تأثير المعالجات الحرارية عند درجة حرارة الأوستنيت على الصلادة والموصلية الكهربائية للصلب الكربوني عالي الكربون

شريفة المبروك عبد المولى
قسم الهندسة الميكانيكية، المعهد العالي للعلوم والتقنية، البيضاء، ليبيا.

رجاء سعد عثمان مؤمن
قسم الهندسة الكهربائية، المعهد العالي للعلوم والتقنية، البيضاء، ليبيا.

للمراسلة

raja1978momin@gmail.com

مجلة السلفيوم للعلوم والتقنية
SILPHIUM Journal of Science & Technology (SJST)

SJST Vol.07 No.01 2025 (23-32)

www.j.istc.edu.ly
Received 20/09/2024 Revised 29/11/2024 Published online 24/01/2025

تأثير المعالجات الحرارية عند درجة حرارة الأوستنيت على الصلادة والموصلية الكهربائية للصلب الكربوني عالي الكربون

شريفة المبروك عبد المولى [1]، رجاء سعد عثمان مؤمن[2]*
[1] قسم الهندسة الميكانيكية، المعهد العالي للعلوم والتقنية، البيضاء، ليبيا.
[2] قسم الهندسة الكهربائية، المعهد العالي للعلوم والتقنية، البيضاء، ليبيا.
*raja1978momin@gmail.com

الملخص

في هذا البحث، تم تسليط الضوء على أهمية الخواص الميكانيكية والكهربائية للصلب عالي الكربون نظرا لاستخداماته الصناعية الواسعة، والهدف من الدراسة هو دراسة تأثير المعالجة الحرارية عند درجة حرارة الاوستنيت للصلب عالي الكربون على الصلادة والموصلية الكهربائية لهذا النوع من الصلب، لتحقيق هذا الهدف تمت معالجة ستة عينات من الصلب عالي الكربون حرارياً باستخدام فرن كهربائي عند درجة حرارة950 درجة مئوية مع إخضاعها للتبريد بطرق مختلفة حيث أجريت اختبارات الصلادة والموصلية الكهربائية للعينات قبل المعالجة الحرارية وبعدها، وقد أظهرت النتائج تأثيرا ملحوظا للمعالجة الحرارية، حيث زادت الصلادة نتيجة تكوين طور المارتينسيت عند التبريد بالماء، كما تحسنت الموصلية الكهربائية بشكل ملحوظ عند التبريد بالتخمير(Anneling).

الكلمات المفتاحية: المعالجات الحرارية، الاوستنيت، الموصلية الكهربائية، الكربون.

The Effect of Austenitizing Temperature of High Carbon Steel on Hardness And Electrical Conductivity.

SHAREEFAH ALMABROUK ABDULMAWLAY[1], RAJA S O MOMIN[2*]
[1] Department of Mechanical Engineering, Higher Institute of Science and Technology, Al-Bayda, Libya.
[2] Department of Electrical Engineering, Higher Institute of Science and Technology, Al-Bayda, Libya.
*Corresponding Author: raja1978momin@gmail.com

Abstract

In this study, the importance of the mechanical and electrical properties of high-carbon steel was highlighted due to its wide industrial applications. The aim of the research was to investigate the effect of heat treatment at the austenitization temperature on the hardness and electrical conductivity of high-carbon steel. To achieve this, six samples of high-carbon steel were heat-treated using an electric

furnace at a temperature of 950°C, followed by cooling using different methods. Hardness and electrical conductivity tests were conducted on the samples before and after heat treatment. The results showed a significant impact of the heat treatment, with an increase in hardness due to the formation of martensite during water quenching, and a noticeable improvement in electrical conductivity with annealing cooling.

Keywords: Heat treatments, austenite, electrical conductivity, carbon.

