



تأثير ارتفاع درجة حرارة الفولاذ على الخواص الميكانيكية وسرعة التآكل: دراسة معملية علي الحديد المستخدم في ورش الحدادة

هاشم إبريك*، منصور بن عروس، ومحمد صيدون

قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، كلية الهندسة، الجامعة الأسمرية الإسلامية، زليتن، ليبيا.

*البريد الإلكتروني: hashe1999hh@gmail.com

Effect of Temperature Steel on Mechanical Properties and Corrosion Speed: A Laboratory Study on Iron Used in Blacksmithing Workshops

Hashem Ebrik*, Mansour Benarous, and Mohamed Sidon

Department of Mechanical & Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alasmariya Islamic University, Zliten, Libya.

الملخص

في هذا البحث تمت دراسة بعض الخواص الميكانيكية للفولاذ وذلك بإجراء تجربة الشد وتجربة الصلادة وتجربة الصدم لعينات من الفولاذ (عينات مستطيلة المقطع) للحصول على الخواص الميكانيكية والفيزيائية، وذلك قبل وبعد المعالجة الحرارية وأثناء تعرض الفولاذ لدرجات حرارة مختلفة وبعد اختبار التآكل. تمت عملية المعالجة الحرارية بإجراء التخمير بتسخين العينات إلى درجة حرارة 900 م° وإبقائها مدة 45 دقيقة، وتبريد تدريجي داخل الفرن. وبعد عملية التخمير تمت عملية محاكاة قطع وتشكيل المعادن بتسخين العينات إلى درجة حرارة 250 م° وإبقائها مدة زمنية بعد تقسيمها إلى ثلاث مجموعات (30، 60، 90) دقيقة، ثم تبريد مفاجئ في ماء وزيت وتبريد تدريجي في الهواء الطبيعي. تشير النتائج إلى انخفاض الخواص الميكانيكية بعد التخمير ومن ثم اختلاف الخواص حسب وسط التبريد، ويظهر فيها أن استخدام الزيت المستعمل أكثر استقراراً منها في حالات السوائل الأخرى. تم اختبار التآكل باستخدام طريقة الفقد في الوزن لحساب معدلات تآكل الفولاذ المغمور في مياه البحر والهواء الطبيعي لمدة 90 يوم في درجة حرارة الجو الطبيعي. أظهرت النتائج أن الأوساط المستخدمة أدت إلى تآكل الفولاذ بنسب متفاوتة، وكلما زادت فترة التسخين زاد معدل الفقد في الوزن. من خلال فحص البنية المجهرية لمجموعة من العينات (عينات قبل وبعد المعالجة، وعينات عملية المحاكاة والتآكل)، أكدت النتائج المتحصل عليها أن هناك اختلاف واضح للبنية المجهرية الناتجة من الاختبارات المختلفة واختبار التآكل على العينات.



الكلمات الدالة: الخواص الميكانيكية، المعالجة الحرارية، المحاكاة، منحني إجهاد الخضوع وأقصى إجهاد والاستطالة، منحني الصدم والصلادة، التآكل.

Abstract

In this research, some mechanical properties of steel were studied by conducting a tensile test, annealing test, and an impact test on steel samples (rectangular section samples) to obtain the mechanical and physical properties, before and after heat treatment, during the operation and formation of steel, and after the corrosion test. The fermentation heat treatment process was carried out by heating the samples to a temperature of 900°C and keeping them for 45 minutes, and gradually cooling them inside the oven. After the fermentation process, the process of simulating cutting and forming metals was carried out by heating the samples to a temperature of 250°C and keeping them for a period of time after dividing them into three groups (30, 60, and 90) minutes, then a sudden cooling in water and oil and a gradual cooling in natural air. Results Decrease in the mechanical properties after fermentation, and then the difference in properties according to the cooling medium, in which it appears that the use of used oil is more stable than in the cases of other liquids. Corrosion was tested using the loss-by-weight method to calculate the corrosion rates of steel immersed in sea water and natural air for 90 days at normal ambient temperature. The results showed that the media used led to corrosion of the steel in varying proportions, and the longer the heating period, the greater the weight loss rate. By examining the microstructure of a group of samples (samples before and after treatment, simulation process and corrosion samples), the obtained results confirmed that there is a clear difference in the microstructure resulting from different tests and corrosion testing on the samples.

Keywords: Mechanical properties, Heat treatment, Simulation, Yield stress curve and maximum stress and elongation, Impact curve and hardness, Corrosion.

1. المقدمة

يمكن الحصول على الخواص الميكانيكية والفيزيائية المطلوبة للأجزاء المصنعة حسب التصميم الذي أعدت من أجله، والتخلص من معظم العيوب والمسايوي التي تنشئ أثناء التصنيع مما يقلل من الخواص الميكانيكية والفيزيائية ويقصر عمر الأداء أو الجزء المصنع إذا ما وضع مباشرة بالخدمة دون إجراء المعالجة الحرارية المناسبة. المعالجات الحرارية الأساسية ومن أهمها التلدين والمراجعة والتصليد والتطبيع كلها تهدف إلى تغيير التركيب الفيزيائي في القطعة المراد معالجتها والوصول إلى خواص محددة تتناسب مع استعمالات القطعة وظروف تشكيلها (مؤسسة التدريب التقني والمهني، 1429هـ).

عندما يتعرض الفولاذ للحرارة والتشغيل والتشكيل فإنه يمكن أن يحدث العديد من التغيرات في خصائصه الميكانيكية، وتتوقف هذه التغيرات على عدة عوامل مثل نوع الفولاذ وتركيبته ومعاملاته الحرارية. حيث يمكن أن يؤدي التعرض لهذه العوامل إلى تقليل صلابة الفولاذ وجعله أكثر عرضه



للتآكل، وتقلل قوة الفولاذ وجعله أكثر عرضه للتشوه والكسر، وكذلك تدهور مظهره الخارجي. ونتيجة ارتفاع درجة الحرارة يحدث تغير في البنية الداخلية للفولاذ وتتغير الخواص الميكانيكية والفيزيائية كذلك (هدله، 2020).

عملية التآكل من أهم المشاكل الرئيسية التي تواجه الصناعة (Trethewey & Chaberlain, 1996)، وهو الفشل الذي يصيب سطح الأجزاء المعدنية في الوسط الذي يوجد فيه بفعل الحرارة (Cattant et al., 2008). ظاهرة التآكل ظاهرة مألوفة حيث نشاهد بكثرة أجزاء فولاذية وقد أصابها الصدأ وخصوصاً تلك التي تتعرض إلى عوامل مساعدة على التآكل مثل الجو الرطب وجو المناطق الصناعية (الموسوي، 2015). ولمحاكاة هذه الظاهرة تم إجراء اختبار التآكل على مجموعة من العينات تشمل عينات قبل وبعد المعالجة وعينات التبريد بالماء والهواء والزيت بنوعيه.

2. هدف الدراسة

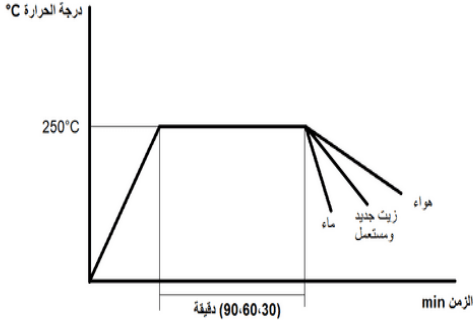
نظراً لسرعة التآكل الناتجة في الأجزاء القريبة من أماكن اللحام أو القطع في المشغولات المصنعة داخل ورش الحدادة عن الأماكن البعيدة من عمليات التشغيل، ونظراً لأن ارتفاع الحرارة في مناطق اللحام أو القطع تكون مختلفة حسب سرعة وزمن التشغيل، لذلك تهدف هذه الدراسة لمعرفة مدى تغير البنية المجهرية للمعدن واختلاف خصائصها الميكانيكية وسرعة التآكل عند تعرضها لدرجات حرارة مختلفة أثناء تشغيل المعادن، كعملية اللحام أو التجليخ أو القطع. يتم ذلك عن طريق تعريض عينات من الفولاذ لدرجات حرارة مختلفة ولفترات زمنية مختلفة، ومن ثم قياس الخصائص الميكانيكية وسرعة التآكل لكل عينة.

3. المنهجية

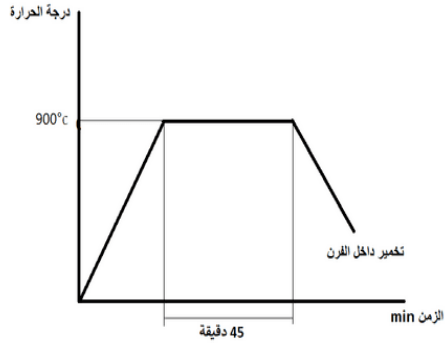
1.3. خطوات العمل

تتمثل خطوات العمل في إيجاد الخواص الميكانيكية والحصول على البنية المجهرية للعينات قبل وبعد المعالجة الحرارية وبعد عملية المحاكاة للعينات. حيث قسمنا العينات قبل المعالجة إلى مجموعتين، عينات لإجراء اختبار الشد والصلادة والصدم وعدد من العينات بدون إجراء عملية المعالجة من كامل عدد العينات، وكذلك اختبار التآكل على العينات وذلك لمعرفة مقاومة المعدن للتآكل بأخذ وزن العينات قبل إجراء الاختبار للمقارنة مع أوزانها بعد الانتهاء من إجراء الاختبار. قمنا بعملية المعالجة (التسخين) إلى درجة حرارة 900 م° لباقي عينات اختبار الصدم واختبار الشد والصلادة، وتم تبريد العينات ببطيء داخل الفرن أي قمنا بعملية التخمير كما في الشكل (1-1). بعد عملية التخمير، قمنا

بتقسيم العينات إلى أربع أقسام، حسب نوع وسيط التبريد وزمن التسخين وذلك لإجراء عملية المحاكاة عند درجة حرارة ثابتة 250 °م لجميع العينات كما في الشكل (1-ب).



شكل 1-ب. يوضح دورة عملية المحاكاة الحرارية



شكل 1-أ. يوضح دورة المعالجة الحرارية

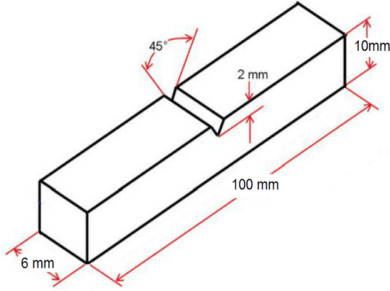
في عمليات المعالجة الحرارية تم استخدام فرن للتسخين حيث تمت عملية التخمير بالمرحة الأولى، وكذلك تم استخدام نفس الفرن لعمليات المحاكات ورفع درجة حرارة المعدن لدرجات متوسطة تبدأ من 250 °م إلى 400 °م.

2.3. تجهيز عينات الاختبار

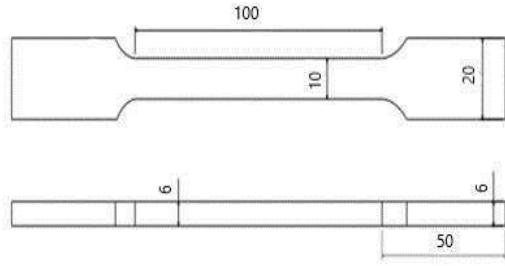
تم اختيار نوع المعدن وهو من الحديد الصلب منخفض الكربون بنسبة 0.1%، تم التأكد من مطابقته للمواصفات المطلوبة، كما تم تحديد أبعاد العينات وقطعها بواسطة جهاز القص بالليزر، حيث تقرر استخدام الأبعاد حسب نوع الاختبار.

عينات اختبار الشد والصلادة القياسية المستخدمة مستطيلة الشكل تكون بأبعاد الطول (L) 200 مم، العرض الخارجي (w_0) 20 مم، العرض الداخلي (w_1)، السمك (t) 6 مم (Kutz, 2002)؛ إمام وآخرون، 2007) ويوضح الشكل (2) عينات الشد.

عينات اختبار الصدم القياسية المستخدمة في اختبار تشاربي (Charpy Test) للصدم هي عبارة عن متوازي أضلاع، تكون أبعادها هي طول العينة (L) 100 مم، العرض (w_0) 10 مم، الحز على شكل حرف (V) عمقه 2 مم بزاوية 45°، والسمك (t) 6 مم (Kutz, 2002)؛ إمام وآخرون، 2007). ويوضح الشكل (3) صور لعينات تشاربي القياسية من الفولاذ مع توضيح الأبعاد القياسية.



شكل 3. عينة اختبار الصدم



شكل 2. عينة اختبار الشد والصلادة

3.3. الاختبارات المعملية

تم عمل مجموعة من الاختبارات على العينات لتعيين خواصها ومن اهم هذه الاختبارات اختبار الشد والصلادة واختبار الصدم باستخدام الأجهزة الموضحة في الأشكال (4-6)، استخدم خلال هذه الاختبارات مجموعة من العينات بعد تطبيق المحاكاة الحرارية ومجموعة أخرى بعد إجراء عملية التآكل.



شكل 6. جهاز الصدم



شكل 5. جهاز اختبار روكويل



شكل 4. جهاز الشد

حيث يمكن تحديد قدرة المعادن المختلفة بتحديد مقدار الإجهاد (σ) من المعادلة (1) وهو حاصل قسمة القوى العمودية على مساحة مقطع العينة الأصلي (فهي، 2005).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad \text{..... (1)}$$

وكذلك الانفعال (ϵ) من المعادلة (2) وهو حاصل قسمة التشكيل (الاستطالة أو التقلص) الحاصلة للعينة على الطول الأصلي للعينة (فهي، 2005).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad \text{..... (2)}$$



ومعامل المرونة (E) والذي يعرف بالنسبة بين الإجهاد والانفعال، ويسمى معامل يونج (E) (Young's modulus). وحدة "معامل المرونة" أو معامل يونج هي باسكال (Pa) (فهي، 2005).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad \dots (3)$$

كما يعرف أقصى إجهاد للشد (مقاومة الشد القصوى) (σ_{UTS}) بالقيمة المقاسة لأقصى حمل تستطيع المادة تحمله تساوى الحمل الأقصى الذي تعرضت له عينة الشد مقسوماً على مساحة المقطع الأصلية للعينة ويرمز إليه بـ σ_{UTS} (غيدان، 2013).

$$\sigma_{UTS} = \frac{F_{max}}{A_0} \quad \dots (4)$$

المطيلية هي قدرة المعدن على التشكل وتقاس بمطوليه المعدن تحت تأثير حمل الشد بحساب النسبة المئوية للاستطالة (El%) كالآتي:

$$El\% = \frac{\Delta L}{L_0} * 100 = \frac{L_f - L_0}{L_0} * 100 = \text{Maximum strain} * 100 \quad \dots (5)$$

تعتمد القيم الناتجة عن اختبار روكويل للصلادة على المقارنة بين قياس عمقين اختراق أداة الخدش في الاختبار عند استخدام حملين مختلفين.

عند إجراء اختبار الصدم على العينات في تحديد خاصية المتانة تحت تأثير قوة الصدم بواسطة كتلة كبيرة نسبياً متحركة، حيث يستخدم في تحديد مدى مقاومة المادة للانهار (Material Resistance) (غيدان، 2013)، بذلك تكون قيمة الطاقة الممتصة في كسر العينة "طاقة الصدم" هي الفرق بين الطاقة الابتدائية في البندول قبل الكسر وطاقته بعد الكسر. كما هو موضع في العلاقة التالية:

$$E = W(h_1 - h_2) \quad \dots (6)$$

وبالتعويض في المعادلة (6) تصبح طاقة التصادم تساوي:

$$E = WL(\cos(\alpha) - \cos(\beta)) \quad \dots (7)$$

حيث أن: F: القوى العمودية؛ A_0 : مساحة مقطع العينة الأصلي؛ ΔL : الاستطالة أو التقلص؛ L_0 : هو الطول الأصلي للعينة؛ L_f : هو الطول النهائي للعينة؛ σ : الإجهاد؛ E : الانفعال؛ F_{max} : أقصى حمل؛ El : النسبة المئوية للاستطالة (%): E : الشغل المبذول في كسر العينة (kg.m): W : وزن البندول (kg): L : طول البندول (m): α : زاوية ارتفاع البندول قبل الصدمة؛ β : زاوية ارتداد البندول بعد الصدمة وكسر العينة؛ h_1 : ارتفاع مركز ثقل البندول في الحالة الابتدائية؛ h_2 : ارتفاع مركز ثقل البندول بعد الكسر.

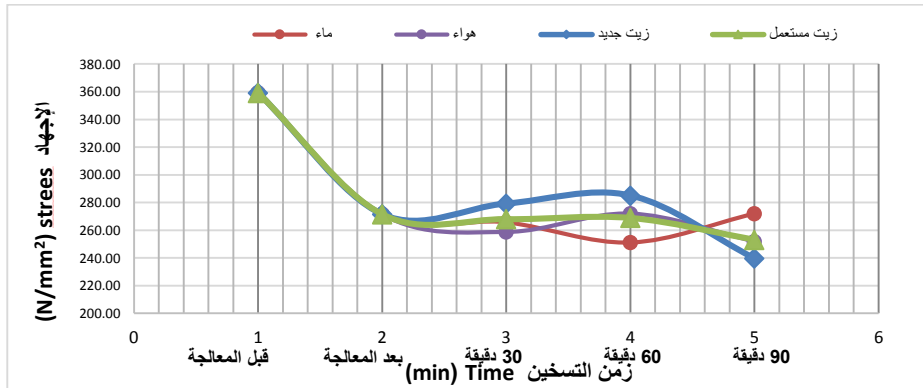


4. النتائج والمناقشة

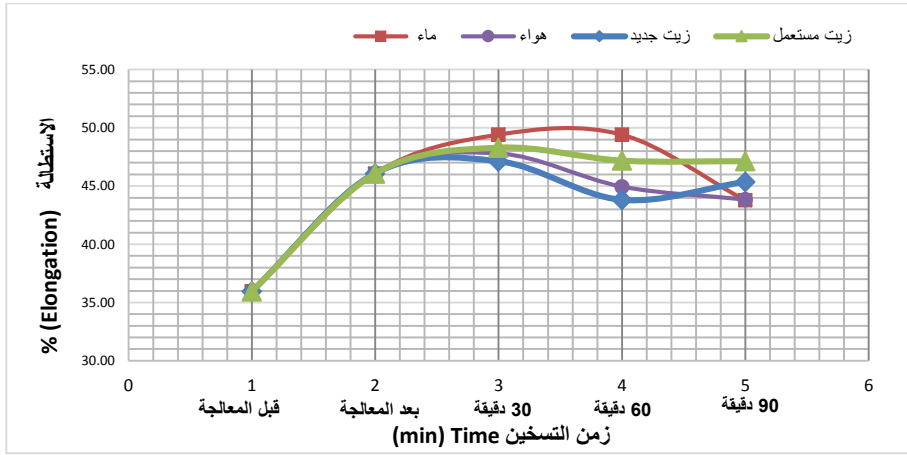
تبين نتائج الاختبارات العملية المتحصل عليها من العينات في عملية التلدين أن الخواص الميكانيكية للمعدن حدث لها انخفاض ملحوظ من نقطة البداية 1 إلى النقطة 2 للأشكال (7-10)، وهذه العملية مطابقة لنتائج متحصل عليها في دراسات سابقة (بغني، 2014؛ Trethewey, 1996). ويوضح الملحق (1)، عينات البنية المجرية وكذلك التغيرات في البنية المجهرية للمعدن قبل وبعد التلدين وبعد التعرض إلى عملية التآكل، كان اختلاف واضح بين ذرات المعدن بانتشار الفريت أكثر من البرلايت قبل عملية التلدين ومن ثم تتحول العينة من أوستنايت إلى المرتنايت والقليل من الفريت إلى برلايت بعد عملية التلدين (بغني، 2014). أما بعد إجراء اختبار التآكل ومن المعروف أن تركيز الفريت يؤدي إلى تشكيل فجوات وتشققات على سطح المعدن، وتسهل تشكيل طبقات الملح الناتجة عن عملية التآكل. وبالعكس تماماً فزيادة تركيز البرايت في المعدن يؤدي إلى تحسين مقاومته للتآكل.

بعد عملية المحاكاة لعمليات التشغيل بتسخين المعدن لدرجة حرارة 250 م° وتبريده في وسائط مختلفة لمدة زمنية قسمت إلى ثلاث مجموعات (30، 60، 90) دقيقة. كانت النتائج عند إجراء اختبار الشد للحصول على إجهاد الخضوع (Yield Stress) للعينات عند التبريد بالزيت المستعمل والهواء أكثر استقراراً لإجهاد الخضوع، وعند التبريد بزيوت جديدة تكون النتائج أكبر منه عند التبريد بالماء.

حيث أن نتائج الاستطالة (Elongation) المتحصل عليها بعد إجراء عملية المحاكاة. كما موضح بالشكل (2). كانت الاستطالة في حالة استقرار عند التبريد بالزيت المستعمل، والهواء والزيوت الجديدة يتخذان مساراً متقارباً، أما التبريد بالماء كانت الاستطالة أعلى ما يمكن في فترة تسخين (30، 60) دقيقة والعكس في فترة 90 دقيقة بحيث كانت أقل ما يمكن.

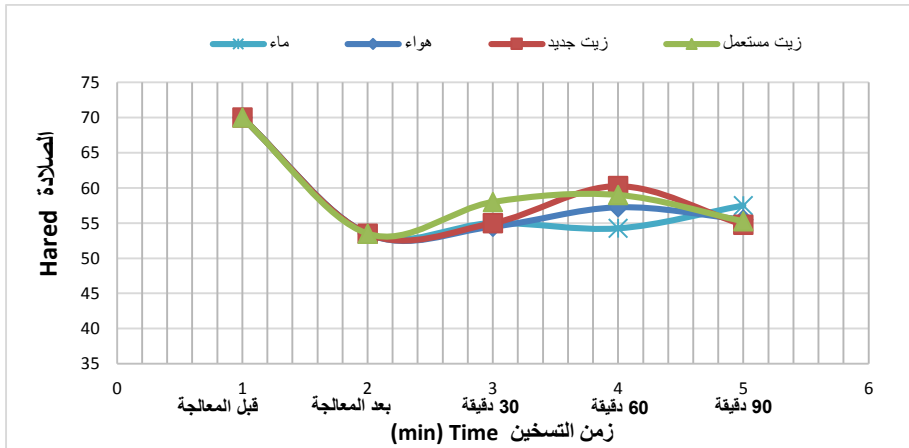


شكل 7. منحنى إجهاد الخضوع لعينات الشد



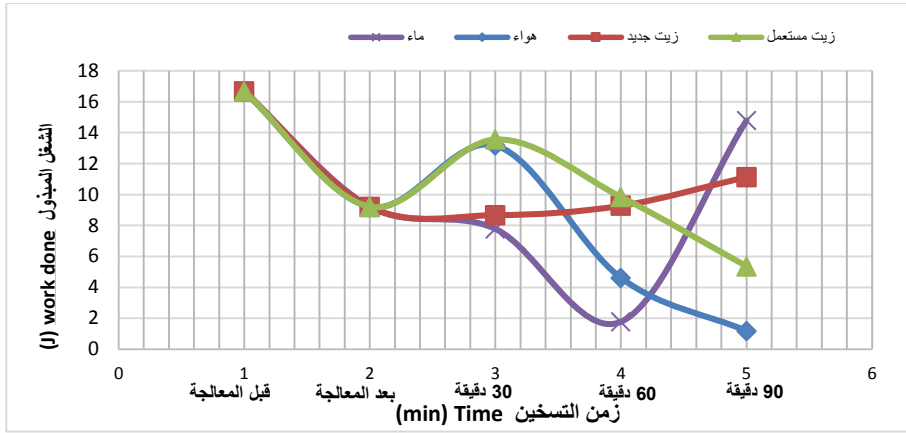
شكل 8. منحنى الاستطالة لعينات الشد

اختبار الصلادة (Hardness Test) للعينات بعد المحاكاة الحرارية وتأثير الحرارة واختلاف أوساط التبريد كانت النتائج في حالة استقرار وقيم متقاربة في جميع الحالات. إلى في حالة التسخين لزمن 60 دقيقة كانت النتائج تختلف باختلاف وسائط التبريد.



شكل 9. منحنى الصلادة لعينات الشد والصدم

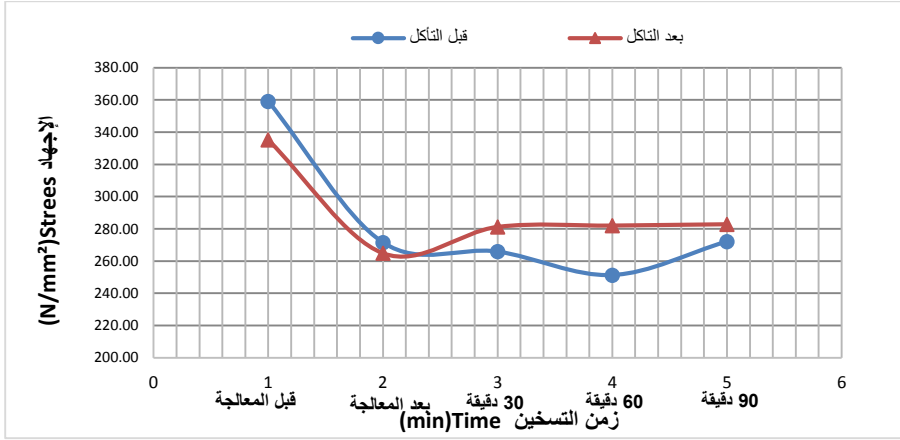
أما اختبار الصدم (Shock Test) للعينات كانت قيمة المتانة في حالة تزايد منتظم عند التبريد بالزيت الجديد، والتبريد بالهواء والزيت المستعمل كانت قيمة المتانة متساوية عند التسخين لمدة 30 دقيقة. بينما تقل وتختلف عند الفترات الزمنية الأخرى، أما قيمة المتانة عند التبريد بالماء حدث لها اختلاف كبير بين فترات التسخين المختلفة.



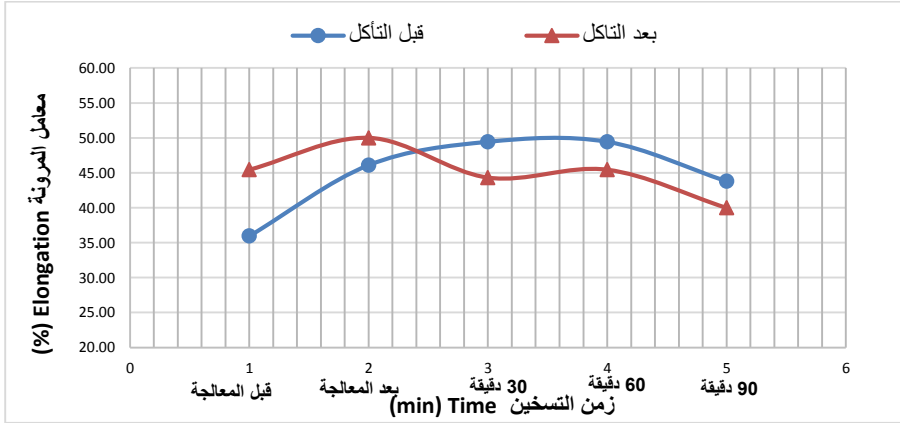
شكل 10. منحى المتانة لعينات الصدم

1.4. نتائج اختبار التآكل

تم اختيار الماء كوسيط تبريد لتحليل نتائج اختبار الشد للعينات قبل وبعد اختبار التآكل. تبين من النتائج أن قيمة إجهاد الخضوع (Yield Stress) أقل في حالة عينات التآكل قبل وبعد المعالجة الحرارية. بعد ذلك يحدث انقلاب لقيم الإجهاد وتكون الأعلى بعد التآكل من قيمة الإجهاد للعينات قبل التآكل كما موضح في الشكل (11). وكما هو مبين في الملحق رقم (3) وتتكون الفرايت وتكون فجوات وتشققات على سطح المعدن، تؤدي هذه الفجوات والتشققات إلى زيادة قيم الإجهاد في المناطق المجاورة لها. ويمكن أن يتسبب ذلك في انقلاب قيم الإجهاد بعد التآكل، حيث يتم تحميل المناطق المتآكلة بقيم إجهادات أعلى من العينات قبل التآكل. أما بالنسبة لنتائج اختبار الاستطالة (Elongation) فإن عملية التآكل تؤدي إلى تشكيل فجوات وتشققات على سطح المعدن، وتؤدي هذه الفجوات والتشققات إلى تقليل قدرة المعدن على تحمل التشوه البلاستيكي والتمدد قبل الكسر. وبالتالي، فإن قيم الاستطالة تنخفض عادة في حالة التآكل. وحدث تغير في نتائج اختبار الاستطالة بسبب عمليات التسخين والتبريد بالماء. وبالتالي زادت قدرة المعدن على تحمل التشوه البلاستيكي والتمدد قبل الكسر كما موضح في الشكل (12).



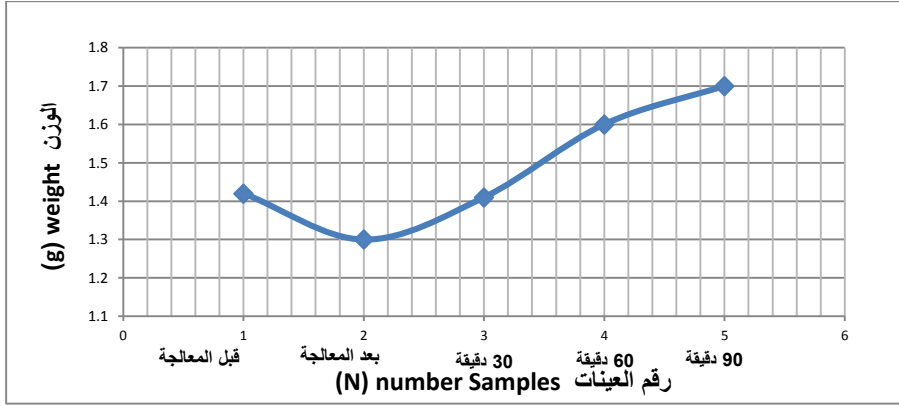
شكل 11. منحنى مقارنة إجهاد الخضوع لعينات الشد والتبريد بالماء بعد إجراء عملية التآكل



شكل 12. منحنى مقارنة الاستطالة لعينات الشد والتبريد بالماء بعد إجراء عملية التآكل

2.4. نتائج الفقد في أوزان العينات قبل وبعد التآكل

تم أخذ أوزان العينات قبل وبعد اختبار التآكل، حيث حدث فقد في وزن العينات بعد إزالة الصدأ المتكون على سطح المعدن الناتج من اختبار التآكل وكانت متوسط النسبة لكل العينات 1.43 جم. حيث يوضح الشكل (13) مقدار الفقد في وزن العينات قبل وبعد المعالجة الحرارية وعملية محاكاة التشغيل. وهذا يثبت صحة النتائج المتحصل عليها من خلال التصوير المجهرى للعينات والخواص الميكانيكية أن نسبة التآكل في الأماكن التي تحدث فيها عمليات تشغيل المعادن أعلى من الأماكن الأخرى من الأجزاء المصنعة.



شكل 13. منحنى الفقد في وزن العينات قبل وبعد التآكل

وهذه النتائج كانت مطابقة للنتائج التي تحصل عليها (بشير والسراج، 2012) حيث استنتجا أن "أكبر مقاومة للتآكل هي للصلب المعامل حرارياً بالتخمير وأقل مقاومة تآكل للصلب المعامل حرارياً بالتصليد أما الصلب المعامل حرارياً بالمعادلة فكانت قيم مقاومته للتآكل واقعة بينهما".

5. الاستنتاجات

بعد إجراء عملية المعالجة زادت لدونه المعدن وقابليته للتشكيل. وكذلك تحول بلورات المعدن بالكامل من أوستنايت إلى المرتزيت والقليل من الفريت وأخيراً إلى برلايت وفريت. وعند إجراء عملية المحاكاة وتعرض العينات لدرجات حرارة من 250 إلى 400 °م وتبريدها باستخدام الوسائل المختلفة للتبريد حدث هناك اختلاف واضح للخواص الميكانيكية والبنية المجهرية للعينات. وكذلك ازدياد معدل التآكل في العينات المعرضة للحرارة نتيجة لتكون الفريت على سطح العينات وانتشار الشقوق، تؤدي هذه الفجوات والتشققات إلى سرعة انتشار أكسيد المعدن والتآكل أخيراً..

6. التوصيات

في حالة استخدام الفولاذ في عمليات التشغيل والتشكيل تصاحبها ارتفاع في درجات الحرارة، وكما أظهرت نتائج البحث ومدى تأثر هذه الأماكن بالتآكل والتغير المصاحب في خواصها الميكانيكية. لذلك نوصي بمعالجة هذه الأماكن إما بعمليات المعالجة الحرارية المعروفة في حالة توفر ذلك لزيادة مقاومة المعادن للتآكل وإرجاع خواصها الميكانيكية المناسبة أو يجب معالجتها بأساليب مقاومه للتآكل مثل الطلاء. نوصي باستكمال هذا العمل بإجراء عملية التصليد بعد عملية المحاكاة، ومقارنتها بنتائج قبل عملية التخمير في هذه الدراسة.



المراجع

أولاً: قائمة المراجع باللغة العربية

- إمام، محمود؛ مهدي، محمد؛ وأمين، محمد (2007). *خواص المواد واختباراتها*، الجزء الأول، ط1. جامعة المنصورة.
- بشير، إخلص؛ السراج، غيداء (2012). تأثير المعاملات الحرارية على مقاومة تآكل صلب متوسط الكربون في مياه عين كبريت، *مجلة تكريت للعلوم الهندسية*، 19(3)، 14-25.
- بغني، عيسى مسعود (2014). *أساسيات هندسة المواد*، ط 1. الهيئة الليبية للبحث والعلوم والتكنولوجيا.
- غيدان، أياد عرب (2013). تأثير المعاملة الحرارية على سلوك المرونة-اللدونة وامتصاص الطاقة لصفائح الفولاذ على شكل L تحت قوى انضغاطية محورية. *مجلة هندسة الرافدين*، 21(5)، 115-126.
- فههي، ميرين حسن (2005). تأثير علاقة الإجهاد-الانفعال على معامل المرونة ومقاومة العزوم. *مجلة هندسة الرافدين*، 13(2)، 13-32.
- مؤسسة التدريب التقني والمهني (1429 هـ). *تقنية تشغيل*. الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج، تخصص ميكانيكا إنتاج. المملكة العربية السعودية المؤسسة للتدريب التقني والمهني.
- الموسوي، كاظم عباس (2000). *التآكل*. منشورات ELGA، مالطا.
- هدله، حسن فارس (2020). تحسين الخواص الميكانيكية للفولاذ متوسط نسبة الكربون بالمعالجة الحرارية. *مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية*، 37(2).

ثانياً: قائمة المراجع باللغة الإنجليزية

- Cattant, F., Crusset, D., & Féron, D. (2008). Corrosion issues in nuclear industry today. *Materials today*, 11(10), 32-37.
- Kutz, M. (Ed.). (2002). *Handbook of materials selection*. John Wiley & Sons.
- Trethewey K.R., (1996). *Corrosion Science and Engineering*, 2nd ed. Wesley Longman Limited, London, U.K.
- Trethewey, K.R. and Chaberlain, J. (1996). *Corrosion for Science and Engineering*, 2nd ed.. Pearson Education.

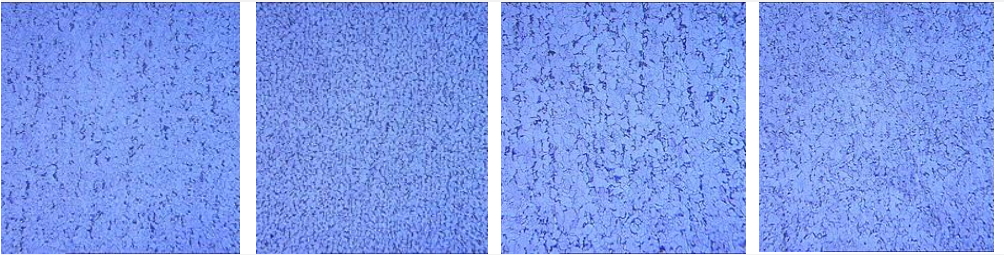
الملحق 1. صور العينات البنية المجهرية.



الملحق 2. صور البنية المجهرية قبل وبعد المعالجة.

2-2: (البنية المجهرية لعينات بعد التآكل)

1-2: (البنية المجهرية لعينات قبل التآكل)



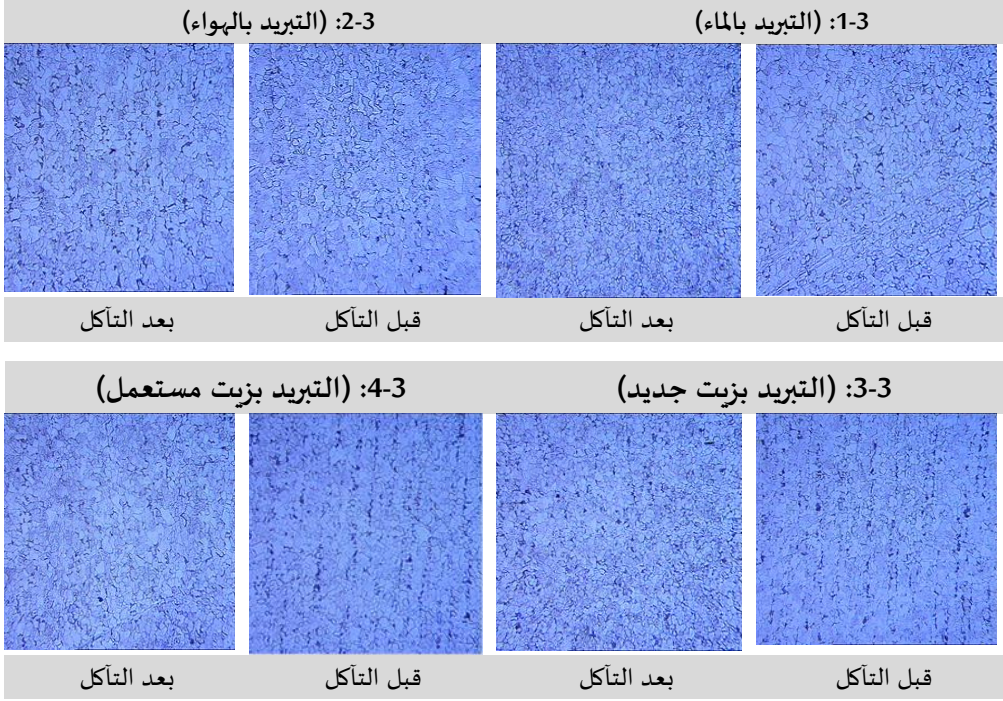
بعد المعالجة

قبل المعالجة

بعد المعالجة

قبل المعالجة

الملحق 3. صور البنية المجهرية بعد عملية المحاكاة في زمن تسخين 90 دقيقة.



الملحق 4. صور العينات بعد إجراء الاختبارات (Samples after testing)

