Effect of spherification annealing and flame hardening on the hardness and microstructure of carbon steel

Khaldoun Kherbeek*

(Received 31 / 3 / 2019. Accepted 23 / 6 / 2019)

□ ABSTRACT □

FLAME HARDENING is a heat-treating process in which a thin surface shell of a steel part is heated rapidly to a temperature above the critical point of the steel. After the grain structure of the shell has become austenitic, the part is quickly quenched, transforming the austenite to martensite while leaving the core of the part in its original state. To achieve hardness, the steel must be cooled rapidly so that it bypasses the first two transformation phases and transforms directly from austenite to martensite. Flame hardening employs direct impingement of a high-temperature flame or high-velocity combustion product gases. Depths of hardening from about 0.8 to 6.4 mm or more can be obtained, depending on the fuels used, the design of the flame head, the duration of heating, the hardenability of the work material, and the quenching medium and method of quenching used. Although flame hardening is mainly used to develop high levels of hardness for wear resistance, the process also improves bending and torsional strength and fatigue life

In this research we study the effect of flame hardening and prior soft annealing on 0.6% carbon steel microstructure, hardness and hardness depth.

Key words : flame hardening , soft annealing , hardness, microstructure, hardness depth, austenite, martensite.

* **Academic Assistant , Department of Design and Production, Faculty of Electrical and Mechanical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

تأثير تخمير التكوير والتقسية السطحية باللهب على القساوة والبنية المجهرية للفولاذ الكربوني

خلدون خيربك †

(تاريخ الإيداع 31 / 3 / 2019. قُبِل للنشر في 23/ 6 / 2019)

□ ملخّص □

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير التقسية السطحية باللهب على القساوة والبنية المجهرية للفولاذ الكربوني (0.6% كربون) ودراسة تأثير تخمير التكوير السابق للتقسية على القساوة والبنية المجهرية للفولاذ الكربوني كذلك. حيث تمت دراسة التغيرات الحاصلة على البنية البلورية والقساوة السطحية وعمق التقسية مع وبدون تخمير التكوير لمعرفة التغيرات الحاصلة ومقارنة النتائج.

فقد بين البحث تأثير التقسية السطحية باللهب على كل من البنية البلورية والقساوة السطحية وعمق التقسية للفولاذ المستخدم في البحث، للحصول على مزيج فريد من الخواص، من سطح قاسي مقاوم للاحتكاك وقلب مرن مقاوم للصدم.

كما أشار إلى تحسن هذه الخواص عند إجراء عملية تخمير التكوير للفولاذ قبل عملية التقسية المذكورة.

الكلمات المفتاحية: تقسية سطحية، أوستنيت، مارتنسيت، عمق التقسية، تخمير، فولاذ كربوني، قساوة سطحية، بنية مجهرية.

† **قائم بالأعمال –قسم هندسة التصميم والإنتاج –كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية –جامعة تشرين –اللاذقية –سوريا.**

مقدمة:

المعالجات الحرارية السطحية هي مجموعة من العمليات تطبق على القطعة بحيث تغير من خواص السطح مع المحافظة على خواص اللب. تشمل هذه العمليات عمليات مشابهة للمعالجات الحرارية التقليدية من حيث المبدأ (كالاعتماد على التسخين والتبريد) وعمليات مختلفة بشكل واضح (كإضافة مادة للسطح ، تلبيس المواد الترسيب...).
تنتمي عملية التقسية السطحية باللهب للمعالجات الحرارية السطحية الانتقائية إلى جانب كل من التقسية بالتيارات التحريضية والتقسية السطحية بالليزر حيث تعتمد هذه الطرق على تقديم كثافة حرارية عالية لسطح القطعة بحيث تكون هذه الكثافة أكبر من معدل انتقال الحرارة بالتوصيل بين السطح والقلب وبالتالي يسخن السطح بشكل أسرع من القلب ويصل السطح إلى المنطقة الحرارية اللازمة للمعالجة بينما يكون القلب غير متأثر (أو متأثر بشكل بسيط) بالتسخين.

أهمية البحث وأهدافه :

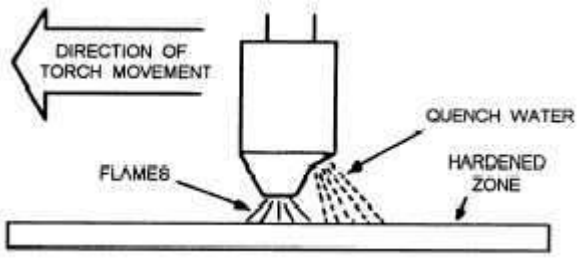
نتيجة لانخفاض كفاءة قطع التبديل المحلية الصنع، وتعرض هذه القطع للتلف والاهتراء الشديد خلال زمن استثمار يقل عن نصف العمر التصميمي لهذه القطع، فإن جهود البحث العلمي يجب أن تتركز باتجاه تحسين مواصفات الطبقة السطحية لهذه القطع لزيادة كفاءتها.
وبما أن المعالجة الحرارية السطحية تشكل سبيلاً لتحقيق هذه الغاية، اهتم البحث بتطبيق إحدى أهم طرق المعالجة السطحية وهي التقسية السطحية باللهب على هذه القطع في محاولة لمعالجة مشكلة تعاني منها الصناعة السورية.
يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير التقسية السطحية باللهب على القساوة والبنية المجهرية للفولاذ الكربوني ودراسة تأثير تخمير التكوير السابق للتقسية على القساوة والبنية المجهرية للفولاذ الكربوني. ومناقشة تأثير بارامترات طريقة التقسية هذه على خصائص هذه العينات، وبالتالي تسليط الضوء على أهمية استخدام طريقة التقسية باستخدام اللهب بوصفها إحدى طرق التقسية السطحية لقطع التبديل التي تصنع محلياً، والمساهمة في وضع بعض الحلول والاقتراحات بين أيدي المهندسين والفنيين في شركات القطاع العام والخاص وأيدي الصناعيين.

طرائق البحث ومواده

أجري هذا البحث في مخابر جامعة تشرين ومخابر شركة الصناعات الالكتروميكانيكية. حيث تم اجراء عمليات التقسية السطحية باللهب في شركة الصناعات الالكتروميكانيكية وتم تحضير العينات واجراء الاختبارات الميكانيكية (القساوة، عمق التقسية والبنية المجهرية) في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة تشرين ومخابر شركة الخدمات الالكتروميكانيكية.
التقسية السطحية باللهب هي عملية المعالجة الحرارية التي يتم بها تسخين سطح الفولاذ بسرعة لدرجة حرارة فوق الدرجة الحرجة للفولاذ Ac3 ، بعد أن تصبح البنية الحبيبية للقشرة الخارجية للفولاذ أوستونيت تبرد القطعة بسرعة مما يؤدي لتحول الأوستونيت إلى مارتنسيت بينما تبقى البنية الداخلية للقطعة على حالتها الأصلية.[1]
مصدر الطاقة في هذه الطريقة هو اللهب المباشر الناتج عن حرق أحد الغازات ذات المردود الحراري المرتفع مثل الأسيتيلين بنسبة ملائمة من الأوكسجين، حيث ينتج حرارة تقدر ب(2400–3150) درجة مئوية، حيث يسخن السطح

بسرعة كبيرة لا تسمح للحرارة بالوصول إلى قلب القطعة. يُسلط اللهب مباشرة على سطح القطعة لمدة زمنية تحددها ثخانة الطبقة المراد تقسيتها، ثم بالتبريد المباشر تتم عملية التقسية. ولإزالة الاجهادات بعد عملية التقسية تتم عملية ارجاع عند (100−300) درجة مئوية.[2]

هذه الطريقة مبنية على أساس أن التدفق الحراري الكبير المفاجئ الناتج عن اللهب يسخن سطح الفولاذ لدرجة حرارة التقسية خلال فترة زمنية وجيزة جداً ، لا يمكن خلالها للطبقات التي تلي الطبقة السطحية أن تسخن بنفس السرعة للنقطة الحرجة ، ولهذا عند التبريد لا تتعرض هذه الطبقات للتقسية .



الشكل(1) مبدأ عملية التقسية السطحية باللهب

يتكون اللهب نتيجة حرق مزيج من الوقود الغازي مع الأوكسجين أو الهواء ، حيث تستخدم رؤوس اللهب لحرق المزيج الغازي . إن اللهب المستخدم في التقسية هو لهب الأوكسي أستلين، بنسبة مزج 50% أستلين و50% أكسجين حيث تصل درجة حرارة اللهب الناتج عن هذا المزيج عند اشتعاله إلى ما يزيد عن 3100 درجة مئوية.

تم اختيار النسبة السابقة حسب الجدول الآتي:[2]

الجدول (1) نسب خلط الغازات مع الأوكسجين حسب نوع الغاز

نوع الوقود المستخدم	نسبة المزج / أوكسجين: غاز
Coal gas	1:0.6
propane	1:4
Nat gas	1:2
acetylene	1:1.15

تتم عملية التقسية باللهب بطرق عديدة من أهمها:[3]

- طريقة البقعة Stationary flame hardening.
- الطريقة التقدمية Progressive flame hardening .
- طريقة التدوير Spinning flame hardening .

يتم اختيار الطريقة المناسبة تبعا لشكل القطعة – حجمها – تركيبها الكيميائي – المنطقة المراد تقسيتها – عمق التقسية – وعدد القطع المراد تقسيتها، حيث تستخدم طريقة البقعة للتقسية الموضعية في أماكن محددة، أما الطريقة التقدمية فتستخدم لتقسية مناطق أكبر من المناطق التي يمكن تقسيتها بواسطة طريقة البقعة، أما طريقة التدوير فتطبق هذه الطريقة على القطع المستديرة أو شبه المستديرة مثل العجلات الكامات والتروس.

لإجراء التقسية السطحية يجب اختيار فولاذ كربوني بنسبة كربون كافية لإجراء التقسية لذلك فقد تم اختيار فولاذ كربوني بنسبة كربون 0.6% وبإجراء التحليل الطيفي نجد أنه يحوي أيضاً نسبة من المنغنيز والكروم والنيكل إضافة لوجود

كمية مرتفعة من السيليكون كما هو مبين في الجدول (2). أجري تحليل المعادن في شركة الخدمات الالكتروميكانيكية باستخدام جهاز التحليل الطيفي للمعادن نوع Oxford.

الجدول (2) التركيب الكيميائي للفولاذ الكربوني

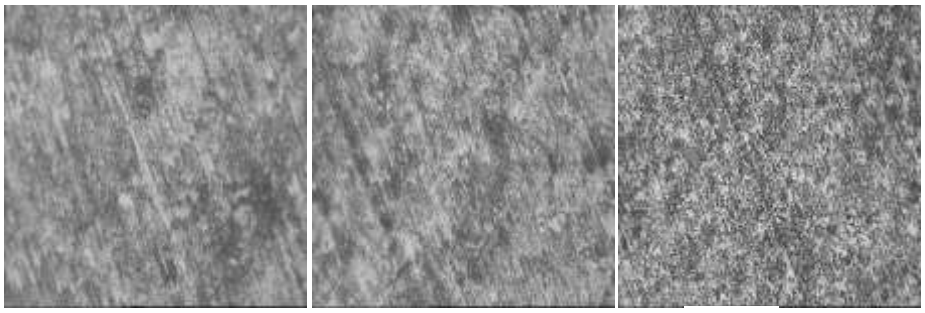
العنصر الكيميائي	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
النسبة المئوية	0.608	1.66	0.930	<0.00020	0.0173	0.340	0.124

أخضعت عينات الفولاذ الكربوني موضوع البحث للتقسية السطحية باللهب باستخدام جهاز مولد الاستلين في شركة الخدمات الالكتروميكانيكية عند درجة حرارة °850C، وكان بعد رأس اللهب عن السطح المقسى 3mm وتم الابتعاد عن حواف العينات المضلعة بمسافة 2mm تقريباُ منعاً من تكون نقاط تمركز حراري عند الحواف. تم التبريد بطريقة الرش بالماء بدرجة حرارة °60C لخفض سرعة التبريد منعاً من تشقق العينات، ثم أجريت عملية إرجاع منخفض درجة الحرارة عند الدرجة °150C باستخدام فرن كهربائي مبرمج لمدة ساعة تركت العينات بعدها لتبرد تلقائياً في الهواء. تم إخضاع عينات معالجة وعينات غير معالجة لعدة اختبارات(اختبار القساوة عمق التقسية والبنية المجهرية). حيث تم قص العينات إلى الأبعاد المطلوبة والمناسبة لكل اختبار.

أجري اختبار القساوة السطحية باستخدام جهاز نوع Wilson Rockwell hardness tester، تم فحص البنية المجهرية بوساطة مجهر ضوئي نوع Nicon. تمت عملية قياس درجة الحرارة باستخدام كاميرا حرارية نوع testo.

- الاختبارات الاولية Preliminary tests

تم قص العينات بشكل متوازي مستطيلات بالأبعاد mm(50*10*10) وشحذها بأوراق صنفرة متدرجة الخشونة (120–220–400–600)وترقيمها بأرقام خاصة بكل عملية. بالنسبة للعينة الأولى تم تلميعها بوساطة قرص مخملي بعد وضع معجون الماس مع زيت الأنولين عليه. ثم تغمر العينة بحمض الآزوت الممدد إلى أن يظهر تنميش على السطح ويصبح داكناً ثم تغسل بالماء والكحول وتجفف تحضيراً للدراسة البنية المجهرية.



100x 50x 20x

الشكل (2) البنية المجهرية للفولاذ قبل عملية التقسية السطحية باللهب

تظهر البنية المجهرية للفولاذ بأن البنية تتألف من البرليت مع وجود كمية صغيرة من الفيريت.

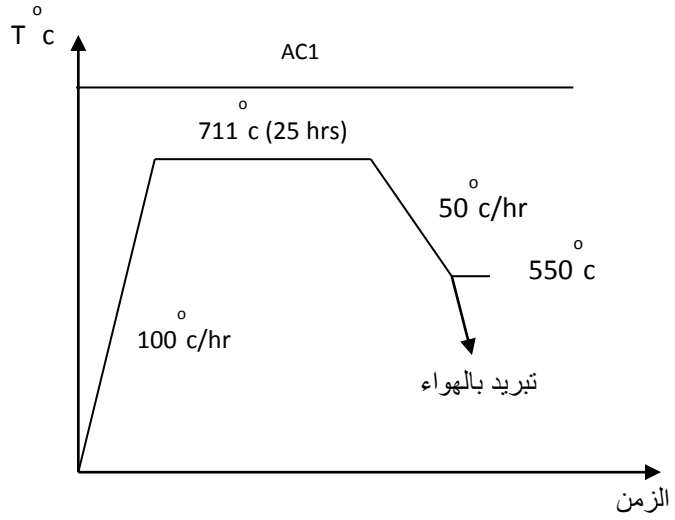
أما القساوة السطحية فكانت 30.2HRC بعد أخذ ثلاثة قراءات مختلفة وحساب المتوسط الحسابي لها.

الجدول(3) القساوة السطحية للفولاذ قبل التقسية السطحية باللهب

القراءة الأولى HRC	القراءة الثانية HRC	القراءة الثالثة HRC	متوسط القساوة HRC
30.9	31.1	28.5	30.2

- برنامج المعالجة الحرارية

تتم عملية تخمير التكوير بهدف الحصول على برليت حبيبي مكور وفق البرنامج الموضح بالشكل (3).



الشكل (3) برنامج تخمير التكوير

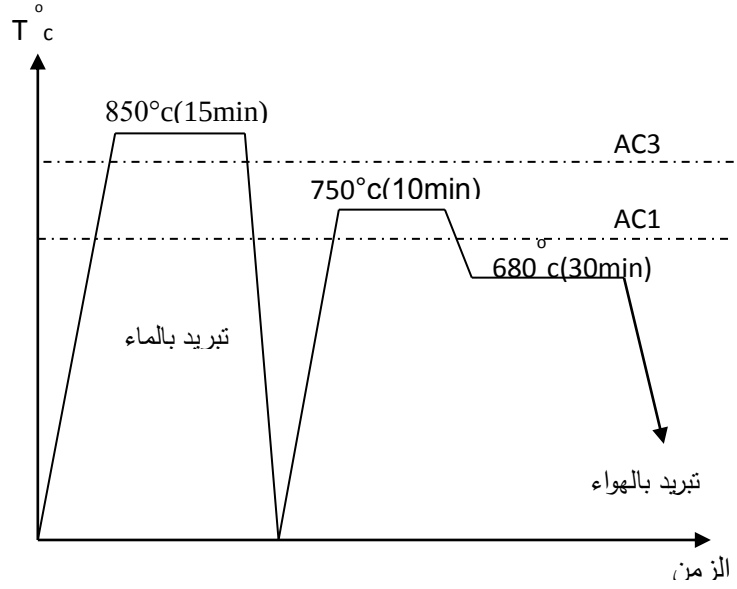
يتم تحديد درجة حرارة تسخين برنامج تخمير التكوير الموضح بالشكل (3) وفق المعادلة:

$$T(^oC)= 710+(0.17-0.3)*\%si +(0.35-0.6)*\%Mn$$

$$T(^oC)= 710+0.24*1.66 +0.48*0.93$$

$$T(^oC)= 711^oc$$

إن هذه الطريقة كما هو واضح تستغرق زمناً طويلاً وبالتالي هي مكلفة اقتصادياً لذلك أجريت عملية تخمير التكوير للعينات في فرن تسخين كهربائي مبرمج وفق البرنامج الموضح بالشكل (4). وهي طريقة أقل تكلفة وتؤدي نفس الغرض.[4]



الشكل (4) برنامج تخمير التكوير

تتألف عملية تخمير التكوير الموضحة بالشكل (4) من المراحل الآتية:

i. التسخين الى درجة حرارة أعلى من Ac3 فتتحول البنية إلى أوستينيت والإبقاء فترة قصيرة بحيث تتجانس البنية وتبقى الحبيبات صغيرة ثم التبريد بالماء فتنتج بنية مارتنسيتة ناعمة.

ii. التسخين إلى درجة حرارة بين Ac1 و Ac3 فتتحول البنية إلى أوستنيت وفريت والإبقاء فترة زمنية قصيرة لضمان التجانس والتخلص من الاجهادات المتشكلة.

iii. التبريد إلى درجة حرارة أقل من Ac1 فيتحول الأوستنيت إلى برليت، ثم يتم الإبقاء فترة كافية لتمام التحول ثم يتم التبريد في الهواء الساكن فنحصل على بنية مكونة من البرليت الحبيبي.

أما برنامج المعالجة الحرارية فهو موضح بالجدول(4).

الجدول (4) برنامج المعالجة الحرارية

رقم العينة	العملية السابقة	درجة حرارة التقسية السطحية باللهب c°	وسط التبريد
11	تخمير تكوير	بدون تسخين	ماء درجة حرارته $60^{O}C$
2	لايوجد	850	ماء درجة حرارته $60^{O}C$
22	تخمير تكوير	850	ماء درجة حرارته $60^{O}C$

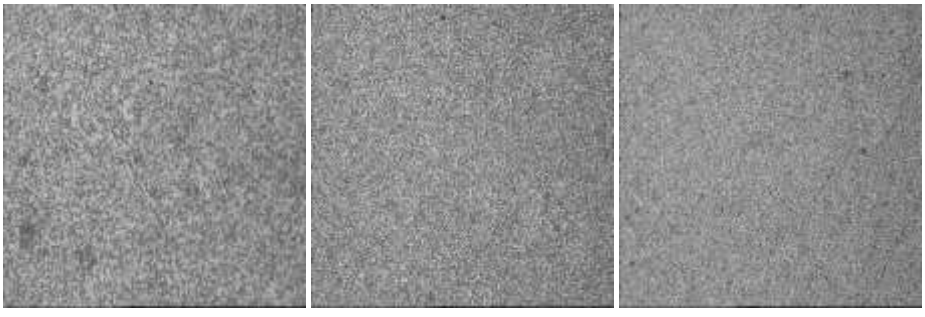
أما عملية الارجاع فتمت بالفرن الكهربائي المبرمج عند درجة حرارة 150° مئوية بفترة ابقاء لمدة ساعة واحدة.

النتائج والمناقشة

-البنية المجهرية

يمكن شرح تأثير تخمير التكوير والتقسية السطحية باللهب على الفولاذ المستخدم في البحث وذلك بعد فحص البنية المجهرية للعينات الثلاث السابقة بوساطة المجهر الضوئي كالآتي:

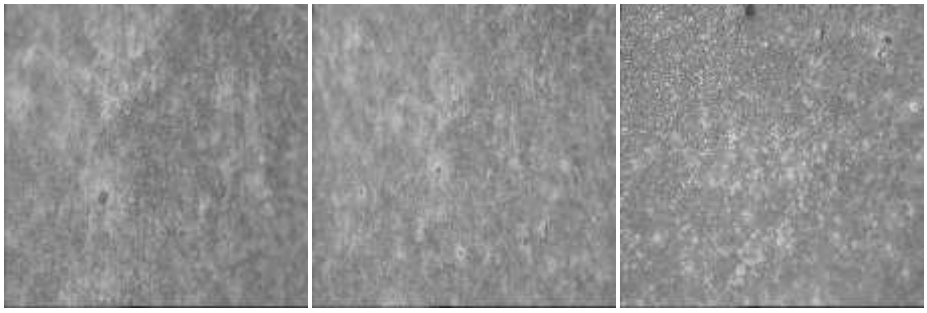
- بالنسبة للعينة 11 الخاضعة لتخمير التكوير بدون أي معالجة حرارية لاحقة، لا يوجد أي تغيّر في البنية البلورية مقارنة مع البنية البلوريّة الأوليّة للمعدن فقط تحول البرليت إلى الشكل الحبيبي، كما يوضح الشكل(5).



100x **50x** **20x**

الشكل (5) البنية المجهرية للعينة 11

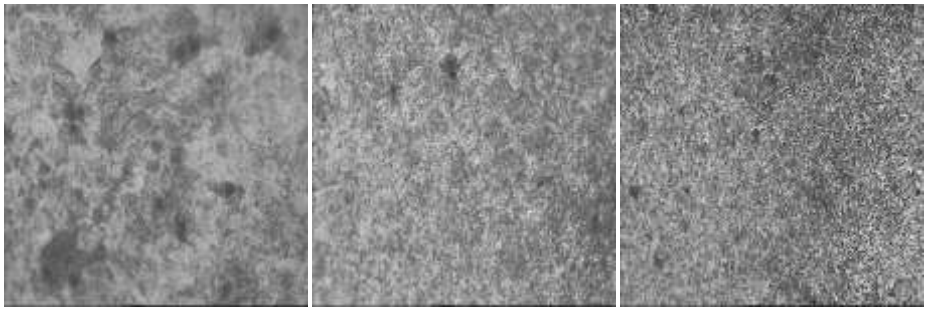
- بالنسبة للعينة 2 الخاضعة للتقسية السطحية باللهب وبدون تخمير تكوير نلاحظ تحول البنية بالكامل الى مارتنسيت كما هو واضح في الشكل (6).



100x **50x** **20x**

الشكل (6) البنية المجهرية للعينة 2

- بالنسبة للعينة 22 الخاضعة لتخمير التكوير ثم التقسية السطحية باللهب، والمقساة على حرارة $850^{O}C$ وبزمن تسخين 45 ثانية حيث تحولت البنية بالكامل إلى مارتنسيت ولكن البنية أنعم من مثيلتها بدون تكوير، كما هو واضح في الشكل (7).



100x **50x** **20x**

الشكل (7) البنية المجهرية للعينة 22

– القساوة السطحية surface hardness

تم قياس القساوة السطحية لعينات الفولاذ الثلاثة السابقة عن طريق اخذ ثلاث قراءات وحساب المتوسط الحسابي لها، فحصلنا على النتائج التالية:

الجدول (5) نتائج اختبار القساوة السطحية

العينة	المعالجة الحرارية	القراءة الأولى	القراءة الثانية	القراءة الثالثة	المتوسط HRc
1	بدون معالجة	30.9	31.1	28.5	30.2
11	تخمير تكوير	20.7	21.1	21.2	21
2	تقسية باللهب	59.1	57.8	58.4	58.5
22	تخمير تكوير ثم تقسية باللهب	59.6	59.5	60.4	65.9

الشكل(8) تأثير تخمير التكوير والتقسية السطحية باللهب على القساوة السطحية

حيث نلاحظ ارتفاع قيم القساوة السطحية بشكل ملحوظ بعد عملية التقسية السطحية باللهب بسبب تحول البنية إلى بنية مارتسيتية، كما نلاحظ تحسن هذه القساوة عند إجراء عملية تخمير التكوير قبل عملية التقسية السطحية باللهب ويعود ذلك لان البنية المارتسيتية الناتجة أنعم من مثيلاتها المقساة بدون إجراء عملية تخمير قبل التقسية السطحية باللهب.

-عمق التقسية Hardness depth

إن أعماق التقسية تتبع بشكل أساسي سرعة التسخين ولقد تحكمنا بها بتغيير بعد رأس اللهب عن السطح المقسى كما هو موضح في الجدول (6).

الجدول (6) سرعة التسخين بالنسبة لبعد رأس مخروط اللهب

البعد mm	الزمن s
3	45
10	60
20	123

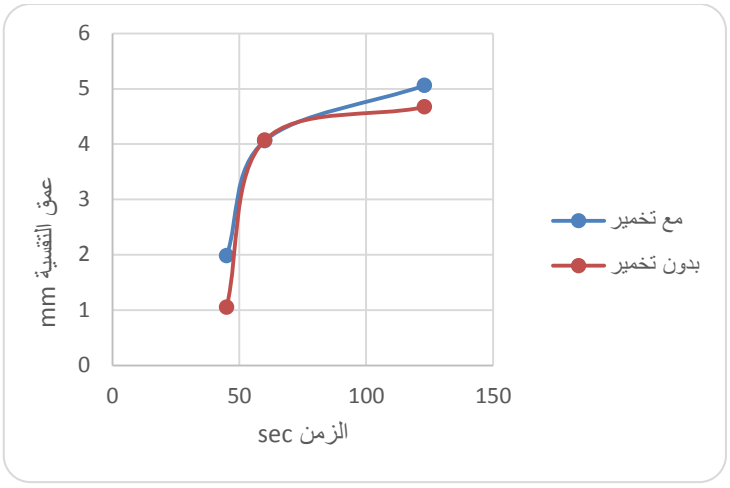
طبقت التقسية السطحية باللهب على عينات بدون عملية تخمير التكوير وعينات بعد اجراء عملية تخمير التكوير، وبالأبعاد السابقة، تم بعدها تجليخ العينات من أحد الوجوه المتعامدة مع السطح المقسى بمقدار 2-3mm، وشحذها بأوراق صنفرة متدرجة الخشونة(120-220-400)، ثم غمرت العينات بالمحلول (5 % حمض الآزوت 95 % كحول إيتيلي) إلى أن يتغير لون السطح (يصبح داكناً) ثم تغسل بالماء والكحول وتجفف.

لقد تم قياس عمق التقسية بواسطة بياكوليس إلكتروني بدقة قياس 0.01mm نوع metrology والنتائج موضحة بالجدول (7).

الجدول (7) يبين اختلاف عمق التقسية مع اختلاف زمن

الزمن sec	بدون تخمير تكوير		مع تخمير التكوير	
	العينة	عمق التقسيةmm	العينة	عمق التقسيةmm
45	2	1.05	22	1.98
60	3	4.06	33	4.07
123	4	5.06	44	4.67

يمكن تمثيل النتائج بيانياً في الشكل (8).



الشكل(9) اختلاف عمق التقسية مع اختلاف زمن التسخين في حالة التقسية
بدون إجراء تخمير تكوير قبل التقسية وفي حالة إجراء تخمير تكوير قبل التقسية

يوضح الشكل (9) ازدياد عمق التقسية طردياً وبشكل غير خطي مع ازدياد زمن التسخين وإن عمق التقسية يزداد بشكل كبير مع ازدياد زمن التسخين حتى زمن 60sec فبعده يكون زيادة عمق التقسية غير مجدي اقتصادياً فزيادة كبيرة في الزمن تقابل زيادة صغيرة في عمق التقسية.

أما سبب اختلاف أعماق التقسية في حالة التقسية المباشرة وفي حالة إجراء تخمير تكوير قبل التقسية هو زيادة الناقلية الحرارية للعينات المخمرة بسبب نعومة الحبيبات وأيضاً أن تحديد بعد رأس اللهب عن السطح المقسى تم بطريقة يدوية غير آلية مما يحوي هامشاً من الخطأ.

الاستنتاجات والتوصيات :

الاستنتاجات

- عند تسخين الفولاذ الكربوني التحت يوتكتوئيدي إلى فوق AC3 بقليل وتبريده بالماء أخذت القساوة قيمة عالية بسبب تحول الاستونيت بالكامل إلى مارتنسيت وعدم حدوث تضخّم في حجم حبيبات المعدن.
- أن إجراء تخمير تكوير قبل التقسية يعمل على زيادة تجانس البنية وتنعيم الحبيبات وتخفيف الإجهادات وزيادة القساوة مقارنةً مع العينات المقساة بدون عملية تخمير سابقة.
- إن عمق التقسية يزداد بازدياد زمن التسخين إلى أن نصل إلى مرحلة يكون فيها ازدياد زمن التسخين لا يؤثر بشكل ملحوظ على عمق التقسية.

التوصيات

- ينصح بإجراء بحث علمي مكمل لهذا البحث لعيّنات كبيرة بحيث يمكن إجراء عليها اختبار الشد والصدم وذلك لإكمال موضوع هذا البحث .
- إجراء المزيد من الدراسات والأبحاث في هذا المجال على بعض الأنواع الأخرى من الفولاذ.

المراجع:

1 – هترة، علي، *المعالجة الحرارية للمعادن*، منشورات جامعة تشرين، سوريا، 2000، 149–152.

2- G.M. CORBETT, *Fuel Gases for Flame Hardening*, Weld. Res. Suppl., Oct 1965, p 476-479.

3- N.J. FULCO, *Flame Hardening*, Heat Treat., Aug 1974, p 14-17.

4- YAN ZHAO, LIGENG FAN and BIN LU, *Effect of Reverse-phase Transformation Annealing Process on Microstructure and Mechanical Properties of Medium Manganese Steel*, Materials 2018, 11(9), 1633.