

## تأثير بارامترات عملية الـ Austempering في البنية والخواص الميكانيكية للحديد الحبيبي

م. رakan الحاج عبد\*

أ. د. سمير أكتع\*\*

أ. د. خليل عزيمة\*\*\*

### الملخص

دُرِسَ تأثير بارامترات عملية الـ Austempering (التقسية البينية دون توقف) في البنية والخواص الميكانيكية لعينات من الحديد الحبيبي ذي المكونات الآتية: C 3.5 % ، Si 2.5 % ، Ni 1.1 % ، Cu 0.6 % ، Mo 0.23 % ، Mn 0.3%. أجريت عملية Austempering عند درجات حرارة 350 °C و 315 °C من أجل زمن 30 و 60 و 120 و 180 و 240 دقيقة. أظهرت النتائج أن الزمن من أجل تحقيق المواصفات الميكانيكية المثلى للحديد المطاوع الذي عولج بعملية Austempering عند الدرجة 350 °C و 315 °C هو 180 و 240 دقيقة على التوالي. كما أظهرت النتائج أن درجة الحرارة 350 °C مقارنة بدرجة حرارة 315 °C تؤدي إلى الحصول على استطالة ومقاومة صدم عاليتي القيم، أمّا القساوة وقوة الشد فهما منخفضتا القيم.

الكلمات المفتاحية: الحديد الحبيبي، التقسية البينية دون توقف.

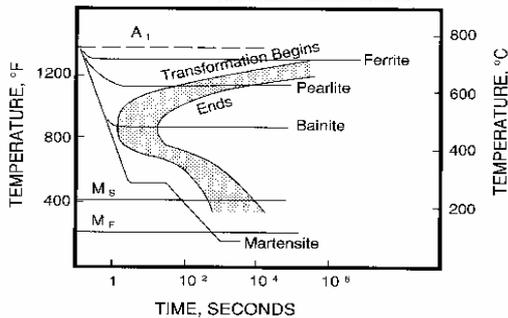
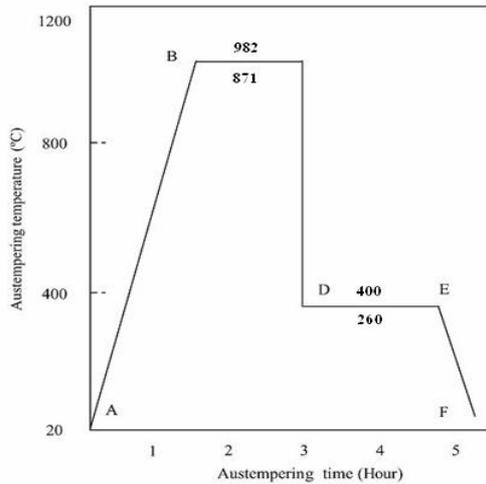
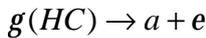
\* أعد هذا البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندس رakan الحاج عبد بإشراف الأستاذ الدكتور سمير أكتع ومشاركة الأستاذ الدكتور خليل عزيمة.

\*\* قسم التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب.

\*\*\* قسم التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

## 1- مقدمة

مناسب من أجل تحويل البنية كاملة إلى استنتيت. ثم يجري التبريد السريع بالسفاية إلى درجة حرارة ضمن المجال  $260-400\text{ }^{\circ}\text{C}$  [5] ومن ثم التبريد بالهواء. وذلك موضّح بالشكل 1 (الذي يوضّح أيضاً مخطط TTT للحديد ADI)، وخلال عملية الـ Austempering يحدث تفاعلان [5]، في التفاعل الأول يتحول قسم من الاستنتيت إلى فريت أبري ويبقى الاستنتيت بنسبة عالية من الكربون وفق التفاعل الآتي:  $g \rightarrow a + g(HC)$  إذا بقي الحديد مدة طويلة في درجة حرارة الـ Austempering يحدث التفاعل الثاني الذي يؤدي إلى تفكك المزيد من الأستنتيت الذي يحوي الكربون بنسبة عالية إلى فريت وكربيد وفق التفاعل الآتي:



الشكل (1) عملية المعالجة الـ AUSTEMPERING

برز الحديد ADI (الحديد الحبيبي المعالج بعملية Austempering) بوصفه مادة هندسية مهمة في السنوات الأخيرة لما يتمتع به من مواصفات مميزة كالاستطالة والمطيلية الجيدة وقوة شد عظمى ذات قيم مرتفعة ومقاومة تآكل وتعب ممتازة وقدرة ممتازة على مقاومة الصدمات [3]. وبسبب هذا المزيج من المواصفات ازدادت تطبيقات الـ ADI في المدة الأخيرة وفي مختلف المجالات مثل الآلات الزراعية وأجهزة نقل الحركة والصناعات الحربية وفي المناجم.. الخ فقد حل محل الفولاذ القابل للتشغيل من ناحية التطبيقات التي تتطلب قوة شد عالية، لذا من البديهي أن يتم اختياره من قبل مهندسي التصميم والإنتاج لما يتمتع به من مواصفات ميكانيكية ممتازة،

