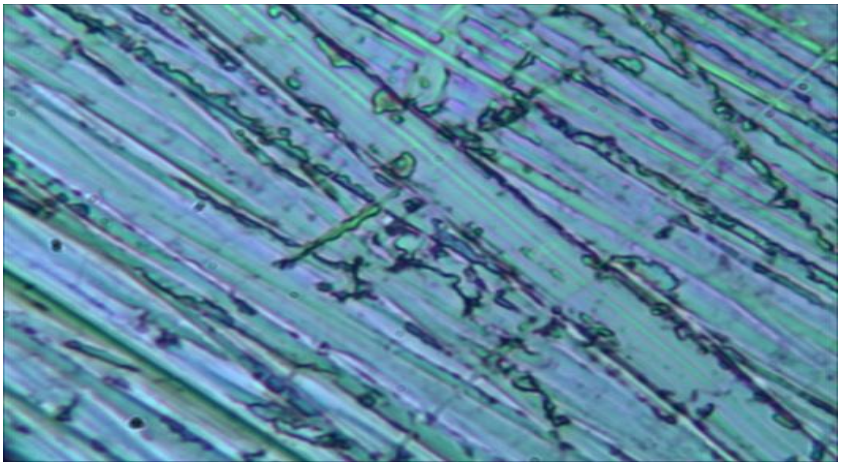


الشكل (9): الصورة المجهرية للعينة بعد التبريد بالهواء.

يوضح الشكل (10) صورة العينة بعد التبريد بالزيت، إلا أن ملامح البنية البلورية للعينة لم تكن واضحة بما يكفي لإجراء تحليل دقيق باستخدام المجهر الضوئي المتاح. الأمر الذي يستدعي استخدام مجهر إلكتروني عالي الدقة لتمييز تفاصيل التركيب المجهري بشكل أوضح.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098



الشكل (10). الصورة المجهرية للعينة بعد التبريد بالزيت

الجدول المرفق توضح النتائج والزمن وتقرير الكفاءة المتحصل عليها :-

جدول (3) يوضح زمن التبريد لعينات الصلب منخفض الكربون

طرق التبريد للعينات	زمن التبريد للعينة بالدقيقة	كفاءة الاختبار
بواسطة الماء	30	اقل كفاءة من تبريد الهواء
بواسطة الزيت	120	لم يتم قراءة العينة لعدم توفر مجهر ادق من الموجود
بواسطة الهواء	300	الأنسب والأقرب للمعدن الأساسي

الجدول (4) نتيجة اختبار الصلادة قبل المعالجة الحرارية للصلب منخفض الكربون

نوع الصلب	القيمة الاولية	القيمة الثانية	القيمة الثالثة	المتوسط
C 25	HRB 77.9	HRB 77.7	HRB 79.5	HRB 78.36

الجدول (5) نتيجة اختبار الصلادة بعد المعالجة الحرارية للصلب منخفض

وسيط التبريد	قيمة1	قيمة 2	قيمة 3	قيمة 4	قيمة 5	قيمة 6	المتوسط
هواء	HRB76.6	HRB77.7	HRB76.9	HRB77.4	HRB77.3	HRB76.4	77.05 HRB
زيت	HRB76.7	HRB82.4	HRB84.8	HRB83.0	HRB82.5	HRB84.1	82.25 HRB
ماء	HRC29.2	HRC27.4	HRC30.2	HRC30.2	HRC32.3	HRC29.2	29.77 HRC

مناقشة النتائج

أظهرت الصور المجهرية أن السبيكة قيد الدراسة هي صلب منخفض الكربون (0.2% كربون)، حيث يقتصر تركيبها البنيوي على الفريت (باللون الأسود) والبرليت (باللون

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

الأبيض). كما تميزت حدود الحبيبات بانتظامها النسبي ونعومتها، مما يعكس حدوث عملية تحول حراري متوازنة أسهمت في تحقيق توزيع متجانس لكلٍّ من الفريت والبرليت عبر مختلف مناطق العينة.

1- التبريد بالماء

يبين الشكل (8) وجود تفاوت واضح في توزيع الفريت والبرليت بين السطح والعمق ضمن المنطقة المتأثرة باللحام، حيث بدت الحبيبات أكثر خشونة على السطح مع انخفاض تدريجي في هذه الخشونة باتجاه العمق، ويُعزى ذلك إلى سرعة التبريد العالية بالماء التي سرّعت من تكوّن الخلايا قبل أن يُتاح للذرات الوقت الكافي للانتشار والوصول إلى حالة توزيع متوازن. وقد أسهم هذا السلوك في رفع صلادة السطح مقارنة بالعمق.

