مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد41 العدد(2) – 2025: 14 –25

Damascus University Journal for engineering science
Vo 41 number (2) -2025: 14–25

دراسة تأثير وسيط التبريد المستخدم في المعالجة الحرارية على الخصائص الميكانيكية لفولاذ النوابض الكربوني

تاريخ الايداع: 2022/12/5
تاريخ القبول: 2023/3/7

حقوق النشر: جامعة دمشق –سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب
CC BY-NC-SA

علي احمد سعيد*[1] سليمان علي[2] علي هترة[3]

*[1]. طالب دكتوراه، مهندس في قسم هندسة التصميم والإنتاج، جامعة اللاذقية. ali.saed@tishreen.edu.sy

[2]. أستاذ مساعد، دكتور في قسم هندسة التصميم والإنتاج، جامعة اللاذقية..suleimanali72@tichreen.edu.sy

[3]. أستاذ مساعد، دكتور في قسم هندسة التصميم والإنتاج، جامعة اللاذقية.
AliHatra@tichreen.edu.sy

الملخص:

تم في هذا البحث دراسة تأثير وسيط التبريد في المعالجة الحرارية على الخصائص الميكانيكية لفولاذ النوابض الكربوني من النوع SUP3، حيث تم تنفيذ المعالجة الحرارية مع
التغيير في وسائط التبريد من أجل دراسة الاختلاف الذي ينتج في خصائص القطع وبشكل خاص القساوة، مقاومة الشد وإجهاد الخضوع، وقد كانت الغاية الأساسية للدراسة في تحديد طريقة المعالجة الأمثل والتي تعطي خصائص محسنة تفيد في عمل النوابض. ولتقييم نتائج المعالجة الحرارية تم إجراء مجموعة من الاختبارات وهي اختبار القساوة وفق روكويل، واختبار الشد من أجل تحديد مقاومة الشد ومقاومة الخضوع للعينات المختلفة، كما تم إجراء تصوير ضوئي لكسر الشد من أجل توصيف سطح الكسر وتفسير تأثير المعالجة الحرارية على خصائص المادة بشكل كامل. وقد أظهرت النتائج بأن تطبيق المعالجة الحرارية بشكل عام يحسن من الخصائص الميكانيكية لفولاذ النوابض الكربوني ومن المفضّل أن تتم المعالجة باستخدام الزيت كوسيط للتبريد حيث أن استخدام الزيت منع ظهور التشققات في القطع المعالجة وأعطى أفضل الخصائص الميكانيكية لعمل النوابض.

الكلمات المفتاحية: نوابض، معالجة حرارية، الفولاذ SUP3، سقاية، فولاذ كربوني.

Effect of Cooling Medium in Heat Treatment on the Mechanical Properties of Carbon Spring Steel

Ali Ahmad Saed*[1] Suleiman Ali[2] Ali Hatra[3]

*[1]. Ph.D. Candidate, Dep. Design and Production Engineering, Latakia University.
ali.saed@tishreen.edu.sy

[2]. Assistant Prof., Dep. Design and Production Engineering, , Latakia University.
Suleimanali72@Tichreenuniversity.edu.sy

[3]. Assistant Prof., Dep. Design and Production Engineering, , Latakia University.
AliHatra@tichreen.edu.sy

Received: 5 /12/2022
Accepted: 7 /3 /2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Abstract:

The effect of cooling medium in heat treatment on the mechanical properties of SUP3 steel was studied. The heat treatment was done with changing of the cooling medium to study the difference in properties of the material especially the hardness, tensile strength and proof strength. The main objective of the study was to determine the optimal heat treatment process which gives the best performance for springs. Several tests were conducted to evaluate the results of the heat treatment such as hardness test, tensile test, and fractography test. Results have shown that heat treatment of carbon spring steel led to improvements in mechanical properties and using oil as a cooling medium provided the best results with no danger of cracking the quenched parts.

Key words: Springs, Heat Treatment, SUP3, Quenching, Carbon Steel.

مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد41 العدد(2) – 2025: 14–25

Damascus University Journal for engineering science
Vo 41 number (2) -2025: 14–25

المقدمة:

تشكل النوابض أحد العناصر الرئيسية في كافة الأنظمة الميكانيكية، حيث أنها تقوم بتحويل القوة الميكانيكية إلى طاقة كامنة ومن ثم تحرير هذه الطاقة الكامنة إلى عمل نتيجة للشكل الهندسي للنابض ومرونة مادته والتغيرات المرنة التي يتعرض لها، ونتيجة لطبيعة عمل النوابض لا بد للمواد التي تصنع منها أن تكون ذات خصائص ميكانيكية جيدة وقدرة تحمل عالية من أجل مقاومة التشوهات لمدة مطولة.

يمكن أن تصنع النوابض من مواد مختلفة، حيث لا يقتصر أمر تصنيع النوابض على المواد المعدنية، وهناك توجه من أجل تطوير عمل النوابض المصنعة من المواد المركبة [1]، وتكمن الغاية الأساسية لذلك في تخفيف وزن قطع النوابض وما يترتب على ذلك من تخفيض لأوزان المركبات والآليات [2].

فولاذ النوابض:

يطلق مصطلح فولاذ النوابض على مجموعة من أنواع الفولاذ التي تمتلك خصائص تناسب عمل النوابض مثل مقاومة شد عالية تسمح للنابض بتحمل إجهادات الشد المرتفعة دون حدوث كسر، مقاومة خضوع مناسبة تتيح للنابض أن يتعرض لإجهادات كبيرة نسبياً دون حدوث تشوه لدن، مرونة تسمح للنابض باستعادة شكله الأصلي على الرغم من تعرضه للإزاحة، فضلاً عن بعض الخصائص الأخرى مثل إمكانية إجراء عملية المعالجة الحرارية لزيادة قساوته وتحسين خصائصه الميكانيكية.

هناك العديد من أنواع الفولاذ التي تستخدم في تصنيع النوابض مثل الفولاذ الكربوني، الفولاذ السبائكي مثل الفولاذ 5160 والفولاذ 50CrV4، وكذلك الفولاذ المقاوم للصدأ من النوع SS 301، ويعد فولاذ النوابض عالي الكربون من أكثر السبائك الفولاذية استخداماً في صناعة النوابض ومن ضمنه الفولاذ من النوع SUP3 [3]، وهو فولاذ منخفض السبائكية ومرتفع الكربون تكمن أهميته في إمكانية معالجته حرارياً للحصول على مقاومة شد عالية تفوق بكثير أنواع الفولاذ متوسطة أو منخفضة الكربون، كذلك فإن هذا الفولاذ رخيص الثمن ومتاح ومن السهل الوصول إليه وشرائه، أما السلبية الأساسية في استخدامه فهي مقاومته المنخفضة للحرارة ووجود بدائل ذات مقاومة أعلى للتآكل والزحف.

المعالجات الحرارية لفولاذ النوابض

تتضمن عملية المعالجة الحرارية إجراء عمليات تسخين، وإبقاء وتبريد للقطع بمعدلات محددة من أجل إحداث تغييرات في خصائصها الميكانيكية، حيث أن هذه المراحل ترتبط بنوع السبيكة التي يتم معالجتها وكذلك بشكلها الهندسي وأبعادها، إن أبحاث المعالجة الحرارية مرتبطة ارتباط وثيق بعلم المواد حيث أن هناك دراسات متواصلة حول تحسين خصائص المواد باستخدام المعالجة الحرارية ويقوم الباحثون بشكل دائم بإضفاء تعديلات وإضافات على برامج المعالجة الحرارية المختلفة من أجل التوصل إلى خصائص محسنة تساهم في زيادة جودة وموثوقية القطع الميكانيكية.

يتجه الباحثون نحو تحسين خصائص فولاذ النوابض باستخدام المعالجة الحرارية، حيث قام Majteke وزملاؤه بدراسة تأثير المعالجة الحرارية على قوة ومطيلية فولاذ النوابض من النوع 52CrMoV4 [4] وتم التوصل إلى خصائص ميكانيكية محسنة من خلال التعديل على مدخلات برنامج المعالجة الحرارية حيث تم تقييم النتائج من خلال استخدام اختباري الشد والقساوة. كما بيّنت النتائج أن إجراء عمليتي المعادلة أو التقسية تحسنان من خصائص النوابض بشكل عام [5]. وقد ابتكر Hu و Li وآخرون عملية معالجة حرارية تم تطبيقها على فولاذ النوابض من النوع 65Mn ساهمت بتحسين عمر التعب للنوابض بمقدار 470% [6]. أما Fragoudakis وآخرون [7] فقد درسوا فولاذ النوابض من النوع 56SiCr7 وقد وجدوا بأن المعالجة الحرارية تزيد من حد التعب لهذا الفولاذ.

وعند ذكر برامج المعالجة الحرارية الاعتيادية التي يتم تطبيقها على النوابض لا بد من الإشارة إلى عملية إزالة الإجهادات، حيث أن هذه العملية تزيد من متانة الصدم للنوابض بشكل ملحوظ [8]، وفي حالة برامج المعالجة الحرارية الغير تقليدية مثل المعالجة التجميدية (Deep Cryogenic Treatment) فلم يكن هناك تأثير إيجابي لهذه العملية على أداء النوابض [9].

ولا يتوقف أمر تحسين خصائص فولاذ النوابض عند موضوع المعالجة الحرارية حيث يمكن تحسين خصائصه بتنفيذ عمليات تشكيل لسطح القطع مثل عملية القذف بالكرات الفولاذية (Shot Peening) أو بابتكار عمليات تشكيل أخرى مثل عملية التقوية بلفّ السطح التي تستخدم فيها درافيل بحواف حلزونية لتقوية بلاطات فولاذ النوابض حيث تقوم هذه الدرافيل بتطبيق إجهادات ضغط وقص على سطح المادة المعدنية وأظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في عمر التعب للفولاذ الذي تطبق عليه هذه العملية [10].

وسيط التبريد في المعالجة الحرارية

كما ذكر سابقاً فإن عملية المعالجة الحرارية تتكون من 3 مراحل وهي مرحلة التسخين، مرحلة الإبقاء، ومرحلة التبريد، وإن هنالك العديد من أنواع المعالجة الحرارية التي يمكن تطبيقها على فولاذ النوابض، ولكن لا بد من تمييز كل نوع سبيكة، حيث أن كل سبيكة تستجيب بشكل مختلف لبرنامج المعالجة المنفذ. ومن ضمن المتغيرات التي تؤثر على مدى استجابة السبيكة للمعالجة الحرارية وسيط التبريد الذي يمكن أن يكون ذو معدل تبريد مرتفع مثل الماء، أو معدل تبريد أقل مثل الزيت، كما يمكن أن يستخدم فرن هوائي ذو درجة حرارة محددة مسبقاً كوسيط تبريد (تبريد أيزوترمي)، أو أن تترك القطع لتبرد في الهواء وعندها يكون معدل التبريد منخفضاً، أو أن تترك القطع لتبرد في الفرن ويشكل هذا أخفض معدلات التبريد.

إذاً هناك العديد من المتغيرات التي يمكن دراستها في هذا الصدد، وفي حالة فولاذ النوابض الكربوني يوجد قاعدة عامة للمعالجة تقول إنه من المستحسن إجراء عمليتي التقسية والإرجاع وهنالك أبحاث دائمة من أجل إضافة تحسينات على برامج المعالجة الحرارية المتبعة.

2- هدف البحث:

يهدف البحث إلى دراسة تأثير وسيط التبريد في عملية المعالجة الحرارية على الخصائص الميكانيكية الناتجة لفولاذ النوابض الكربوني من النوع SUP3، مع تحديد وسيط التبريد الأنسب والذي يحقق الخصائص الأمثل لعمل النوابض.

3- طرائق البحث ومواده:

3-1- فولاذ النوابض الكربوني:

تم اختيار فولاذ النوابض الكربوني من النوع SUP3 لإجراء البحث، حيث أنه متوفر في السوق المحلية ويحمل خصائص ميكانيكية جيدة تسمح باستخدامه في تصنيع النوابض. الفولاذ SUP3 فولاذ منخفض السبائكية عالي الكربون قريب من المحتوى اليوتكتوئيدي ويستخدم في تصنيع النوابض والأسلاك التي تتعرض لحمولات كبيرة نسبياً، كما أنه يتمتع بمقاومة شد ومقاومة خضوع جيدة ويمكن إجراء عملية التقسية عليه لزيادة قساوته حتى 60 HRC. لا يقتصر استخدام الفولاذ SUP3 على تصنيع النوابض فحسب وإنما يمكن استخدامه في تصنيع حبال الجسور والمصاعد، الحدود القاطعة، وكذلك يمكن استخدامه في السكك الحديدية.

الجدول (1) التركيب الكيميائي لفولاذ النوابض SUP3

Fe	C	Si	Mn	Cr	P
Bal.	0.75-0.90%	0.15-0.35%	0.30-0.80%	-	Max 0.035 %

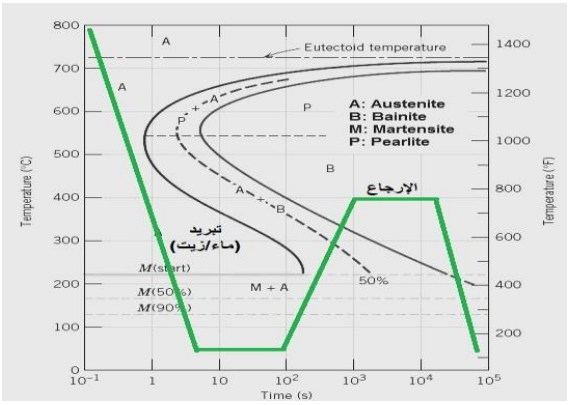
3-2- اختبار التحليل الطيفي للفولاذ:

تم استخدام جهاز FOUNDRY-MASTER Xpert من شركة Oxford Instruments الألمانية لإجراء اختبار التحليل الطيفي على الفولاذ من أجل التأكد من التركيب الكيميائي، حيث أن هذا الجهاز يعتمد طريقة التحليل الطيفي بالانبعاث.

الشكل (1) جهاز التحليل الطيفي FOUNDRY Master Xpert

3-3- المعالجة الحرارية:

تتضمن المعالجة الحرارية إجراء عمليات تسخين وإبقاء وتبريد بمعدلات محددة ومدروسة من أجل الحصول على خصائص ميكانيكية مختلفة للقطع. تم استخدام العينة الخام المستوردة لفولاذ النوابض المدروس كمرجع أساسي للانطلاق منه. في البداية تم تطبيق عملية الأستنة (الوصول إلى درجة حرارة الأوستنيت) للعينات عند الدرجة 810^0، وبعد ذلك تم الإبقاء لمدة من الزمن لضمان وصول كامل القطع إلى درجة حرارة الأستنة، وأما عملية التبريد فقد تم التغيير في وسائط التبريد (السقاية) حيث تم استخدام الماء لتبريد بعض العينات، ومن ثم تم التبريد بواسطة الزيت لمجموعة أخرى، كما تم إجراء عملية إرجاع أوستنيتي من خلال التبريد باستخدام فرن آخر مضبوط عند درجة حرارة 400^0، وبالإضافة لهذا تم إجراء عملية معادلة من خلال التسخين إلى درجة الحرارة 840^0 وبعد ذلك إخراج القطعة وتركها لتبرد في الهواء.



الشكل (2) مخطط توضيحي يظهر منحني برنامج المعالجة الحرارية للعينتين A و B، منحنيات التحول الرئيسية الظاهرة هي خاصة بفولاذ كربوني بمحتوى يوتكتوئيدي [11]

الجدول (2) توصيف برامج المعالجة الحرارية المنفذة

العملية	المنهجية	وسيط التبريد (السقاية)	رمز العينة
تقسية (سقاية) بالماء والإرجاع Q-T عند 400^0	810^0 → ماء بحرارة الغرفة →إرجاع لساعة 400^0	الماء	A
تقسية بالزيت والإرجاع Q-T عند 400^0	810^0 → زيت بحرارة الغرفة →إرجاع لساعة 400^0	الزيت	B
إرجاع أوستنيتي	810^0 → 400^0 تبريد بالفرن لساعة → تبريد هواء	فرن صندوقي	C
معادلة	840^0 → تبريد بالهواء إلى درجة حرارة الغرفة	هواء	D
العينة الخام	بدون معالجة (عملية سحب وتخمير من بلد المنشأ)	–	E

تـم اسـتخدام أفـران صـندوقية مـن شـركة CARBOLITE وشـركة Linn مـزودة بحساسـات حراريـة لإجـراء عمليـات المعالجة الحرارية.

الشكل (3) الفرن الصندوقي من شركة Carbolite

تـأثير الطبقـة المنـزوع عنهـا الكربـون (ظـاهرة نـزع الكربـون Decarburization)

تحدث عملية نزع الكربون عندما يتم تسخين المعدن لدرجة حرارة عالية حيث يتفاعل الكربون الموجود في السبيكة مع الغازات الحاوية على الأوكسجين أو الهيدروجين المحيطة به، وينتج عن هذا إزالة للكربيدات القاسية عن سطح السبيكة مما يؤدي إلى طراوة سطحية فيها.

ليس هناك مخاوف من تأثير الطبقة المنزوع الكربون عنها في نتائج اختبارات البحث، حيث تُركت علاوة تشغيل بمقدار 0.5 mm علـى العينـات المختبـرة قبـل إجـراء المعالجـة الحراريـة، وبعد الانتهاء من عمليات المعالجة الحرارية تم إنهاء القطع بدقة عالية باستخدام مخرطة CNC وإجراء الاختبارات عليها.

3-4- اختبار القساوة:

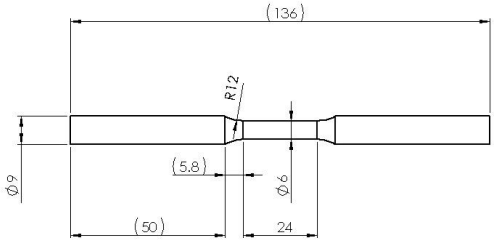
يتم إجراء اختبار القساوة لمعرفة مقاومة المواد ضد التآكل أو الخدش بواسطة الأجسام الأكثر قساوة ويتعلق مقدار القساوة بنـوع المعالجـة الحراريـة وبشـكل الحبيبـات، إذ يمكـن قيـاس قساوة المواد المقساة بواسطة مقياس روكويل أو فيكرز. تم استخدام جهاز قياس روكويل RHT-9000ED من شركة Metrology التايوانية لقياس قساوة العينات حيث يقوم هذا الجهاز بتطبيق حمولة على سطح العينة تترك أثراً بعمق معين يقوم الجهاز بأخذه تلقائياً ويعطي تبعاً له رقم قساوة روكويل الموافق HRC.

- الحمولة المطبقة في الاختبار: 1471 [N]
- شكل أداة الأثر: 1.588 diameter ball indenter
- أبعاد العينات المستخدمة: Ø 9x10 mm

الشكل (4) جهاز اختبار روكويل RHT-9000ED من شركة Metrology التايوانية.

3-5- اختبار الشد:

يتم إجراء اختبار الشد من أجل توصيف بعض الخصائص الميكانيكية للمادة وبشكل خاص مقاومة الشد والخضوع، حيث يقوم هذا الاختبار بتسليط حمل شد متزايد على عينة تم تحضيرها مسبقاً بناءً على مواصفات قياسية حتى حدوث الكسر. تم إجراء اختبار الشد على العينات باستخدام جهاز IBERTEST-IBMU4.



الشكل (5) أبعاد عينة الشد حسب تصنيف ASTM E8، الأبعاد بالـ mm

الشكل (6) جهاز اختبار الشد من شركة IBERTEST

3-6- التصوير الضوئي للكسر:

من أجل توصيف سطح الكسر وتفسير نتائج المعالجة الحرارية على خصائص المادة بشكل تام، تم إجراء تصوير ضوئي لسطح الكسر باستخدام مجهر رقمي من النوع Digital Microscope Mustool G600، هذا المجهر مزود بشاشة رقمية وعدسة ذات درجة تكبير تصل حتى x600، مع إمكانية التسجيل على شكل فيديو أو التقاط صور ذات دقة جيدة 5MP.

الشكل (7) المجهر الرقمي من النوع Digital Microscope Mustool G600

4- النتائج والمناقشة:

4-1- نتائج التحليل الطيفي للعينات:

كانت نتائج التركيب الكيميائي للعينات بعد إجراء 3 اختبارات وأخذ المتوسط الحسابي كما يلي:

الجدول (3) نتائج التحليل الطيفي لمادة الفولاذ المدروس:

Fe	C	Si	Mn	Cr	P
98.0 %	0.90 %	0.208 %	0.391 %	0.129 %	<0.003 %

وهذا التحليل مطابق لفولاذ النوابض المدروس من النوع SUP3. يمكن الملاحظة من نتائج التحليل الطيفي أن السبيكة المدروسة تحوي نسبة كربون عالية تبلغ 0.9% وهي نسبة قريبة من المحتوى اليوتكتوئيدي، كما أن هذه السبيكة لا تملك عناصر سبائكية بنسب مرتفعة (تحوي أقل من 5% عناصر سبائكية) وبالتالي فإن هذا الفولاذ يصنف على أنه فولاذ عالي الكربون ومنخفض السبائكية.

4-2- نتائج اختبار القساوة:

يظهر الجدول الآتي نتائج اختبار القساوة بعد تنفيذ 3 قراءات في أماكن مختلفة من العينات وأخذ المتوسط الحسابي للقراءات:

الجدول (4) نتائج اختبار القساوة على العينات

رمز العينة	وصف	القساوة HRC
A	سقاية وإرجاع عند 400^0 بالماء	تم استبعادها بسبب وجود شق في جميع العينات
B	سقاية وإرجاع عند 400^0 بالزيت	52.5
C	إرجاع أوستنيتي عند 400^0	32
D	معادلة	31
E	العينة الخام	22

- هناك تحسن ملحوظ في القساوة بإجراء عملية المعالجة الحرارية حيث أن زيادة القساوة تعني زيادة مقاومة مادة النابض للاهتراء.
- أظهرت النتائج امتلاك العينة المقساة بالزيت أكبر قيمة من القساوة، حيث أن التبريد بالزيت لهذا الفولاذ أعطى بنية مارتنسيتية قاسية.
- العينة المعادلة والعينة التي تعرضت لعملية إرجاع أوستنيتي لهما القساوة نفسها تقريباً.
- تم أخذ قراءات قبل تعريض العينات المقساة إلى عملية إرجاع وقد بلغت قيمة القساوة HRC 58-60.
- تم استبعاد العينات التي تمت سقايتها بواسطة الماء بسبب وجود شقوق فيها وبالتالي لا فائدة من إجراء عملية السقاية بالماء لهذا الفولاذ طالما هناك خطر تشقق للقطع.

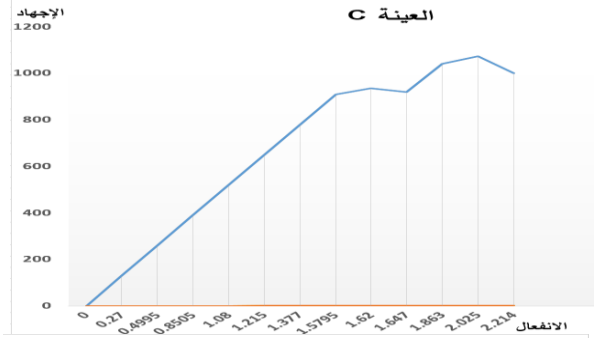
4-2- نتائج اختبار الشد:

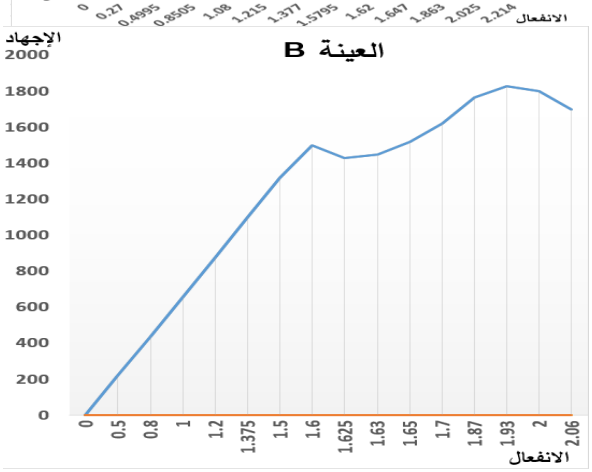
يظهر الجدول الآتي نتائج اختبار الشد على العينات، حيث تم استبعاد العينات المقساة بالماء بسبب وجود شقوق في جميع العينات ناجمة عن الصدمة الحرارية الكبيرة التي سببها التبريد بالماء.

الجدول (5) نتائج اختبار الشد

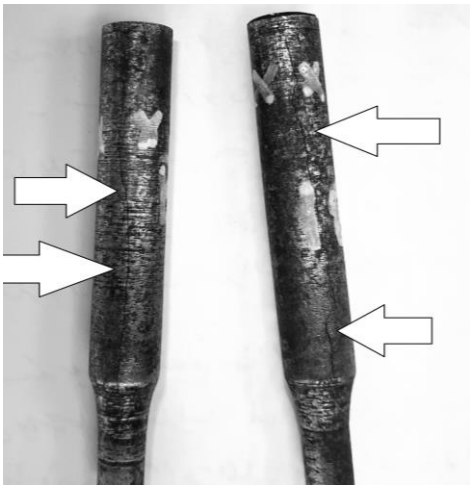
العينة	مقاومة الشد [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	Elongation %
A	هناك شق في جميع العينات		
B	1827	1511	2.06
C	1073	890	2.214
D	1082	959	2.475
E	710	525	4.02

- يمكن الملاحظة أنه بإجراء عملية المعالجة الحرارية تحسنت الخصائص الميكانيكية بشكل كبير للمادة مقارنة بالعينة الخام، حيث أنه وصلت الزيادة في مقاومة الشد إلى أكثر من الضعف.
- هناك اختلاف في الخصائص الميكانيكية عند تغيير وسيط التبريد في المعالجة الحرارية، حيث أن العينات المعالجة بالزيت أعطت خصائص جيدة بينما العينات المعالجة بالماء قد تشققت، والعينات التي تبردت بالهواء امتلكت مقاومة شد أعلى بقليل من العينات التي تبردت في الفرن.
- يمكن الملاحظة بأن الفولاذ المدروس هو فولاذ بمطيلية منخفضة وهو أمر متوقع نظراً لامتلاكه محتوى كربون مرتفع نسبياً ومقاومة شد عالية مقارنة بالفولاذ الطري أو الفولاذ منخفض الكربون.





الشكل(8) مخطط الشد للعينة B التي تعرضت لعملية سقاية بالزيت وإرجاع عند درجة الحرارة 400^0، وللعينة C التي تعرضت لعملية إرجاع أوستنيتي، الإجهاد [MPa].

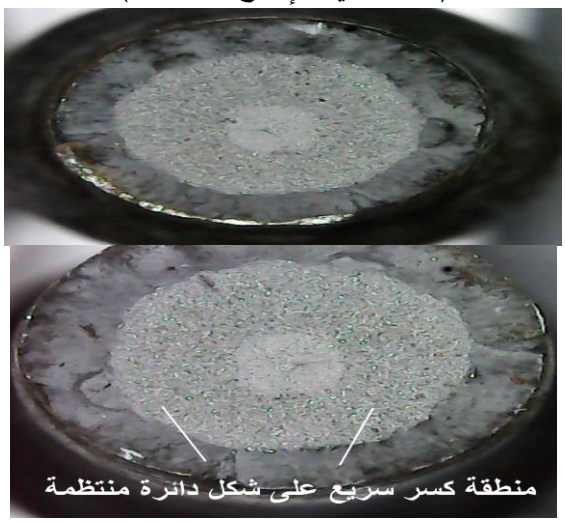


الشكل (9) الشقوق الناجمة عن تبريد العينات بالماء حيث تم استبعاد هذه العينات من الاختبارات

4-3- الصور الضوئية للكسر:

توضح الصور الآتية نتائج اختبار التصوير الضوئي للكسر:

1. العينة B (سقاية بالزيت وإرجاع عند 400^0):



الشكل (10) نتائج التصوير الضوئي لكسر العينة B.

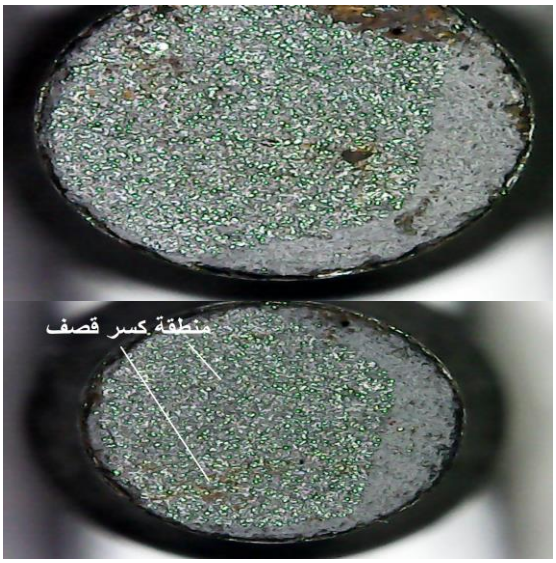
يمكن الملاحظة بأن منطقة الكسر السريع القصف تشكل دائرة في مركز القطعة وهناك طراوة طفيفة في الطبقة السطحية ساهمت بإعطاء شكل سطح كسر مطيلي على الحواف، إلا أن انتظام شكل سطح الكسر يعطي فكرة على نجاح عملية المعالجة الحرارية لهذه القطعة والوصول إلى قساوة بنيوية منتظمة.

2. العينة C (إرجاع أوستنيتي):

الشكل (11) نتائج التصوير الضوئي لكسر العينة C.

يمكن الملاحظة بأن الكسر كان مطيلياً أكثر من العينات الأخرى، على الرغم من أن الخصائص ما بين هذه العينة والعينة المعادلة كانت متشابهة إلا أن هناك اختلاف في شكل سطح الكسر حيث أن التبريد في الفرن (التبريد الايزوترمي) ساهم بتحول الأوستنيت إلى بنيت والذي يتمتع بمتانة ومطيلية أكبر من المارتنسيت

3. العينة D (العينة المعادلة):



الشكل (12) نتائج التصوير الضوئي لكسر العينة D.

من الواضح بأن منطقة الفشل السريع والقصف (وهي المنطقة التي تمتد إلى يسار السطح) تشكل النسبة الأكبر من سطح الكسر، ويمكن الملاحظة بأن هنالك فرق واضح في سطح الكسر بالنسبة لهذه العينة والعينة C على الرغم من وجود تقارب في بقية الخواص كما أظهرت الاختبارات

5- الاستنتاجات:

تم في هذا البحث دراسة تأثير وسيط التبريد في المعالجة الحرارية على الخصائص الميكانيكية لفولاذ النوابض الكربوني، حيث يمكن صياغة الاستنتاجات التالية اعتماداً على العمل التجريبي الذي تم القيام به:

- إن تطبيق المعالجة الحرارية بشكل عام يحسن من الخصائص الميكانيكية لفولاذ النوابض الكربوني من النوع SUP3.
- إن تغيير وسيط التبريد في المعالجة الحرارية يؤثر بشكل كبير على القطع، حيث تم مقارنة مختلف وسائط التبريد المتاحة عند معالجة فولاذ النوابض الكربوني، وقد وُجد بأن إجراء عملية السقاية باستخدام الزيت كوسيط تبريد تحقق أفضل الخصائص كما أنها تحد من خطر حدوث تشققات للقطع المعالجة.
- إن استخدام الماء كوسيط تبريد للفولاذ SUP3 أدى لتشقق جميع العينات وبالتالي تلفها، ولذلك يوصى بتلافي سقاية هذا الفولاذ بواسطة الماء.
- كان هناك خصائص متشابهة ما بين عمليتي المعادلة وعملية الإرجاع الأوستنيتي للفولاذ SUP3.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل(501100020595).

6-References:

[1] C. Amsalu and E. G. Damtie, “Mechanical characterization, and comparison of stress-induced on mono and multi-leaf spring from laminated composite material,” Results Mater., vol. 16, 2022.

[2] M. Ruban, V. S. Shaisundaram, and R. Senthamizh, “Analysis of laminated plain carbon steel leaf spring in maxi truck,” Mater. Proc., 2022.

[3] Y. Yamada and T. Kuwabara, Materials for Springs. Springer, 2007.

[4] V. J. Matjeke, G. Mukwevho, A. M. Maleka, and J. W. Van Der Merwe, “Effect of heat treatment on strength and ductility of 52CrMoV4 spring steel.,” IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 430, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/430/1/012044.

[5] O. R. Adetunji, P. O. Aiyedun, S. O. Ismaila, and M. J. Alao, “Effect of Normalizing and Hardening on Mechanical Properties of Spring,” J. Miner. Mater. Charact. Eng., vol. 11, no. 08, pp. 832–835, 2012, doi: 10.4236/jmmce.2012.118074.

[6] W. Hu, J. Li, K. Li, T. Zhang, and X. Ren, “Improving the cycle fatigue life of spring steel by a novel thermal cycling process,” Mater. Res. Express, vol. 8, no. 5, 2021, doi: 10.1088/2053-1591/ac006c.

[7] R. Fragoudakis, S. Karditsas, G. Savaidis, and N. Michailidis, “The effect of heat and surface treatment on the fatigue behaviour of 56SiCr7 spring steel,” Procedia Eng., vol. 74, pp. 309–312, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.06.268.

[8] V. I. Zurnadzhy et al., “Effects of stress relief tempering on microstructure and tensile/impact behavior of quenched and partitioned commercial spring steel,” Mater. Sci. Eng. A, vol. 745, pp. 307–318, 2019, doi: 10.1016/j.msea.2018.12.106.

[9] V. R. M. Gonçalves, B. Podgornik, V. Leskovšek, G. E. Totten, and L. de C. F. Canale, “Influence of Deep Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of Spring Steels,” J. Mater. Eng. Perform., vol. 28, no. 2, pp. 769–775, 2019, doi: 10.1007/s11665-019-3864-6.

[10] C. X. Ren et al., “Enhanced bending fatigue resistance of a 50CrMnMoVNb spring steel with decarburized layer by surface spinning strengthening,” Int. J. Fatigue, vol. 124, no. March, pp. 277–287, 2019, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.03.014.

[11] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th Edition. Wiley, 2018, 992.