حديد الـ ADI (الحديد الصب الحبيبي المعالج بعملية Austempering) خلأطي ويساعد السيلكون المضاف إليه في منع ترسب الكربيد في أثناء عملية الـ Austempering ويحافظ على نسبة الكربون العالية، أما باقي العناصر الخلائطية مثل  $Ni, Mo, Cu$  [2] فهي تضاف لتحسين مواصفات الحديد ADI ومن أجل منع تشكل البرليت خلال عملية الـ Austempering. تتسبب المواصفات الممتازة من الـ ADI إلى بنيته الفريدة المؤلفة من بنية بايانيتية مؤلفة من الفريت الأبري والاستنتيت الذي يحوي الكربون بنسبة عالية، وهي تختلف عن الفولاذ المعالج بالطريقة نفسها الذي تتألف بنيته بعد المعالجة من الفريت والكربيد. وبسبب هذا الاختلاف فإن ناتج تفاعل الـ Austempering يشار إليه بالأوسفريت [1]. تتألف عملية الـ Austempering من الاستتة في مجال الحرارة  $982-871\text{ }^{\circ}\text{C}$  (فوق خط التحول إلى استنتيت بـ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ولزمن

الطيفي لإحدى العينات تبين التركيب الكيميائي لهذا الحديد:

C 3.5 % ، Si 2.5 % ، Ni 1.1 % ،

Cu 0.6% ، Mo 0.23 % ، Mn 0.3%

كما يبيّن الجدول أدناه المواصفات الميكانيكية للحديد المستخدم قبل إجراء المعالجة الحرارية

إجهاد الخضوع MPa	إجهاد الشد الأعظمي MPa	الاستطالة النسبية %	القساوة HBn	طاقة الصدم J
700	1050	7	325	70

وضعت المجموعة الأولى من العينات بالفرن ورفعت درجة الحرارة حتى الدرجة  $900^{\circ}\text{C}$  لمدة 2 ساعة من أجل تحويل البنية المجهرية إلى استنيت 100% ومن ثم نُقِلَتْ إلى حوض ملحي ذي درجة حرارة  $315^{\circ}\text{C}$  (تبريد سريع) (Austempering) خلال عدة أزمنة 30 و 60 و 120 و 180 و 240 دقيقة، ومن ثم أُخْرِجَتْ لتُبرَّد في الهواء.

- وضعت المجموعة الثانية من العينات بالفرن ورفعت درجة الحرارة حتى الدرجة  $900^{\circ}\text{C}$  مدة 2 ساعة أيضاً، ومن ثم نُقِلَتْ إلى فرن ملحي ذي درجة حرارة  $350^{\circ}\text{C}$  عدة أزمنة أيضاً 30 و 60 و 120 و 180 و 240 دقيقة، ومن أُخْرِجَتْ لتُبرَّد في الهواء.

بعد إخراج العينات جميعها والانتهاؤ من عملية المعالجة الحرارية أُجريت اختبارات الشد والصدم والقساوة على كل مجموعة من العينات وفق معايير ASTM-E8, ASTM-A897, DIN50351 على التسلسل [5] وبيّن الشكل (3) أشكال عينات الاختبار.

وضعت النتائج جميعها في الجدول (1) أدناه حيث أُخِذَتْ القراءات المتوسطة لثلاث عينات لكل اختبار من العينات، كما يظهر الشكل (2) البنيات المجهرية المختلفة للعينات بعد المعالجة الحرارية.

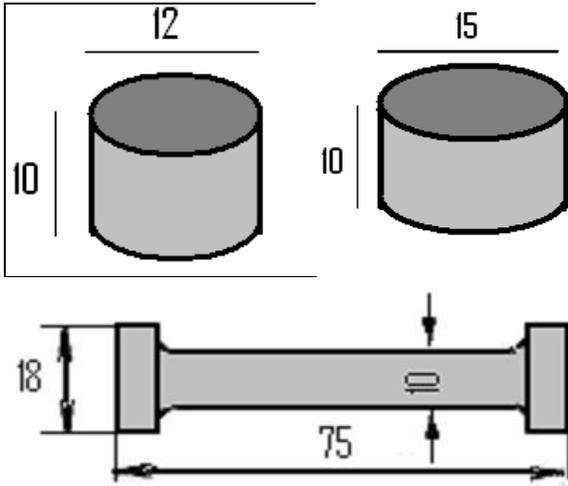
في هذه الحالة سوف تحوي على كربيد، وهذا يجعل المادة قسيفة [5]. لذا يجب تفادي هذا التفاعل في أثناء المعالجة الحرارية. ومن المعروف أن أفضل المواصفات الميكانيكية يمكن الحصول عليها في الحديد ADI بعد نهاية التفاعل الأول، وقبل حدوث التفاعل الثاني، أي قبل تشكل الكربيد الذي يجعل المادة قسيفة .

من ناحية أخرى فإنّ ADI بحاجة لكمية ملحوظة من العناصر الخلائطية من أجل عملية Austempering الكاملة، ولكن النسبة العالية من العناصر الخلائطية يمكن أن يؤدي إلى انفصالها الكامل، لذلك من الضروري والمهم استخدام النسب المثالية والمناسبة من العناصر الخلائطية للحصول على شروط مقبولة لإتمام عملية المعالجة Austempering وفي الوقت نفسه إلغاء أو التخفيض للحد الأدنى من عملية انفصال هذه العناصر. ومن أجل منع العيوب المذكورة عملية أعلاه فإنه من الضروري التحكم ببارامترات الصب مثل المعالجة المعدنية السائلة لإنتاج الحديد ودرجات حرارة صب منخفضة ونظام التغذية المستمرة، ولكن من أهم العوامل والبارامترات أيضاً في المعالجة الحرارية (Austempering) الزمن ودرجة الحرارة اللذان يؤديان دوراً مهماً في الحصول على بنية مجهرية ممتازة، ومن ثم الحصول على مواصفات ميكانيكية حسنة للحديد ADI.

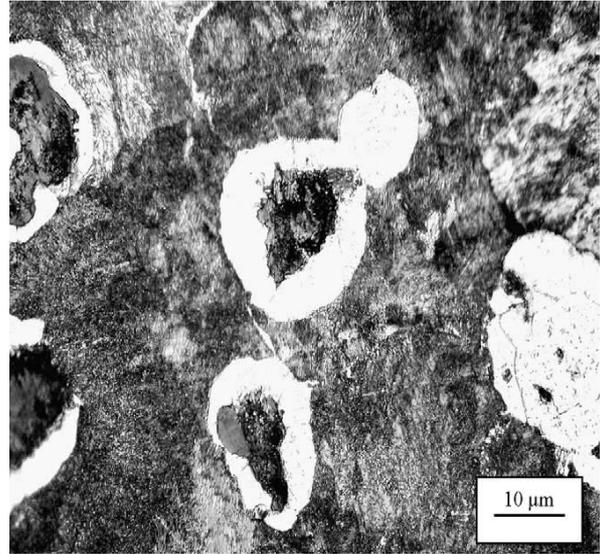
تم في هذه الدراسة البحث في هذين العاملين وتأثيرهما في الحصول على مواصفات ميكانيكية وبنية مثالية للحديد ADI.

## 2- التجارب المخبرية

أُخِذَتْ عدة عينات من الحديد الحبيبي ورفقت بشكل مناسب وقُسمَتْ إلى مجموعتين وبيّن الشكل (2) البنية المجهرية للحديد الصب المستخدم، وبإجراء التحليل



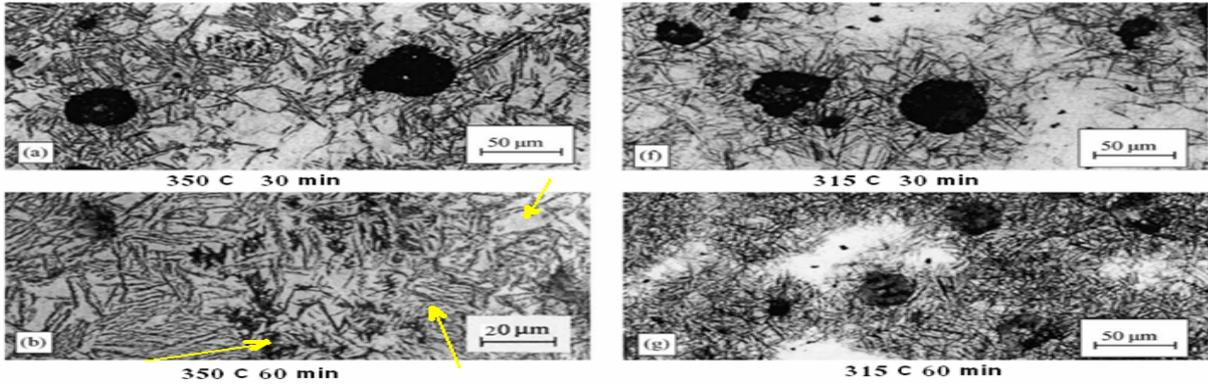
الشكل (3) أشكال عينات الاختبار



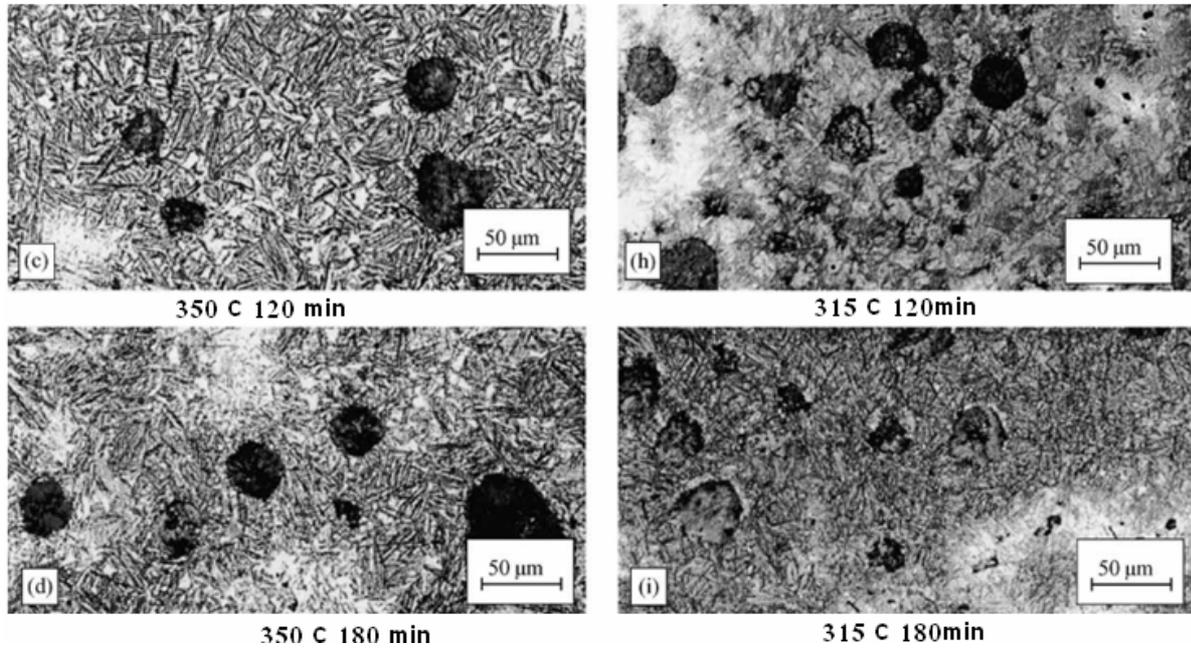
الشكل (2) البنية المجهرية للحديد المستخدم قبل المعالجة

الجدول (1) نتائج الاختبارات الميكانيكية على عينات من حديد الصب الحبيبي المعالج بالـ اوستمبيرنغ

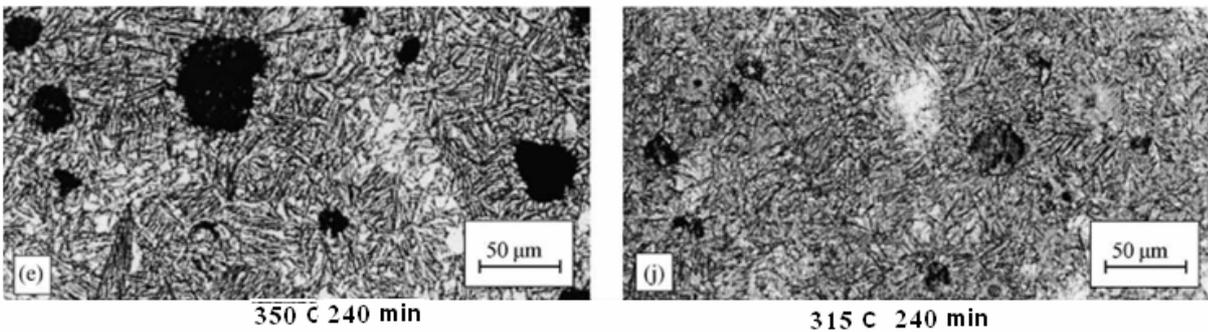
طاقة الصدم J	القساوة HBn	الاستطالة النسبية %	إجهاد الشد الاعظمي MPa	إجهاد الخضوع MPa	درجة الحرارة °C	رقم العينة	الزمن min
20	487	1.5	1250	1100	315	a	30
50	463	2.1	1380	1160		b	60
70	465	2.5	1450	1200		c	120
80	466	2.8	1450	1190		d	180
78	467	2.9	1450	1192		e	240
20	390	2.1	825	620	350	f	30
70	335	4	860	625		g	60
110	317	5.1	870	630		h	120
120	315	5.2	885	635		i	180
130	315	5.2	887	640		j	240



الشكل (4) علاقة قوة الشد العظمى مع الزمن



الشكل (4) البنية المجهرية بعد المعالجة الحرارية

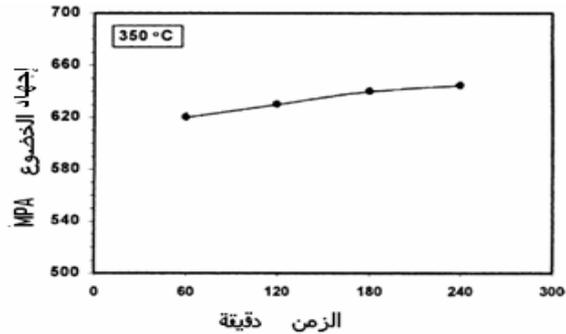
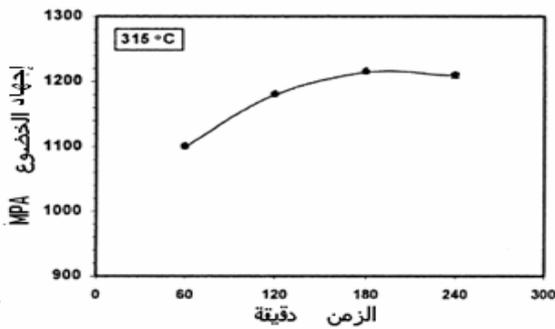


الشكل (4) البنية المجهرية بعد المعالجة الحرارية

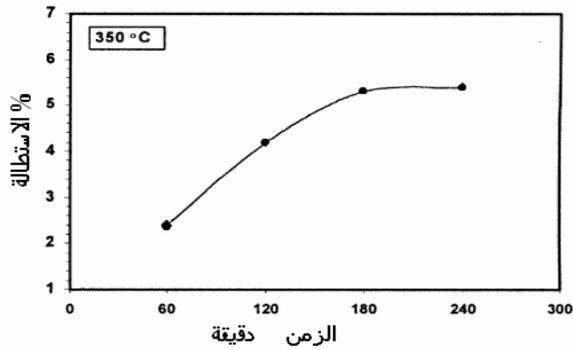
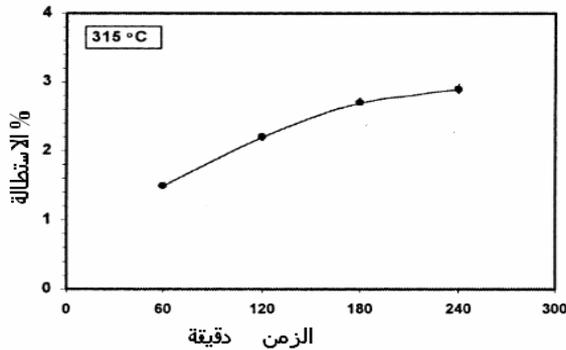
$I\alpha$ ،  $I\gamma$  المعدل الوسطي لقمم الأوستنيت والفريت المستخرجة من الجهاز  $R\alpha$ ،  $R\gamma$  بارمترات الشبكة البلورية للأوستنيت والفريت. وتبين الأشكال التالية من 5 حتى 7 تغير إجهاد الخضوع وإجهاد الشد والاستطالة مع الزمن للعينات المعالجة عند الدرجة  $350^\circ\text{C}$  والدرجة  $315^\circ\text{C}$ . تظهر الصور من a حتى e البنيات المجهرية للحديد المعالج عند درجة حرارة  $350^\circ\text{C}$  وبأزمنة مختلفة 30 و 60 و 120 و 180 و 240 دقيقة والصور من f حتى z البنيات المجهرية للحديد الحبيبي المعالج عند درجة حرارة  $315^\circ\text{C}$  وبأزمنة مختلفة 30 و 60 و 120 و 180 و 240 دقيقة.

يبين الشكل 4 الصور a حتى e البنيات المجهرية للعينات التي عولجت عند درجة حرارة  $350^\circ\text{C}$  وبالتسلسل 30 و 60 و 120 و 180 و 240 دقيقة. أمّا الصور من f حتى j فهي البنيات المجهرية للعينات التي عولجت عند درجة حرارة  $315^\circ\text{C}$  وبالتسلسل 30 و 60 و 120 و 180 و 240 دقيقة. كذلك حُلَّت البنية بانعراج الأشعة السينية XRD وذلك لتقييم كمية الأوستنيت والكربون في الأوستنيت. حُلَّت نتائج الأشعة السينية للحصول على كمية كل من الأوستنيت والفريت  $X\alpha$  و  $X\gamma$ . وحُدِّت كمية كل من الأوستنيت  $X\gamma$  والغرافيت  $X\alpha$  والكربيد XC من خلال المعادلة الآتية [7]:

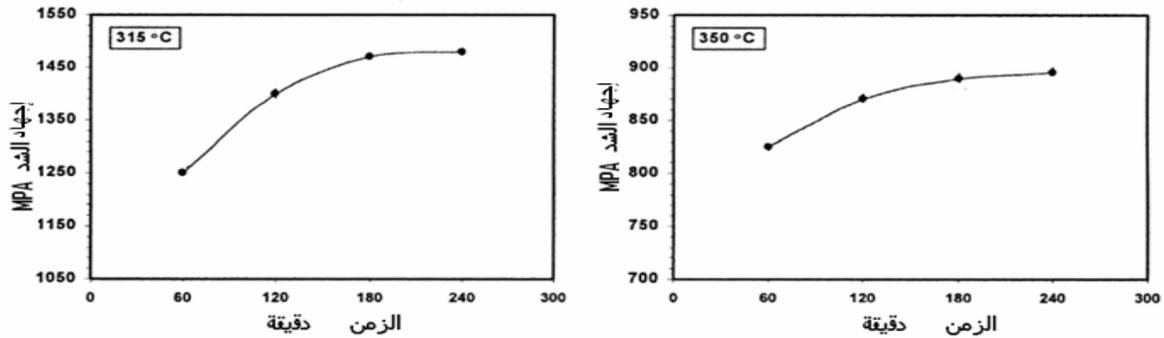
$$X\gamma = 1 - X\alpha - XC[(I\gamma/R\gamma)/((I\gamma/R\gamma) + (I\alpha/R\alpha))]$$



الشكل (5) العلاقة بين إجهاد الخضوع وزمن المعالجة



الشكل (6) العلاقة بين الاستطالة النسبية وزمن المعالجة



الشكل (7) العلاقة بين إجهاد الشد وزمن المعالجة

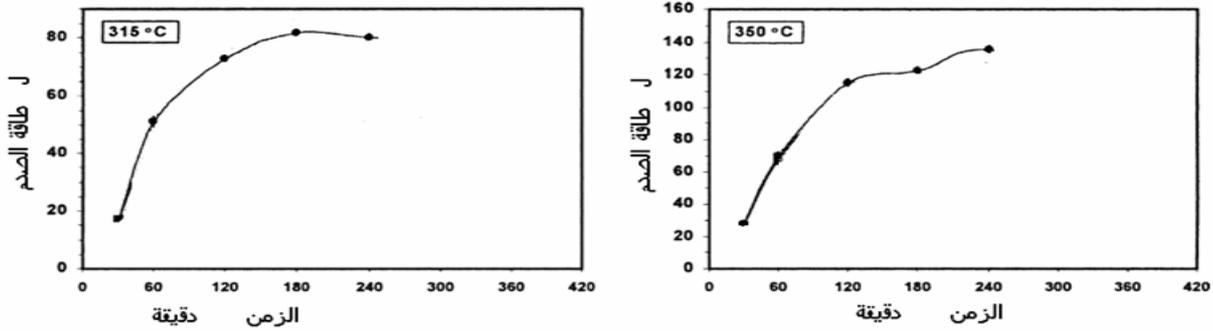
## 3- النتائج والمناقشة

في الأشكال 5 و 6 و 7 التي تبين تغير إجهاد الخضوع وإجهاد الشد والاستطالة خلال عدة أزمنة 30 و 60 و 120 و 180 و 240 وعند درجتي حرارة 350 °C و 315°C تتبين لنا المواصفات الميكانيكية للعينات التي تظهر أنه مع ازدياد الزمن في كلتا الحالتين من درجة الحرارة فإن كلاً من إجهاد الخضوع وإجهاد الشد والاستطالة تزداد ومن ثم تميل للانخفاض بعد نقطة محددة. يمكن تفسير ذلك بأنه بازياد الزمن فإن كمية الأوستنيت غير المتحول، وكذلك المارتنسيت تنخفض [6]. كذلك تظهر النتائج أن المعالجة Austempering عند درجة حرارة 350 °C مقارنة بدرجة الحرارة 315 °C تنتج قيم استطالة عالية وإجهاد شد وخضوع منخفضة؛ لأنه مع ازدياد زمن Austempering يزداد محتوى المارتنسيت من الكربون، ومن ثم يصبح تحوله إلى المارتنسيت أصعب بالتبريد اللاحق ووجود المارتنسيت كما نعلم يؤدي إلى زيادة القساوة.

يظهر الشكل 8 تغير طاقة الصدم للعينات المعالجة وعند مختلف الأزمنة ودرجات الحرارة. تظهر النتائج أن طاقة الصدم تزداد بازياد الزمن.

من خلال الصور تعبر المناطق الرمادية عن الأوسفرين (الذي يتألف من الفريت الأبري والاستنيت المتبقي الذي يحوي كربوناً بنسب عالية). أمّا المناطق البيضاء فتعبر عن حجم الاستنيت غير المتحول في حين يقع السوداء بين الأوسفرين (كما في الصورة b في الشكل 4) هو المارتنسيت. إن تركيب البنية المجهرية في العينات المعالجة عند الدرجة 315 °C هو أبري إلا أن العينات المعالجة عند الدرجة 350 °C تبدو كبايانيت انتقالي. تظهر الصور أن كمية الاستنيت غير المتحول تتناقص مع ازدياد زمن عملية Austempering في كل من درجتي الحرارة (350 °C و 315 °C). إن وجود الاستنيت غير المتحول ناتج عن انفصال العناصر الخلائطية في داخل البنية البلورية؛ مما يؤدي إلى تأخر تحول الأوسفرين خلال عملية Austempering [5].

تتناقص كمية المارتنسيت أيضاً بازياد درجات الحرارة. في الحقيقة مع ازدياد زمن Austempering (تتناقص سرعات التبريد) يزداد محتوى الأوستنيت من الكربون ومن ثم يصبح تحوله إلى مارتنسيت أصعب بالتبريد اللاحق.



الشكل (8) العلاقة بين طاقة الصدم وزمن المعالجة للحديد

عولجت بالـ Austempering عند الدرجة 315°C نحو 23 % والتي تم الحصول عليها بعد 240 دقيقة. وفي الحقيقة فإنّ المواصفات الميكانيكية المثالية يمكن الحصول عليها في عملية Austempering لكل من الدرجتين 315 °C و 350 °C بعد 180 و 240 دقيقة معالجة على التسلسل. وإنّ زيادة أكثر في الزمن يمكن أن ينتج عنها تفكك الأوستنيت المتبقي العالي الكربون إلى فريت وكربيد الذي يدمر المواصفات الميكانيكية للمادة التي أجريت لها عملية Austempering.

من ناحية ثانية في المواصفات الميكانيكية كما هو واضح في الشكل 10 فإنّ القيمة الأعلى من القساوة يمكن الحصول عليها عند زمن معالجة منخفض 30 دقيقة. وهذا ناتج عن حقيقة أنّ المارتنسايت بعد زمن معالجة 30 دقيقة في كلتا درجتي الحرارة يبقى مرتفعاً مقارنة [8] بأزمنة معالجة طويلة وهناك ارتفاع طفيف في القساوة في أزمنة المعالجة الطويلة وهي ناتجة عن تشكل الكربيد عند تحول الأوستنيت المتبقي العالي الكربون إلى فريت وكربيد.

#### 4- الاستنتاجات

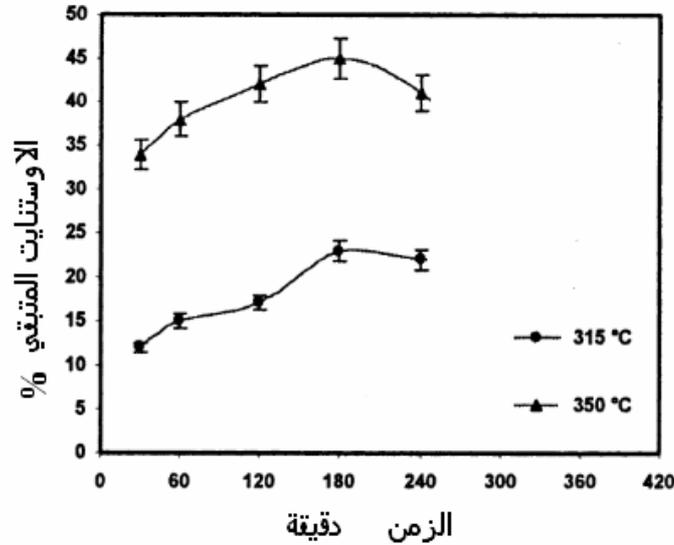
إنّ المعالجة الحرارية Austempering عند الدرجة 315 °C و 350°C تنتج عنها بنية مجهرية للحديد ADI مكونة من أوسفريت وفريت وأوبري وأستنيت متبقٍ.

وطاقة الصدم المثلى يمكن الحصول عليها لكلتا درجتي الحرارة عند الزمن 180 و 240. كذلك يلاحظ أنّ درجة الحرارة 350 °C مقارنة بالدرجة 315 °C تنتج طاقة صدم أعلى. هذه التغيرات في النتائج ناتجة في الحقيقة من التحول الأوسفريتي خلال عملية Austempering للحديد ADI إذ إنّ الأوستنيت يتحول إلى فريت أوبري وأوستنيت متبقٍ يحوي الكربون بنسبة عالية. يؤدي الأوستنيت المتبقٍ دوراً مهماً في خاصية الحبيبية ومقاومة الصدمات في البنية الأوسفريتيّة للحديد ADI. كما هو واضح من الشكل 9 فإنّ كمية الأوستنيت المتبقٍ العالي الكربون في البنية الأوسفريتيّة تزداد بازدياد الزمن حتى نقطة محددة.

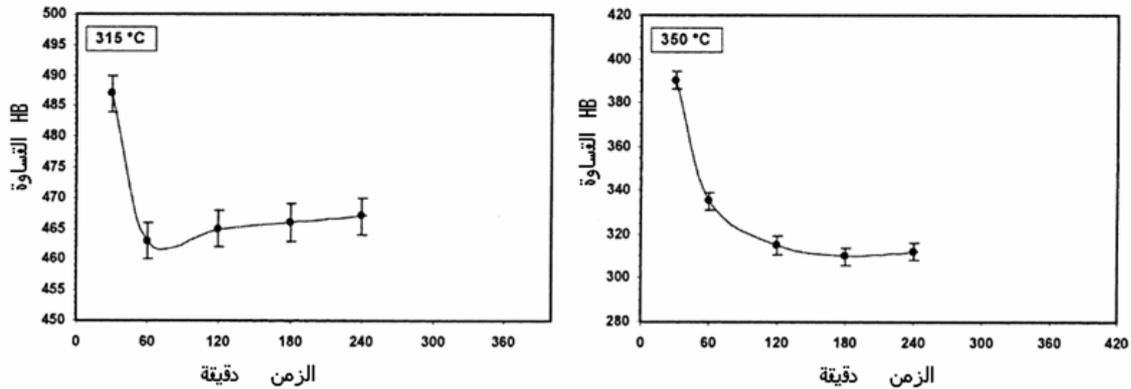
من الملاحظ أيضاً أنه بزيادة درجة حرارة Austempering تزداد كمية الأوستنيت المتبقٍ وينخفض محتوى الكربون فيه.

كنتيجة فإنّ عملية Austempering عند درجات حرارة مرتفعة 350 °C تنتج بنية مطاوعة أكثر مع مقاومة صدمات أعلى مقارنة بدرجة الحرارة الأخفض °C 315. وتظهر النتائج أنّ الأوستنيت المتبقٍ عند الدرجة 350 °C هو بنحو 42 % الذي يمكن الحصول عليه بعد زمن 180 دقيقة في عملية Austempering. إنّ الكمية العظمى من الأوستنيت العالي الكربون للعينات التي

- 2- تنخفض كمية الاوستنيت غير المتحول والمارتنسيت في العينات المعالجة بالـ Austempering بزيادة زمن المعالجة.
- 3- مقارنة بدرجة حرارة المعالجة  $315^{\circ}\text{C}$ ، عند المعالجة بدرجة حرارة  $350^{\circ}\text{C}$  تنتج مطاوعة وطاقة صدم أعلى وإجهاد شد وقساوة أقل.
- 4- بزيادة زمن المعالجة حتى نقطة محددة (min 200) في كلتا درجتي الحرارة فإن قيم إجهاد الشد
- والخضوع والاستطالة النسبية وطاقة الصدم للمواد المعالجة تزداد، ومن ثم تميل إلى التناقص بعد حين.
- 5- إنَّ المعالجة في درجات حرارة منخفضة (أقل من  $315^{\circ}\text{C}$ ) ولزمن قصير (30min) تنتج قساوة عالية مقارنةً بالمعالجة في شروط أخرى
- 6- إنَّ البنية المثالية والموصفات الميكانيكية الفضلى للمعالجة يمكن الحصول عليها عند درجة حرارة  $350^{\circ}\text{C}$  وزمن 240 min ودرجة حرارة  $315^{\circ}\text{C}$  وزمن 180 min .



الشكل (9) العلاقة بين الاستنيت المتبقي وزمن المعالجة



الشكل (10) العلاقة بين القساوة وزمن المعالجة

### المراجع:

- [1] K.L. Hayrynen, D.J. Moore, K.B. Rundman, Heavy section ductile iron: production and microsegregation, AFS Trans. 96 (1988) 619–632.
- [2] M. Gagne, Effect of Mn and Si on the quality of heavy section ADI castings, AFS Trans. 95 (1987) 523–532.
- [3] B. Corlu, D. Venugoplalan, A. Alagarsamy, Microstructure and mechanical properties of austempered Cu–V ductile iron, ASME, in: Proceedings of the 2nd International Conference on Austempered Ductile Iron, Ann Arbor, MI, USA, 1986, pp. 187–193.
- [4] E. Dorazil, High Strength Ductile Cast Iron, Ellis Horwood, 1991.
- [5] D.J. Moore, T.N. Rouns, K.B. Rundman, The relationship between microstructure and tensile properties in austempered ductile irons, AFS Trans. 95 (1987) 765–774.
- [6] M. Nili Ahmadabadi, Bainitic transformation in austempered ductile iron with reference to untransformed austenite volume phenomenon, Metall. Mater. Trans. A 28 (10) (1997) 2159–2162.
- [7] B. Bosnjac, B. Radulovic, K. Pop-Tonev, V. Asanovic, Microstructural and mechanical characteristics of low alloyed Ni–Mo–Cu austempered ductile iron, ISIJ Int. 40 (12) (2000) 1246–1252.
- [8] K.S. Putatunda, K.P. Gadicherla, Effect of austempering time on mechanical properties of a low manganese austempered ductile iron, J. Mater. Eng. Perform.