إلا أنّ الاستمرار في التبريد السريع أدى إلى تقليص المسافة الزمنية اللازمة لتشكل الخلايا داخل العمق، الأمر الذي ولّد انكماشات داخلية وإجهادات واضحة نتيجة احتباس الذرات في مواقع غير مستقرة ضمن الشبكة البلورية، وامتداد هذه الإجهادات في الاتجاهات البلورية الثلاثة **(x, y, z)** إلى الحبيبات المجاورة. وللتغلب على هذه المظاهر غير المرغوبة يُوصى بمعالجة العينة وفق الخط المعياري **(ACI 723c)** ثم إخضاعها إلى عملية تبريد تدريجي متعدد الوسائط (ماء، رمل، هواء، زيت) بما يضمن إعادة توزيع أفضل للحبيبات والتقليل من تراكم الإجهادات الداخلية.

2- التبريد بالهواء

يوضح الشكل (9) أن البنية المجهرية لحدود الحبيبات من السطح إلى العمق لم تشهد تغيرات جوهرية. ويُعزى ذلك إلى بطء معدل التبريد بالهواء، والذي أتاح فترة زمنية كافية لنمو الحبيبات وتشكّل الخلايا بشكل شبه متزامن في المنطقة المتأثرة باللحام. ورغم ظهور بعض الانكماشات والإجهادات الداخلية، فإنها بقيت محدودة التأثير، الأمر الذي يقلل من احتمالية حدوث تشققات أو ضعف ميكانيكي. كما لوحظت طبقة سطحية متأكسدة نتيجة التلامس المباشر مع الهواء أثناء التبريد، إلا أن البنية المجهرية الناتجة ظلت قريبة من البنية الأصلية للصلب منخفض الكربون.

3- مقارنة الصلادة

أظهرت نتائج الجدولين (6:7) و(6:7:1) أن أعلى قيمة للصلادة تحققت عند استخدام التبريد بالماء، تليها قيم أقل عند التبريد بالزيت في حين كان التبريد بالهواء الأقل صلادة. كما تبين أن قيم الصلادة تتأثر بشكل مباشر بنسبة الكربون المكوّنة للسبيكة [9] وهو ما

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

يتوافق مع ما ورد في الابحاث السابقة التي تؤكد العلاقة الطردية بين سرعة التبريد وزيادة الصلادة نتيجة تشكّل البنية المارتنسيتية أو شبه المارتنسيتية في الأسطح المعرضة لمعدلات تبريد عالية .

بشكل عام، يمكن القول إن وسائط التبريد المختلفة أظهرت تأثيرًا مباشرًا على كل من البنية المجهرية والخواص الميكانيكية. فالتبريد البطيء بالهواء حافظ على تجانس البنية و وحدّ من الإجهادات الداخلية لكنه أعطى أقل صلادة، في حين أن التبريد السريع بالماء رفع الصلادة السطحية بشكل واضح على حساب زيادة الانكماشات وضعفت المتانة. أما التبريد بالزيت فحقق توازنًا نسبياً بين الصلادة وتقليل العيوب، مما يجعله وسيطًا مناسبًا عندما يتطلب الاستخدام خواص ميكانيكية متوازنة بين المتانة والصلادة

الخلاصة

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم تأثير طرق التبريد المختلفة بعد اللحام على العيوب الفنية والبنية المجهرية للفولاذ منخفض الكربون. حيث جرى تنفيذ عمليات لحام لعدد من العينات ثم تبريدها بثلاث وسائل مختلفة: الماء، الزيت، والهواء. تم فحص هذه العينات للكشف عن العيوب الظاهرية وغير الظاهرية باستخدام تقنيات الاختبار غير المتلف، حيث شملت الفحص البصري للكشف عن العيوب السطحية، والفحص بالأصباغ النافذة لتحديد الشقوق الدقيقة والعيوب الداخلية الناتجة عن الإجهادات الحرارية والاهتزازات.

إضافة إلى ذلك، أُخذت عينات مماثلة من اللحام وجُهّزت للفحص المجهري الإلكتروني، حيث جرى الحصول على صور دقيقة للبنية البلورية ومقارنتها مع التركيب البلوري للمعدن الأساسي. وأظهرت النتائج وجود فروق ملحوظة بين العينات المبردة بالطرق الثلاث، إذ تبين أن بعض طرق التبريد تعطي تركيبًا بلوريًا أقرب إلى تركيب المعدن الأساسي، الأمر الذي يعكس أهميتها في تحسين جودة اللحام وتقليل العيوب المرتبطة به.