المقدمة

كانت المعادن دائماً وأبداً هي نعمة الهندسة، وتعلم المهندسون بدورهم كيفية تحسين العديد من المعادن وتكييف خواصها بالمعالجات الحرارية وفقًا لمتطلبات سوق العمل، والمعالجات الحرارية Heat Treatments، تسمي أيضا المعاملات الحرارية، وهي بوجه عام عمليات صناعية تجرى على أنواع كثيرة من المواد الهندسية بغرض التحكم في خواصها المختلفة، ولاسيما الخواص الميكانيكية ذلك تحسينا لخواص المنتج النهائي، أو لتسهيل عمليات التصنيع اللاحقة، حيث نشأت هذه المعالجات وارتبط اسمها بصناعة الصلب بشكل خاص والفلزات بشكل عام نظرا لأهمية وقدرة المعالجات الحرارية علي تغيير وتعديل بعض خواص هذه المواد، هذه القدرة على تغيير هيكل الصلب الكربوني عن طريق المعالجة الحرارية مفيدة للغاية تسمح للمهندس باختيار التوازن الصحيح للقوة والمتانة والصلابة (مقاومة التآكل) حسب التطبيق(بشير والسراج ، 2012).

المعالجة الحرارية هي التسخين والتبريد المتحكم فيه للمعادن لتغيير خصائصها الفيزيائية والميكانيكية دون تغيير شكل المنتج وإعطاء خصائص معينة للمعادن والسبائك الصلبة وفقًا لتركيبها الكيميائي غالبًا ما ترتبط المعالجة الحرارية بزيادة قوة المواد، ولكن يمكن استخدامها أيضًا لتغيير بعض أهداف التصنيع مثل تحسين المعالجة وتحسين القابلية للتشكيل واستعادة الليونة، بالتالي فهي عملية تصنيع تمكينية للغاية، ولكن يمكنها أيضًا تحسين أداء المنتج عن طريق زيادة القوة، أو الخصائص الأخرى المرغوبة مثل المتانة والصلابة والمرونة ومقاومة التآكل ومقاومة الحرارة ومقاومة الإجهاد (بغني ، 2014).

والصلب الكربوني موضوع الدراسة من المواد المناسبة بشكل خاص للمعالجة الحرارية؛ لأنه يستجيب بشكل جيد للمعالجة الحرارية والاستخدام التجاري للصلب يتجاوز استخدام أي مادة أخرى وقد أصبح العملاء يطمعون في مثل هذه المواد (عبد الحسن،2011) .

والهدف من المعالجات الحرارية المطبقة على الصلب كثيرة ولكن ركزنا في هذا البحث على تحسين الخواص الميكانيكية متمثلة في الصلادة والخواص الكهربائية المتمثلة في الموصلية الكهربائية وتم استخدام ثلاثة أنواع من المعالجات الحرارية (تخمير – تقسية – معادلة).

أظهرت نتائج البحوث التي أجريت على الصلب العالي الكربون تأثير المعالجات الحرارية على الخواص الميكانيكية والكهربائية، حيث درس الباحث(Alain and Druce, 2014) تأثير المعالجة الحرارية للسطح عن طريق المراجعة وأظهرت النتائج الحصول على صلادة سطحية عالية بسبب ظهور طور المارتنسيت بينما لوحظ أنه عند درجة حرارة المراجعة (300-700) تناقصت الصلادة السطحية بسبب ظهور طور السيمنتيت لعدم اكتمال نشوء طور المارتنسيت مما ساعد في التخلص من الإجهادات الداخلية (بشير وآخرون ، 2019).

أما الباحثين (Wilzer and Weber , 2012) فقد أجريا دراسة حول العلاقة بين المعالجة الحرارية والبنية المجهرية والخواص الميكانيكية والموصلية الكهربائية للصلب, بينت الدراسة وجود علاقة عكسية بين الصلادة والموصلية الكهربائية.

درس الباحث(Wei Kong et al., 2011) تأثير طور الأوستنيت للصلب الكربوني على المجال الكهربائي والصلادة , وأوضحت النتائج تأثير المارتنسيت على زيادة الصلادة مع انخفاض في الجهد مما يعني انخفاض للمقاومة وبالتالي ارتفاع للموصلية الكهربائية.

حيث تتغير المقاومة النوعية لمادة بتغير درجة الحرارة لهذا فان قيمة المقاومة الكهربائية للمواد عند درجة حرارة 20 درجة مئوية كما تعطي المعامل الحراري الذي يمكن حساب المقاومة عند درجة حرارة أخرى فإن بدأنا من المعادلة (1):

$$R20 = \rho 20 * l/A \quad \text{..... (1)}$$

وإذا أردنا حساب المقاومة عند درجة حرارة معينة فيمكن حسابها من خلال المعادلة (2):

$$RT = R0[1+\alpha(T-T0)] \quad \text{..... (2)}$$

حيث المعامل الحراري للمقاومة : α

هي المقاومة في الدرجة صفر درجة مئوية : $R0$

المقاومة في الدرجة المطلقة كيلفن : RT

هي درجة الحرارة صفر مئوية وتقابل 273.15 :$T0$ k

وبحسب مادة المقاومة قد تتزايد المقاومة النوعية بارتفاع درجة الحرارة فتسمى تلك المقاومة موصل بارد وهو النوع الغالب, كما توجد مواد تقل مقاومتها بارتفاع الحرارة وتسمى الموصل الساخن ويكون المعامل الحراري لها سالب.

يستفاد من هذه الخاصية اعتماد المقاومة على الحرارة في تقنية القياس وفي تقنية الضبط مثل في الترمومتر وفي الترموستات وفي مفاتيح تحديد التيار. وقد ابتكرت سبائك تحافظ على ثبات مقاومتها رغم تغير درجة الحرارة في حدود واسعة مثلما في حالة مقاومة القياس(Mott, 1936).

تكون الذرات في المادة في حالة حركة اهتزازية دائمة حول مواضع توازنها، ويمكن لبعضها أن ينخلع من مكانه إلى مكان آخر وقد تأتي ذرة أخرى وتحل مكانه في المعادن بشكل عام توجد إلكترونات حرة في حالة حركة، وتكون الذرات على شكل أيونات موجبة حيث تغادر الإلكترونات السطحية ذراتها بسبب التداخل بين مدار التكافؤ والناقلية، مع ارتفاع درجة الحرارة تزداد حركة الذرات أكثر وتحدث اضطرابات في المجالين الكهربائي والمغناطيسي داخل المعدن، وبالتالي تتأثر بها حركة الإلكترونات في المعدن عند تطبيق جهد خارجي عليه، ويؤدي هذا إلى ارتفاع مقاومة المعادن مع ارتفاع درجة حرارته (Tulsiyan and Sarang, 2008).

لا توجد صيغة عامة ودقيقة تحكم جميع المواد لعلاقة المقاومة الكهربائية بدرجة الحرارة، لكن بشكل عام يمكن اعتبار العلاقة التجريبية بين المقاومة الكهربائية للمادة ودرجة الحرارة، يمكن اعتمادها في الحالة الخطية لدرجات الحرارة العادية إلى المتوسطة، لكن مع ارتفاع الحرارة أكثر يجب إدخال القوى الأكبر لمتحول درجة الحرارة في العلاقة، لأنها تكون بشكل سلسلة قوى رياضية (Tian and Hu, 2012).

المواد وطرق العمل

تجهيز عينات الاختبار

1 - تم استخدام صلب عالي الكربون والمبين تركيبه الكيميائي في الجدول (1) حيث تم الحصول على عدد من العينات من الصلب الكربوني العالي الكربون من الشركة الليبية للحديد والصلب مصراته.

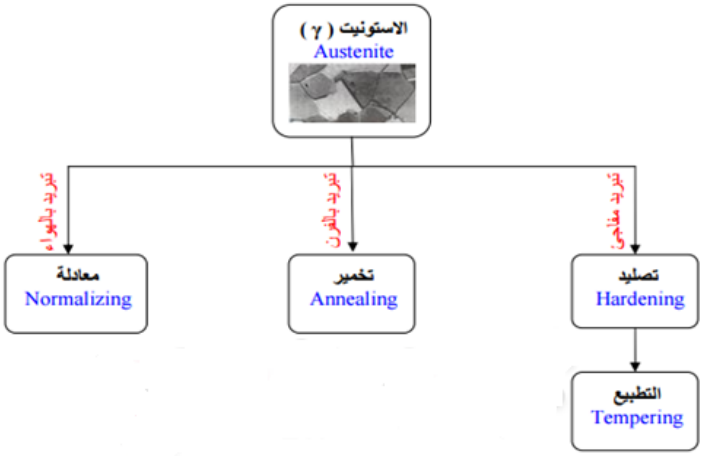
الجدول(1): التركيب الكيميائي لعينات للصلب العالي الكربون

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	رقم العينة
0.88	0.14	0.41	0.12	0.10	0.63	0.28	0.05	**1**
1.09	0.23	0.50	0.22	0.10	0.31	0.17	0.07	**2**
1.07	0.15	0.88	0.27	0.12	0.95	0.32	0.03	**3**
0.98	0.36	0.47	0.24	0.09	0.38	0.22	0.06	**4**
0.80	0.22	0.36	0.19	0.09	0.21	0.41	0.03	**5**
1.16	0.26	0.52	0.25	0.10	0.36	0.33	0.03	**6**

2- تم تجهيز 6 عينات وتم تقسيمها إلى ثلاث مجموعات ابعادها (11.5cm×2cm×0.2cm) كما موضح في الشكل (1) لغرض إخضاعها للمعالجات الحرارية والشكل (2) يوضح مخطط أنواع المعالجات الحرارية التي استخدمت في الدراسة



الشكل (1) شكل العينة قيد الدراسة



الشكل (2) مخطط المعالجة الحرارية

3- تم تصنيف العينات بحيث يتم اختيار كل عينتين مع بعضها بحيث تكون متقاربة في الحجم.

4- أخيرا تم ترميز هذه العينات لكي يسهل التعامل معها دون أي أخطاء حيث أن العينتين (1,2) خضعت للمعالجة بالتخمير والعينتين(4,3) للمعالجة بالتصليد عن طريق التبريد السريع والعينتين (6,5) للمعالجة بالمعادلة.

اختبار الخواص الميكانيكية والكهربائية:

تم إخضاع العينات القياسية من الصلب غير المعالج التي كانت بمثابة عنصر التحكم، والصلب المعالج حرارياً ذلك من أجل تحديد بعض الخواص الميكانيكية والكهربائية المحددة حيث تم إجراء اختبار صلادة روكويل***HRC*** وحساب الموصلية الكهربائية عن طريق قياس المقاومة باستخدام الجهاز ***LCR METER*** قبل المعالجة .

المعالجة الحرارية للعينات:

تم تسخين العينات إلى درجة حرارة 950درجة مئوية فوق درجة حرارة التبلور مما يساهم في تغيير البنية الداخلية إلى طور الأوستنيت باستخدام فرن كهربائي نوع: Carbolite High-Temperature Box) Furnace, 1600C). كما هو موضح في الشكل (3).



الشكل (3) الفرن الكهربائي المستخدم في المعالجات الحرارية

أولا المعالجة الحرارية بالتخمير(Annealing)

العينتان (2,1) تركت لتبرد داخل الفرن بعد إطفائه الى درجة حرارة الغرفة وهذا يسمح بتقليل الاجهادات واعادة تنظيم البنية البلورية.

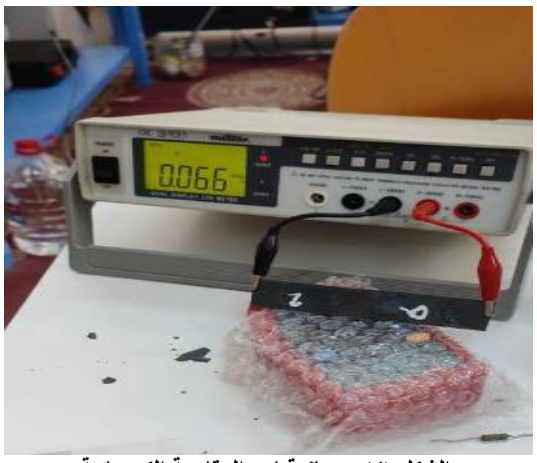
ثانيا المعالجة الحرارية بالتقسية (Quenching)

تركت العينتان (4,3) في الفرن لمدة (30 min) ثم تم إخراجهما من الفرن لتبرد في الماء مع التحريك للحصول على صلادة عالية.

ثالثا المعالجة الحرارية بالمعادلة (Normalizing)

تم تبريد العينتان (6,5) في الهواء بمعدل معتدل بدرجة حرارة الغرفة مما يؤدي إلى تكوين بنية متجانسة.

تم قياس الصلادة باستخدام جهاز رويكول للصلادة وقياس المقاومة باستخدام جهاز ***LCR METER*** كما موضح بالشكل (4) ومن ثم حساب الموصلية.



الشكل (4): جهاز قياس المقاومة الكهربائية

النتائج

جدول 2 قيم الموصلية الكهربائية قبل المعالجة

رقم العينة	R(Ω) المقاومة	G(S) الموصلية الكهربائية
1	0.5	2
2	0.5	2
3	0.4	2.5
4	0.5	2
5	0.4	2.5
6	0.5	2

جدول 3 قيم الصلادة قبل المعالجة

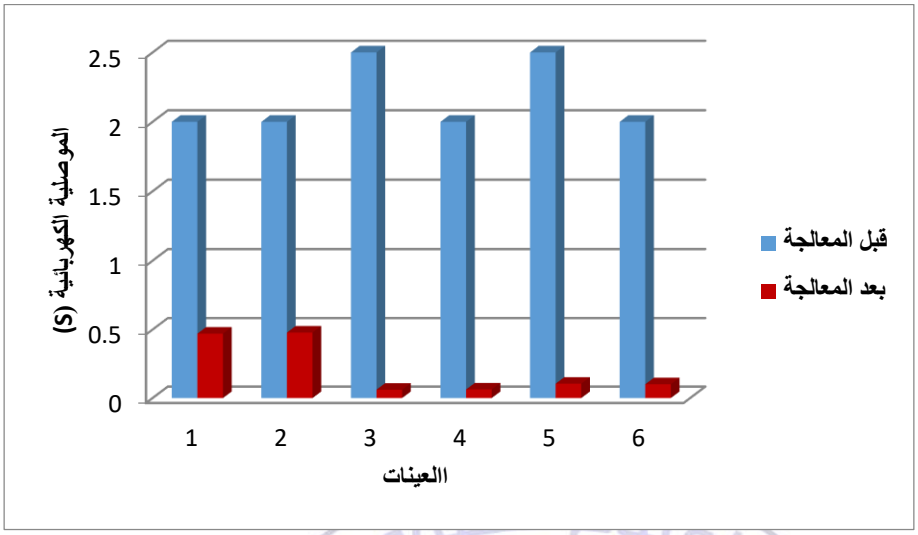
رقم العينة	الصلادة
1	74
2	53
3	53
4	47
5	52
6	50

جدول 4 قيم الموصلية الكهربائية بعد المعالجة

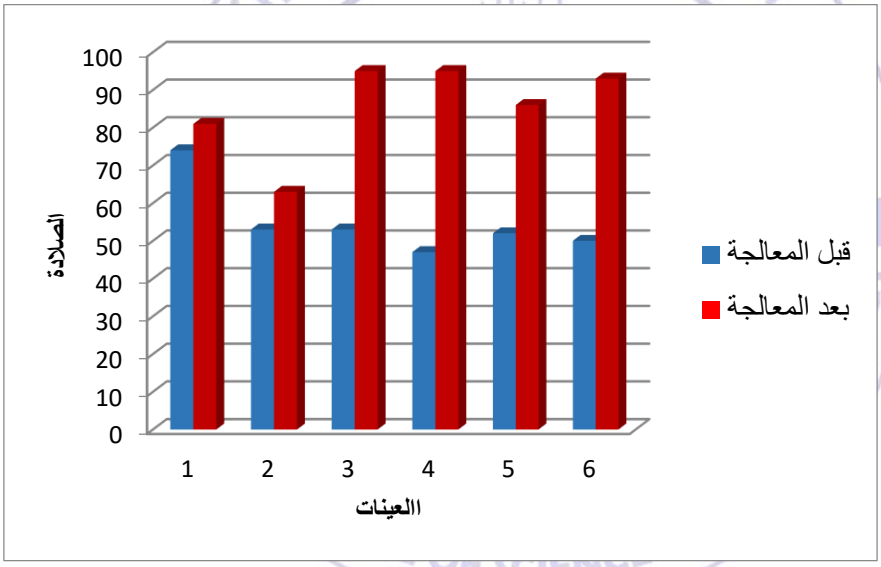
رقم العينة	الصلادة
1	**81**
2	**63**
3	**95**
4	**95**
5	**86**
6	**93**

جدول (5) قيم الصلادة بعد المعالجة

رقم العينة	R(Ω) المقاومة	G(S)الموصلية الكهربائية
1	2.124	0.470
2	2.09	0.478
3	16.2	0.061
4	15.7	0.063
5	9.45	0.105
6	9.85	0.101



الشكل (5): العلاقة البيانية للموصلية الكهربائية قبل وبعد المعالجة



الشكل (6): العلاقة البيانية الصلادة قبل وبعد المعالجة.

المناقشة

من خلال نتائج تأثير المعالجات الحرارية عند درجة حرارة الأوستينيت ونوع وسط التبريد، كما هو مبين في الشكل، فإن العينة المبردة بالماء (المعالجة بالتقسية) لها أعلى قيم للصلادة مقارنة بالعينات الأخرى، حيث تصل إلى أعلى قيمة (HRC95) ويرجع ذلك إلى تكوين طور المارتينسيت، والذي يتحول من طور الأوستينيتوالفريت، والذي يتشكل بالمعدل العالي للتبريد، والذي بدوره يمنع الانتشار السريع للذرات إلى تشكيل السيمنتيتfe3c.

ونلاحظ أن العينة المبردة بالهواء(المعالجة بالمعادلة) متقاربة في قيم الصلادة مع المعالجة بالتقسية، أما المعالجة بالتخمير فهي الأقل بعد ذلك بسبب انخفاض معدل التبريد إذا أمكن الحصول على صلابة أعلى؛ لأن التبريد يكون أسرع، أما العينات التي لم تخضع للمعالجة الحرارية فهي الأقل بين العينات الأخرى المعالجات الحرارية، وهذا بدوره يعكس أهمية بحثنا في الحصول على صلادة أعلى حيث لم يظهر التركيب المارتنسايتي إلا عند التبريد بسرعة عالية جدا" (في الماء) حيث يتحول الأوستنايت عندها إلى مارتنسايت، وفي ذلك دلالة على أن الحصول على التركيب المارتنسايتي يحتاج إلى معدل سرعة تبريد عالية حيث يستمر الأوستنايت في فرط التبريد دون أن يتمكن من قطع خطوط التحولات الطورية م وضوع بحثنا.

ومن خلال البحث يمكن اختيار أسلوب (وسط التبريد) المناسب الذي يحقق المواصفات المطلوبة التبريد في عملية التصلد المستعملة في المعاملات الحرارية لهذا النوع من الصلب.

كما لوحظ من خلال النتائج المعملية لقياس المقاومة الكهربائية للعينات قيد الدراسة، ومن ثم حساب قيمة الموصلية الكهربائية، وعند المقارنة بين قيم الموصلية الكهربائية قبل المعالجة الحرارية، وبعد المعالجة لوحظ انخفاض في قيمة الموصلية الكهربائية بسبب الارتفاع الكبير في درجة الحرارة الذي يؤدي إلى عدم استقرار الذرات، وتكون في حالة حركة اهتزازية دائمة ويمكن أن تحتل ذرة مكان ذرة أخرى مما يؤدي الى اضطرابات في المجالين الكهربائي والمغناطيسي بالتالي تناثر حركة الإلكترونات المسببة في نقل التيار فترتفع قيمة مقاومة المعدن وانخفاض الموصلية الكهربائية تبعا لذلك .

ومن الملاحظ كذلك أن الموصلية الكهربائية تختلف حسب المعالجة المطبقة على المعدن، فمن خلال دراسة النتائج يتضح أن المعالجة الحرارية ذات التبريد البطيئ بالتخمير تعطي أفضل النتائج بالنسبة للموصلية.

الاستنتاج

نستنتج من هذا البحث مايلي:

1- أن صلادة الصلب يمكن أن ترتفع عند زيادة معدل سرعة التبريد بالماء وتنخفض عند التبرد بداخل الفرن المغلق أي عند المعالجة بالتخمير وهذا يوسع مجالات استخدامها حسب الحاجة إلى الصلادة والمتانة المطلوبة.

2 -إن التبريد البطئ قد تسبب في النمو البلوري بحيث تظهر الحدود البلورية عليها بعض الكربيدات.

3- إمكانية استخدام أوساط تبريد مختلفة للسبيكة عند المعاملات الحرارية للحصول على الصلادة والتركيب المناسبين.

4- تزداد الصلادة مع زيادة حجم حبيباتها وستينت عند درجة حرارة الأوستينيت؛ لأن مساحة حدود الحبيبات تتناقص وهذا يعني أنه يتم تقليل مواقع تنوي الفريتوالبرليت مما يؤدي إلى إبطاء هذه التحولات وبالتالي تزداد صلادة الصلب.

5- انخفضت الصلادة بعد عملية المراجعة عند درجة حرارة 450 º لتصل إلى 70 HRC º حيث لن يكون أي أثر للأوستنايت في التركيب.

6- -نستنتج أن الحديد عالي الكربون خواصه وتركيبته تختلف عن باقي المعادن من النحاس، حيث أن ارتفاع درجة حرارته بشكل كبير يؤدي إلى ارتفاع كبير في المقاومة وانخفاض في موصليته الكهربائية .

المراجع

[1]- إخلاص أحمد بشير، غيداء إبراهيم حسين السراج " تأثير المعاملات الحرارية على مقاومة تآكل صلب متوسط الكاربون في مياه عين كبريت" , مجلة تكريت للعلوم الهندسية, المجلد19 , العدد 3 , أيلول 2012 .

[2]- محمد عبدالصادق عبدالحسن, " تأثير التصليد السطحي على التآكل الكيميائي والتآكل الكيميائي-الميكانيكي لفولاذ منخفض الكربون " مجلة كلية الهندسة، جامعة النهرين، المجلد71 ,العدد2، ص 34 ، 2011.

[3]- د عيسى مسعود بغني، " أساسيات هندسة المواد ", الهيئة الليبية للبحث والعلوم و التكنولوجيا, الطبعة الأولى 2014 , دار الكتب الوطنية – بنغازي .

[4] - عبدالناصر علي بشير، طارق خليل إبراهيم , فتحي عمر الأطرش ," استخدام الزيوت النباتية كوسيط لتبريد في عملية تصليد الصلب الكربوني العادي " كلية التقنية الهندسية – جنزور، قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية – ليبيا , Volume s .6.Issue1- June 2019

[5]. Kusmoko, A., Dunne, D., Dahar, R., & Li, H. (2014). Surface treatment evaluation of induction hardened and tempered 1045 steel.

Wilzer, J., Weber, S., Escher, C., & Theisen, W. (2012). On the relationship of heat treatment, microstructure, mechanical properties, and thermal conductivity of tool steels. In *TOOL* (pp. 143-152). [7]. Kong, W., Cang, D. Q., & Song, J. H. (2011). Influence of Austenization with Pulsed Electric Field on a Low-Carbon Steel.

Mott, N. F. (1936). The electrical conductivity of transition metals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences*, *153*(880), 699-717.

Tulsiyan, P., Sarang, S., & Sastry, S. K. (2008). Electrical conductivity of multicomponent systems during ohmic heating. *International Journal of Food Properties*, *11*(1), 233-241.

Tian, X., & Hu, H. (2012). Test and study on electrical property of conductive concrete. *Procedia Earth and Planetary Science*, *5*, 83-87.