التوصيات

1. التبريد بالهواء: يُنصح به في الحالات التي تتطلب المحافظة على تجانس البنية الداخلية وتقليل الإجهادات المتبقية، على الرغم من انخفاض مستوى الصلادة الناتجة.
2. التبريد بالماء: يُوصى باستخدامه عندما تكون الحاجة الأساسية هي تحقيق صلادة سطحية عالية مع ضرورة إجراء معالجة حرارية لاحقة لتقليل الانكماشات والإجهادات الداخلية وتحسين المتانة.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

3. التبريد بالزيت: يُعتبر خيارًا وسيطًا مناسبًا عند الحاجة إلى توازن نسبي بين الصلادة والمتانة، حيث يحدّ من العيوب الداخلية مقارنة بالماء ويعطي صلادة أعلى من الهواء.
4. استخدام تبريد متدرج أو متعدد الوسائط: (مثل التبريد بالماء ثم الرمل أو الزيت ثم الهواء) يُوصى به كحل بديل لتحقيق توزيع متجانس للحبيبات وخفض الإجهادات المتبقية خاصة في التطبيقات التي تتطلب خواص ميكانيكية مركبة ومتوازنة

المراجع

أولا: قائمة المراجع باللغة العربية

أحمد مجيد رشيد، (2025) ، دراسة تأثير متغيرات اللحام المختلفة على خصائص الفولاذ منخفض الكربون. الجامعة التكنولوجية رسالة ماجستير.

أحمد فرج باكير و معمر مصباح بن عيسى (2023) دراسة تأثير عوامل اللحام على مقاومة الشد لوصلات ملحومة من الصلب منخفض الكربون باستخدام لحام القوس الكهربائي، مركز البحوث والدراسات العلمية، الجامعة الأسمرية الإسلامية.

هاشم إبريك و منصور بن عروس (2023) تأثير ارتفاع درجة حرارة الفولاذ على الخواص الميكانيكية وسرعة التآكل: دراسة معملية علي الحديد المستخدم في ورش الحدادة. مركز البحوث والدراسات العلمية، الجامعة الأسمرية الإسلامية.

منكيلة الحسن * ، يوسف بشيرو (2021) أساسيات مكافئ الكربون في تقييم قابلية اللحام للصلب الدقيق والفولاذ منخفض السبائك المجلد 9 العدد 4، نوفمبر لمجلة العالمية للهندسة والتكنولوجيا

علي الهادي احمد الاسود(2019) تأثير طرق تبريد اللحام في البنية الداخلية للصلب المنخفض الكربون، المجلة الدولية للعلوم والتقنية الهندسية كلية ام الربيع صرمان.العداد (7)

جاسم، أمجد رعد؛ فهد، نسرين واخرون (2018). تأثير السرعة والتيار على عيوب اللحام للفولاذ منخفض الكربون باستخدام اللحام بالقوس المعدني والغاز الخامل. مجلة جامعة بابل، العلوم الصرفة والتطبيقية والعلوم الهندسية،العداد (26).

ابو القاسم مسعود الشيخ (2013) اساسيات تقنية الورش وهندسة الانتاج

الحديدي، محمود (2012). **علم المعادن والهندسة المعدنية**، دار الفكر العربي

حسين، عباس خماس؛ جبار، محمد مهدي؛ أحمد، سحر حسين (2010). دراسة تأثير اللحام على خواص الشد والصلادة مجلة الهندسة والتكنولوجيا، العدد (28).

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/amas1098

مراجع أجنبية:

Zhu, Y., Jiang, R., Yu, C., Wu, Y., & Xiao, H., 2025, Effects of different cooling processes on the structure and properties of aluminum/steel composite plate, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 38,(7).

Moinuddin, S. Q., Khan, M. F., Alnamasi, K., Jribi, S., Radhakrishnan, K., Hameed, S. S., Muralidharan, V., & Cheepu, M., 2025, Effect of post-weld heat treatment cooling strategies on microstructure and mechanical properties of 0.3 C-Cr-Mo-V steel weld joints using GTAW process, Metals, 15(5).

Martínez-López, J., et al., 2023, Exploring the impact of cooling rate on microstructural features, mechanical properties, and corrosion resistance of a novel Nb-stabilized super duplex stainless steel in shielded metal arc welding, Crystals, 13(8).

Putra, R. T., et al., 2023, Effect of cooling media on hardness and microstructural changes in S45C carbon steel during heat treatment process, Jurnal Polimesin, 21(3).

Mao, G. J., et al., 2019, Effect of cooling conditions on microstructures and mechanical behaviors of reheated low-carbon weld metals, Materials Science and Engineering: A, 744, 671–681. https://doi.org (https://doi.org/?utm_source=chatgpt.com

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G., 2018, Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.), Wiley.

Caruso, M., & Godet, S., 2010, Microstructural evolution during spheroidization annealing of eutectoid steel: Effect of interlamellar spacing and cold working, Materials Science and Engineering.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية